

オタネニンジン (*Panax ginseng* C.A. Meyer) の

養液栽培による苗生産に関する研究

2023年1月

川勝 貴史

オタネニンジン (*Panax ginseng* C.A. Meyer) の

養液栽培による苗生産に関する研究

筑波大学大学院

理工情報生命学術院

生命地球科学研究群

農学学位プログラム

博士（農学）学位論文

川勝 貴史

目次.....	i
略語.....	iii
語句の説明.....	iv
第1章 緒論.....	1
第2章 育苗に適する環境条件の検討.....	6
2.1 緒言.....	6
2.2 各実験に共通の材料および方法.....	7
2.3 培地の種類の影響.....	12
2.3.2 材料および方法.....	12
2.3.3 結果.....	13
2.3.4 考察.....	14
2.4 気温と培養液濃度の影響.....	21
2.4.1 材料および方法.....	21
2.4.2 結果.....	21
2.4.3 考察.....	23
2.5 培地温の影響.....	30
2.5.1 材料および方法.....	30
2.5.2 結果.....	30
2.5.3 考察.....	31
2.6 光強度および培養液濃度の影響.....	37
2.6.1 材料および方法.....	37
2.6.2 結果.....	37
2.6.3 考察.....	39
第3章 育苗効率を高める栽培条件の検討.....	48
3.1 緒言.....	48
3.2 栽植密度，光強度および培養液濃度の影響.....	48
3.2.1 材料および方法.....	48
3.2.2 結果.....	49
3.2.3 考察.....	52
第4章 養液栽培苗の評価.....	66
4.1 緒言.....	66
4.2 制御環境下における定植後短期間の生育およびギンセノシド含量の評価.....	67
4.2.1 材料および方法.....	67

4.2.2 結果.....	68
4.2.3 考察.....	69
4.3 圃場における定植後の生育の評価.....	78
4.3.1 材料および方法.....	78
4.3.2 結果.....	78
4.3.3 考察.....	79
第5章 総合考察	82
論文概要.....	89
謝辞.....	91
引用文献.....	92

略語

PFAL : 人工光利用型植物工場 (plant factory with artificial light)

PPFD : 光合成有効光量子束密度 (photosynthetic photon flux density)

SLA : 比葉面積 (specific leaf area)

語句の説明

オタネニンジン： *Panax ginseng* C. A. Meyer

人参： オタネニンジンの根を乾燥させた生薬

Ginseng sprout： 1年生オタネニンジン苗を培養土や水耕栽培装置に移植し、2～8週間栽培することで得られる、食用の若い茎葉および根

芽切り： 播種に先立ち、種子を冷涼湿潤な環境に置き胚を発達させる催芽処理法

甲参： 韓国における苗の基準において、移植可能な苗のうち750gあたり800本以下（平均で1株あたり0.94g）を満たす苗

人工光利用型植物工場： 気密性・断熱性が高く、天候の影響を受けない室内において人工光を照射して植物を栽培する、環境制御が可能な施設

開裂種子： 芽切り処理後に膨潤し、内果皮に割れ目が生じた状態の種子

土壌水分張力： 土壌（培地）中の水の負の圧力に(-1)を掛けて正の値に変換したもの

Fv/Fm： クロロフィル蛍光の測定によって算出される最大量子収率

赤さび： オタネニンジンの根が赤く変色する症状

第1章 緒論

オタネニンジン (*Panax ginseng* C. A. Meyer) は医薬品、食品の原料および化粧品原料等として利用されるウコギ科の多年生落葉草本である (柴田, 2021)。日本においては、主として漢方製剤の原料である生薬として利用され、乾燥した根は「人參」、蒸して乾燥させた根は「紅參」として、医薬品の規格基準書である第十八改正日本薬局方に収載されている (厚生労働省, 2021)。ここで、生薬とは「動植物の薬用とする部分、栽培内容物、分泌物、抽出物又は鉱物など」であり、漢方製剤は複数の生薬やエキスの集合体に添加物を加えた顆粒や、カプセルに詰めたものを指す (日本漢方生薬製剤協会, 2021)。

人參は東アジアにおいて古くから用いられてきた生薬であり、1~2 世紀ごろに編纂された書物「新農本草経」によると、人參は不老長寿の作用をもち、生命を養うとされ、精神安定、消化機能の向上など、幅広い薬効があるとされる (柴田, 2021)。薬理に関するエビデンスの蓄積や臨床研究も多く報告されており、メタアナリシスによれば糖尿病への効果において臨床データの蓄積の必要性が指摘されるなど、議論の余地はあるものの、循環器系疾患、肥満、糖尿病、中枢神経系障害など、幅広い疾病に効果があるとされている (Kim, 2018; Ratan et al., 2021; Shishtar et al., 2014; National Center for Complementary and Integrative Health, 2020)。人參は多糖、アミノ酸、精油およびポリアセチレン化合物など、200 種以上の化合物を含むが、特に全草に含まれるトリテルペノイドサポニンであるギンセノシドが代表的な有効成分であり、薬理効果の報告が多い (Liu et al., 2020)。第十八改正日本薬局方では人參について、「ギンセノシド Rg_1 0.10%以上及びギンセノシド Rb_1 0.20%以上を含む」と規定されており、最大の生産国の中国においても、医薬品規格を定めた中華人民共和国薬典 2020 年版により「ギンセノシド Rg_1 と Re の総量が 0.27%以上、ギンセノシド Rb_1 が 0.18%以上であること」と規定されている (厚生労働省, 2021; 国家药典委員会, 2020)。

日本においては、生薬を原料とする漢方製剤は人々の健康にとって重要な医薬品である。2020 年度の薬事工業生産動態年報によれば、日本における医薬品最終製品の生産金額 9 兆 3054 億円のうち、漢方製剤は 1957 億円 (2.1%) を占めており、これはアレルギー用薬 (1929 億円) や抗生物質製剤 (1857 億円) と同程度の金額である (厚生労働省, 2020 a)。2013 年では漢方製剤の生産金額のうち、87%が医療用漢方製剤であり、また、生薬や漢方製剤は保険診療で使用できる薬剤として薬価基準に収載されている (新井, 2015; 秋葉, 2010)。このように、漢方製剤は人々の健康を維持、向上する医薬品として一定の需要を有し、また、医療において欠かせないため安定した品質で供給し続けねばならず、同時に漢方製剤の原料である生薬においても安定的な確保が不可欠である。

生薬の種類は多岐にわたり、日本では 293 品目が使用されている (山本ら, 2019)。人參は日本における一般用漢方製剤 294 処方のうち 72 処方に配合される (柴田, 2021)。また、年間に 700 t 以上使用され、使用量は生薬の中でも 11 位となっている (山本ら, 2019)。2014 年の生薬の輸入金額は約 323 億円であったのに対し、同年のオタネニンジンの輸入金額は

81 億円を超えており、輸入額の約 25%が人参 1 品目のみで占められた計算となる（山岡ら, 2017; 農林水産省, 2015）。したがって、人参の価格は日本の漢方製剤メーカーの経営にとって重要だと考えられる。さらに、他の生薬と同様に、安定的に確保できなければ漢方製剤の供給に影響を及ぼし、医療や国民の健康に損失を生じる。したがって、生薬、なかでも人参の安定確保は重要であり、そのためにはオタネニンジンの栽培が安定的である必要がある。

オタネニンジンは人参だけでなく、健康食品原料としても利用される（柴田, 2021）。オタネニンジンの市場を正確に把握するのは困難だが、オタネニンジンを含む *Panax* 属の根（Ginseng）は、日本を含む 53 か国で流通している（Baeg, 2022）。さらに、健康関連製品の需要が高まっており、Ginseng の市場は 800 億元（日本円で約 1.6 兆円）ともいわれる（Liu et al., 2020）。日本を含む先進国ではがんや生活習慣病が大きな問題であり、病気発症後の治療のみならず、予防医療や生活習慣の改善によって病気を予防することへの需要は今後も高まると予想される。オタネニンジンの薬効はこれらの需要に合致するため、オタネニンジンやその加工物の需要も今後増えることが期待され、実際に韓国では需要が 2014 年から 2018 年にかけて平均で年 9.7% ずつ増加しているとの報告もある（Baeg, 2022）。日本においても事業者の責任に基づき食品中に含まれる成分の効果効能を標榜できる「機能性表示食品」制度にギンセノシド Rg₁ が血糖値上昇を抑えるとして登録されている例があり（消費者庁, 2022）、今後の需要が増加しうる。

オタネニンジンの葉を乾燥させたものは生薬「人参葉（中国名：人参叶）」として中華人民共和国薬典に記載がある（国家药典委員会, 2020）。このようにオタネニンジンの茎葉には薬効があり、同じ年生のオタネニンジンであれば総ギンセノシド類の含量は根よりも葉や茎で高い（Lee et al., 2020; Shi et al., 2007）。ただし、茎葉は成長につれて硬くなる。また、一般的な栽培では頻繁に農薬を散布するため、茎葉に農薬が残留しやすい。さらに、人参の収穫には 4~6 年かかるため現金化しにくく、栽培には後述するような様々なリスクがあり新規参入しにくい。これらの背景をふまえ、近年、韓国において若い 2 年生の茎葉および根（以下、Ginseng sprout）を野菜として利用する方法が開発された。この手法では、1 年間栽培した実生苗（根）を培養土や水耕栽培装置に移植し、2~8 週間栽培し、収穫する（Hong & Gruda, 2020）。噴霧耕で 3 週間栽培した Ginseng sprout では生薬（人参）よりも総ギンセノシド含量や抗酸化能が高いことが報告されている（Lee et al., 2020）。Ginseng sprout は市場にも流通しており、2014 年から 2016 年にかけて、売上は 6 億ウォン（約 0.6 億円）から 183 億ウォン（約 19 億円）に増加したとの情報がある（Jang et al., 2018）。日本においても、オタネニンジンの果実、根、根茎、葉は「医薬品的効能効果を標ぼうしない限り医薬品と判断しない成分本質（原材料）リスト」に記載されており、野菜的に利用することが可能である（厚生労働省, 2020 b）。既に、Ginseng sprout を日本国内で栽培し販売する企業もあり（亀岡, 2022）、今後、健康意識の高まりに応じて Ginseng sprout が利用される余地はあると考え

られる。

日本や韓国では、一般的にオタネニンジン畑地で栽培される。一方、中国においては林地を伐採した跡地や林床における栽培が主流であるが、近年は環境保護の観点から政府による規制が厳しくなり、畑地での栽培が増加している (Wang, 2019)。オタネニンジン原産地は朝鮮半島からロシア沿海州付近とされ、冷涼な気候や排水性の良い土壌を好むとされる。韓国や日本の福島県の一部では水田跡地でも栽培されているが、特に傾斜地が好ましく、一般的には栽培地の選定が重要であり、生産者は栽培する土地を厳選する必要がある (大隅, 1979; Rural Development Administration, 2018)。

土壌病害、センチュウ害および連作障害の影響を受けやすいため、太陽熱やクロロピクリン等を用いて土壌消毒されるのが一般的である。また、特に日本や韓国の栽培ではスーダングラス等の緑肥をすき込んだ後に栽培されることが多く、化学肥料は根腐れを助長するため使用されず、米ぬかや油粕などの有機質肥料のみが用いられる (宮沢, 1975)。オタネニンジンは強光や高温に弱く、強すぎる光は葉焼けを生じるので避けねばならず、また、地上部には灰色かび病や斑点病等の病害が生じやすく、降雨を避ける必要がある。日本や韓国の慣行栽培では木材や金属製の柱を建て、カヤやネットで片屋根式の簡易な小屋を作ることが一般的であり、中国においてはトンネル状のビニール製の屋根を設ける他、林床で栽培されることもある (宮沢, 1975; RDA, 2018; Wang, 2019)。これらの屋根は強風害を受けやすく、オタネニンジン自体も強風により茎が折れるなどの被害を生じやすいため、台風の常襲地帯はオタネニンジン栽培に不適である (宮沢, 1975)。

種子は硬い内果皮に覆われ、形態的休眠の状態にあり、とりまきしても当年には発芽しない。そのため、栽培においては「芽切り」と呼ばれる催芽処理を行う必要がある (大隅・宮沢, 1956)。芽切りには様々な方法があるが、共通して土や砂に種子を混和したり、層状に埋設した後、乾燥と高温を避けて夏から秋まで管理することで胚の発達を促進させる (宮沢, 1975)。形態的休眠が打破された種子は生理的休眠に入っており、発芽には一定の低温遭遇を必要とするため、秋に播種されるか、冬の間保管した後に春に播種される。直播栽培または移植栽培が行われ、実生は春に3小葉の葉を1枚出葉し、晩秋に地上部が枯れるまで草丈はせいぜい10 cm程度で、1枚の葉のみを有する。宿根性であり、翌年以降は葉の枚数が増え、毎年春に5小葉の掌状複葉を直立した茎の先端に数枚輪生する。移植栽培では1または2年生の秋に収穫した苗を当年の秋に定植することが一般的である (大隅, 1979)。出芽と展葉は1年に一度のみで、光合成速度も低いため生育は緩慢であり、収穫は4~6年生の夏から秋にかけて行われる。地上部の枯死はその年の生育を停止させるため、栽培期間中は農薬により地上部の病虫害を徹底的に防除する必要がある。

以上のように、オタネニンジン栽培適地は気候的に限られており、さらに経験に基づき立地や土壌を選定せねばならないうえ、連作を避ける必要がある。そのため現状では適した土地を確保するのは必ずしも容易ではない。さらに土壌消毒や緑肥栽培の労力と時間や、屋

根の資材確保や建設にかかる費用と労力も要する。栽培期間が長く、さらに展葉は年一回であるため、その間に異常高温や台風等の気象災害および病害に遭遇しやすく、被害を受けると当年および翌年以降の生育に大きく影響する。小屋作り等に初期投資が必要であるにもかかわらず、収量は不安定で栽培開始数年後に全滅することもあり、育苗期を含め、オタネニンジンの栽培は非常に不安定な状態である。

オタネニンジンの栽培上の課題を解決する手段として、植物工場の利用が考えられる。確固たる定義はないものの、植物工場は「高度に制御された環境で周期的に栽培・収穫ができる施設」であり、太陽光型植物工場と人工光型植物工場（PFAL）に大別される（一般社団法人日本施設園芸協会, 2015）。後者は気密性・断熱性が高く、天候の影響を受けない室内において人工光を照射して植物を栽培する、環境制御が可能な施設であり（Kozai, 2018）、養液栽培が用いられることが多い。

養液栽培の特長として、1) 土壌が栽培に適さない場所でも栽培が可能、2) 土壌病害および連作障害を回避しやすく同じ作物の同じ場所での栽培が可能、3) 熟練した技術や経験を必ずしも必要としない、4) 除草・耕耘などの作業から解放される、等がある（一般社団法人日本施設園芸協会, 2015）。これらの特長はオタネニンジンにおける土地確保上の課題、病害のリスクおよび作業負担に対する解決策となりうる。加えて、PFAL では 1) 気候に影響されない、2) 農薬の不使用を実現可能、3) 精密な環境調節による植物の生育や品質の制御が可能、4) 高いトレーサビリティ、5) 衛生的、6) 多段化による土地利用効率の向上が可能、等の特長がある（Kozai, 2018）。

PFAL に適した作物の特徴は、1) 強光が不要、2) 栽培期間が 15~30 日、3) 高栽植密度で生産可能で重量あたりの価値が高い、4) 草丈が低く、根の先端から草丈の先端までが 40 cm 程度、とされる（古在, 2012）。オタネニンジンは休眠性を持つため、栽培の全期間を PFAL で栽培することは現実的ではない。しかし、1 年生の育苗に限れば、栽培期間は長いものの、強光が必要なく、草丈も高くない点では適すると考えられる。

1 年生苗を移植する場合には、用いる苗の質が良いほど 4 年生時の根の肥大と収量が優れる（Zhang et al., 2018）、根長 15 cm 以上の苗を用いる場合では、苗が重いほど 6 年生時の肥大や収量が優れるとの報告がある（大隅, 1979）。ギンセノシド類含量は肥大した根では比較的低い（Zhang et al., 2018）、安定的な品質を得るためには一定の太さの根を安定的に供給することが必要だと考えられる。したがって、生薬栽培のためには一定の根長を有する重い苗を安定的に生産する技術が重要である。また、Ginseng sprout の栽培においては水耕がしばしば用いられるうえ、生食であるため清潔さが求められる。清潔な収穫物を得るためには、苗の時点で清潔である必要がある。現行の圃場における育苗では毎作土地を選定し、新たな圃場を確保する必要があるうえ、土壌や天候等の環境要因や栽培者の熟練度等の影響を受けて苗の品質や収量がばらつきやすいため、安定的に育苗し続けることは困難である。また、土壌による苗の汚染は避けられない。育苗におけるこれらの諸問題に対して、PFAL は解決

策となりうる。

本研究では、生薬や野菜としてのオタネニンジン栽培を安定化させるためには重く清潔な苗の安定的な生産が重要であり、PFALでの養液栽培が苗生産の手段として適すると考えた。そこで、環境条件が1年生オタネニンジン栽培の生育に及ぼす影響を確認して育苗時の環境条件を選定したうえで、密植を併用した生産効率の向上の可能性を検討し、さらに養液栽培苗の定植後の生育や成分含量を評価した。

第2章では、養液栽培における培地の種類、気温、培地温、光強度および培養液濃度が1年生オタネニンジン栽培の生育および根の肥大に及ぼす影響を調査し、育苗に適する環境条件の目安を得た。

第3章では、第2章で得られた結果をふまえて、得られる苗数に大きく影響する要因として栽培密度に着目した。人工光利用型植物工場では十分な光と養分を安定的に与えることができ、かつ病害が発生しにくいため、慣行以上の栽培密度条件下でも苗数を増やせると考えて、栽培密度、光強度および培養液濃度の3要因を組み合わせた試験区を設けて栽培した。目標とする苗の基準によるが、高い培養液濃度のもとで慣行以上の栽培密度とすることで苗の生産効率が高まることを明らかにした。

第4章では、養液栽培で育苗した苗をGinseng sproutの栽培に利用可能であるかを検証するために、露地または養液栽培で育苗した1年生苗を移植して5週間養液栽培し、2年生株の生育とギンセノシド含量を調査した。その結果、生育については今後検討の余地があるものの、ギンセノシド含量は通常の露地栽培で育苗した人参との間に有意差はないことを確認した。加えて、将来的な生薬利用を想定し、苗を圃場に移植して半年後の生育も調査し、養液栽培で育苗した苗は圃場に定植して栽培できることを確認した。

本研究では、第2章から第4章で得られた結果を総合して、オタネニンジン栽培をPFAL下で養液栽培により育苗することで、従来よりも面積および時間あたりの採苗効率を高めることができ、また、その苗は野菜利用や生薬栽培へ利用できうることを示した。

第2章 育苗に適する環境条件の検討

2.1 緒言

オタネニンジンの苗には国際規格が存在し、健全で無傷であることや、*Fusarium* 属菌、*Alternaria* 属菌およびセンチュウが検出されないことが求められ、1年生苗においては根重 0.5 g、根長 10 cm を超えることが Qualified の条件として規定されている (ISO17217-1, 2014)。また、韓国では移植可能な苗は甲参と乙参に分別され、良苗にあたる甲参は 750 g 当たり 800 本以下とされ、これは平均すると 1 株あたり 0.94 g 程度である (RDA, 2019)。その他、日本においては根重 0.75 g、根長 15 cm 以上を基準とするとの情報もある (大隅, 1979)。ただし、韓国や日本の基準は形状の良い人参を作ることを目的としており、例えばオタネニンジン抽出用や野菜用に使用するための苗としては、必ずしもこれらの基準が絶対条件ではないと考えられる。

オタネニンジンの育苗は一般的に圃場において本圃と同様に屋根の下で行われ、育苗に適する遮光率は 95~90% との情報がある (RDA, 2009)。オタネニンジンの生育適温は 21~25°C 程度とされ、化学肥料は一切施用されない (Lee et al., 2010; 宮沢, 1975)。韓国では温室における育苗法についてもマニュアル化されている (RDA, 2018)。培地の選定や養液栽培の際の培養液濃度に関する研究例もあり、ピートモス・パーライト・バーミキュライトが体積比 5 : 4 : 1 の培地で生育が優れ、0.75 g に達したとする報告や (Choi et al., 2011)、ピートとパーライトの体積比 7 : 3 の培地を用いて温室内でドリップ灌水によって養液栽培したところ、得られる根は EC 1.0 dS m⁻¹ の培養液を用いた場合に最も重く、0.93 g に達したとの報告がある (Park et al., 2020)。

しかし、圃場では光環境や温度は地域や栽培年・季節、天候等によって大きく変動するため、オタネニンジンの育苗に適した環境に調節し続けることは事実上不可能であり、実際に、圃場条件下では畝の中でも位置によって光強度が異なることや、一日の中でも強光による光阻害が生じることが報告されている (新藤ら, 2014)。また、圃場では土質や土壌養分、微生物叢などが場所によって異なるうえ、立地や排水性に応じて畝の向きや高さなどを調節する必要があり (宮沢, 1975)、詳細な栽培環境について画一化することは困難だと予想される。温室では圃場よりも高度な環境調節が可能であるが、光強度は依然不安定であり、また、PFAL と異なり多段化に適さないため面積効率は比較的低い。

個葉の光合成速度に関する研究は数多くあり、1年生において光飽和点は光合成有効光量子束密度 (以下、PPFD) 300 μmol m⁻² s⁻¹~400 μmol m⁻² s⁻¹ 付近とする報告や、葉温 18°C で光合成速度が最大となるとする報告があるものの、PFAL のような安定した環境下で長期間育苗する場合の環境条件に関する研究は少ない (Hyun et al., 1993; Zhang et al., 2022)。これまでの PFAL における育苗に関する研究では、ピートとパーライトの混合培地を用いて水のみを与えて 20 週間養液栽培し、PPFD で 50 μmol m⁻² s⁻¹、12 時間日長で最も太く重い根を得られたとの報告があるが、得られた根の肥大は 0.37 g 程度と不十分であり、さらなる検討が

必要である (Lee, 2020). その他にも, 鹿沼土細粒を培地とし, 強光下で二酸化炭素を施用することで栽培期間を短縮でき, 根の肥大速度を向上できるとの報告があるが, 得られる根の重さは 0.3~0.7 g の間にあり, 改善の余地がある (松本ら, 2012). また, 環境要因は交互作用を示すと考えられ, 例えばレタスにおいては生育や品質に対して施用窒素と光強度の交互作用が認められるが (Fu et al., 2017), PFAL におけるオタネニンジンの育苗において生育に対する各種環境要因の交互作用を検討した例は見当たらない.

そこで第 2 章では, PFAL において国際規格や甲参の根重を満たす苗を得ることができる育苗時の環境条件の設定を目的として, 培地の種類, 温度, 培養液濃度および光強度について検討した.

2.2 各実験に共通の材料および方法

第 2 章以降においては, 特記しない限り以下の材料および方法を用いた.

種子:

株式会社ツムラが保有する中国で採種されたオタネニンジン (*Panax ginseng* C. A. Meyer) の種子を供試した. 露地において川砂に埋めて芽切り処理を行い, 処理の開始日が異なる 2 つの材料を準備した. 1 つは, 2019 年 8 月 1 日から 12 月 5 日まで芽切り処理を行った. もう 1 つは, 2020 年 7 月 30 日から 11 月 24 日まで芽切り処理を行った. 両種子ともに, 日陰で数日間乾燥させた後, 4°C の冷蔵庫で試験開始まで保管した. 播種の際には, 実験に応じていずれかの種子を用いた.

播種前処理:

試験における立ち枯れや培地の汚染を防ぐ目的で, 種子を有効塩素 1% のアンチホルミン水溶液に 10 分間浸漬した後, 流水で十分にすすぎ, 蒸留水で湿らせたペーパータオル上に置き, ポリ袋内に密閉した. 播種まで数日間, 2°C の冷蔵庫 (HR-63AT, ホシザキ株式会社) で低温湿潤処理を行った.

栽培室:

太陽光が一切入らず, エアコンにより常時 20°C に設定された室内を栽培室として使用した. 栽培室内の空気は天井に備え付けられたファンによって攪拌し, 二酸化炭素は添加しなかった. 栽培室には二段の栽培棚を置き, 各棚の各段には白色と赤色の LED を有する LED ランプ (WPRW01, トミー精工株式会社) を光源として設置した. LED ランプの波長特性は図 2-1 の通りであった. 試験に応じて本数, ランプの向きおよびポットとランプの距離によって PPFD を調節し, 特記ない限り, ポットの表面で光量子センサー (LI-190R-BNC-2,

LI-COR) によって測定した。各実験における PPF D 条件の表記には、特記ない限り他の実験において同様のランプ点灯条件で測定した値を流用した。光周期は特記ない限り明期と暗期をそれぞれ 14 時間および 10 時間に設定した。栽培室の様子は図 2-2 の通りであった。

希塩酸：

pH 調整のために、塩酸 (HCl 35~37%) を蒸留水で体積比 3 倍に希釈し、約 10% の希塩酸とした。

培養液：

園試処方基準として水道水で作製した。多量要素を KNO_3 、 $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ により供給し、さらに微量元素を Fe-EDTA、 H_3BO_3 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ および $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ により添加し、残留塩素に起因するクロラミンによる障害を防止するため (伊達ら, 2005)、0.5% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ を 1 mL L^{-1} の割合で加えた。計算上含まれる必須元素は、1 単位あたり $\text{NO}_3\text{-N}$ 16 me、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 1 me、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 4 me、K 8 me、Ca 8 me、Mg 4 me、 $\text{SO}_4\text{-S}$ 4 me、Fe 3 ppm、B 0.5 ppm、Mn 0.5 ppm、Zn 0.05 ppm、Cu 0.02 ppm および Mo 0.01 ppm であった。培養液は多量要素が各実験で設定した濃度となるように希釈し、希塩酸を用いて pH 6.5 程度に調節した。N、P、K、Ca、Mg および S 以外の要素は、培養液の濃度に関わらず 1 単位と同量とした。

ロックウール細粒綿：

各実験の試験区に応じた組成および濃度の培養液 60 L に希塩酸 100 mL から 120 mL を加え、そこに体積比でほぼ等量のロックウール細粒綿 (粒径 2~11 mm, 日本ロックウール株式会社) を浸漬および攪拌し、上清の pH が 6.5 程度になるように調整したものを培地として使用した。

ロングポリポット：

高さ 30.5 cm, 上面の直径 15.0 cm, 容量 4 L のポリエチレン製ポット (TO ロングポット, 株式会社東海化成) を用いた。

pH と EC の測定：

pH はコンパクト pH メーター (B-712, 株式会社堀場製作所), EC はコンパクト EC メーター (ECTestr11, Eutech Instruments Pte Ltd) で測定した。

SPAD の測定：

SPAD 計 (SPAD-502Plus, コニカミノルタ株式会社) を用い、最大小葉の中央付近で測定した。ただし最大小葉が枯死した場合は他の小葉を対象とし、すべての小葉で測定不能な場

合は 0 とした。地上部が枯死した場合は欠測とした。

Fv/Fm の測定：

クロロフィル蛍光測定装置 (Op-30s, OPT-SCIENCES) を用い, SPAD と同様に測定した。測定前には専用キュベットにて 30 分間の暗処理を行い, 測定条件は mod=2 とした。

乾物重の測定：

乾燥機 (DSK-10, 静岡製機株式会社または DNE850V, ヤマト科学株式会社) を用いて, 70°C で 72 時間乾燥してから測定した。

有意差の検定：

統計解析ソフト R (バージョン 4.2.1) を用いて各実験に記載の手法で検定した。特記しない限り, 有意水準は $p < 0.05$ として有意性を判断した。

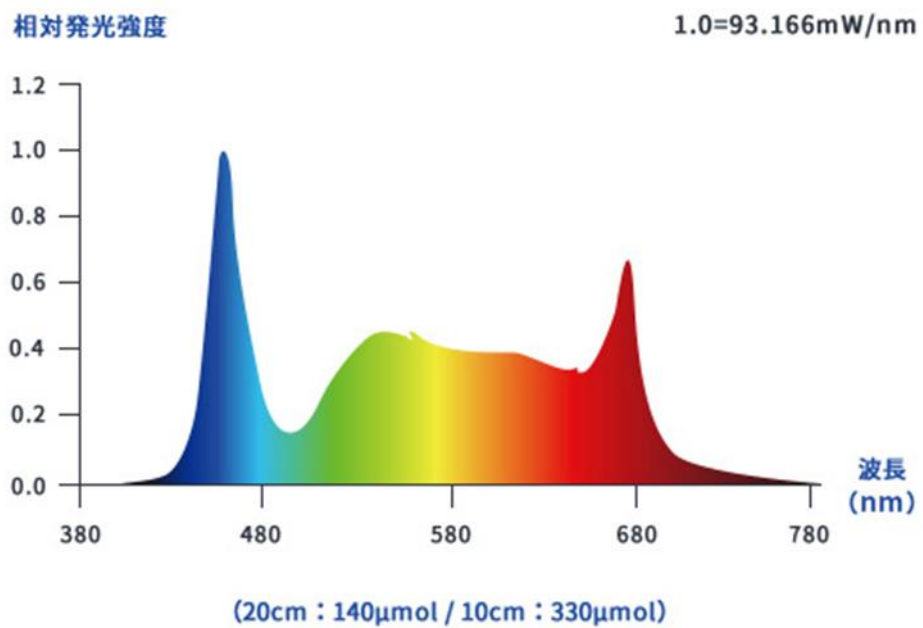


図 2-1 LED ランプの波長特性

メーカー資料より引用 (株式会社トミー精工, 2022)



図 2-2 栽培室内の様子

2.3 培地の種類の影響

2.3.2 材料および方法

試験区に共通の材料および方法

基本的な材料および方法は2.2の通りとした。2020年7月30日から芽切り処理した種子を用いた。2022年1月20日に播種前処理を開始し、2022年2月2日に播種した。試験区に応じた種類の培地をロングポリポットに充填した。栽培は栽培室で行い、播種前処理した種子のうち内果皮に割れが生じたもの（以下、開裂種子）のみを1ポットに20粒ずつ、深さ2cmで播種した。PPFDは測定の結果、 $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。培養液には1/4単位を用い、播種後2週間までは毎週2回、その後は毎週1回、1ポットにつき300mLずつ手灌液し、排液は全て廃棄した。播種後34日に1ポットあたり4株ずつとなるよう間引きし、播種後149日に収穫した。

試験区

培地として、鹿沼土のみ（K区）、ピートとパーライトの混合培地（P区）、ロックウール細粒綿のみ（R区）を充填する3試験区を設けた。K区では鹿沼土細粒（メーカー不詳、土浦農芸株式会社から購入）を用いた。P区ではピート（北海道ピートモスA2級、北海道ピートモス株式会社）に炭酸カルシウムを 5.7 g L^{-1} 加え、パーライト（P-3、太平洋マテリアル株式会社）と体積比7:3で混合して培地とした。R区ではロックウール細粒綿を用いた。播種前の培地内へ培養液を十分供給するために、鹿沼区およびP区では1ポットにつき培養液を1.5L、R区では500mL与え、底面から十分排液させた。

1ポットを1反復とみなして、収穫対象は各試験区7反復とした。さらに土壌水分張力を測定するために、各試験区に3反復を設けてpFメーター（DIK-8343、大起理化工業）を設置した。ポットは乱塊法で配置した。

測定項目

培地の三相分布を測定した。測定にあたり、各試験区と同様の材料および方法によって培地を充填した後1日静置したポットを切り開き、深さ5~10cmおよび10~15cmに相当する位置において直径5cm、容積100mLの採土管を用いて培地を採取した。デジタル実容積測定装置（DIK-1150、大起理化工業株式会社）で実容積を測定した後、105°Cで48時間乾燥させ、乾燥前後の質量差を液相率とした。実容積から液相率を差し引いて固相率とし、100から実容積を差し引いて気相率とした。

播種後147日まで、灌液前の土壌水分張力をpFメーターによって測定した。SPADを播種後61、124および149日に測定した。収穫後、主根長、最大根径、根の新鮮重および乾物重を測定し、乾物率を乾物率（%）=（根の乾物重 / 根の新鮮重）×100として算出した。

三相分布と土壌水分張力の測定は各試験区3反復とした。その他の測定項目は、測定日ごとに1反復ずつ平均値を求めた後、7反復で解析した。収穫後調査した項目のうち、乾物率

以外の項目においては Tukey-Kramer 検定を行った。

2.3.3. 結果

三相分布

K 区では培地の深さにかかわらず気相率は 50%を超え、液相率は約 30%であった (表 2-1)。一方で、P 区や R 区では気相率が低く、液相率が高い傾向にあった。特に深さ 10~15 cm における気相率は P 区と R 区でそれぞれ 29.9%および 33.7%で、K 区よりもそれぞれ 20.8%および 17.0%低く、液相率は 48.9%および 61.1%と K 区よりもそれぞれ 17.4%および 29.6%高かった。

土壌水分張力

灌水直前の土壌水分張力は K 区で大きな変動を示し、2 kPa から 26.3 kPa までの間で変化した (図 2-3)。一方、P 区や R 区では変動幅は小さく、かつ土壌水分張力が低めに推移し、P 区では 1.5 kPa から 2.3 kPa、R 区では 1.2 kPa から 3.8 kPa の間で推移した。

SPAD

SPAD は播種後 61 日においては P 区で最も高く、次いで R 区、K 区の順となり、それぞれ 28.6、26.0 および 24.4 であった (図 2-4)。K 区と P 区の間には有意差が認められた。播種後 124 日の SPAD は全試験区で播種後 61 日よりも低下し、K 区では枯死も認められたが、R 区では比較的緩やかな低下であった。その結果、SPAD は R 区で最も高い 16.1 を示し、P 区の 10.3、K 区の 1.4 と続き、各試験区間には有意差が認められた。播種後 149 日の収穫時には K 区では枯死が進み、緑色葉は残らず、SPAD は R 区、P 区、K 区の順にそれぞれ 12.4、2.8 および 0 となり、R 区とそれ以外の試験区との間に有意差が認められた。

主根長

主根長は K 区では P 区や R 区よりも有意に長く 162.0 mm であり、P 区や R 区ではそれぞれ 102.2 mm および 108.6 mm であった (図 2-5A, 図 2-6)。全ての試験区で、ISO-17217-1 で示されている 1 年生苗 (Qualified) の基準である 10 cm を上回った (ISO17217-1, 2014)。

根径

最大根径は R 区では P 区および K 区よりも有意に太く、6.59 mm であり P 区や K 区ではそれぞれ 4.25 および 3.97 mm であった (図 2-5B, 図 2-6)。

根の新鮮重、乾物重および乾物率

根新鮮重は R 区でのみ有意に重く 0.91 g を示し、P 区や K 区はそれぞれ 0.29 g および 0.28

gと同程度であった(図 2-5C). R区でのみ ISO-17217-1 で示されている1年生苗(Qualified)の基準である0.5 gを上回ったが, 全試験区において甲参の重量基準値(0.94 g)には満たなかった(ISO17217-1, 2014; RDA, 2019).

根乾物重の傾向は根新鮮重と同じであり, R区, P区, K区の順にそれぞれ0.226 g, 0.066 gおよび0.067 gであった(図 2-5D). 根の乾物率は試験区間で大差なく, R区, P区, K区の順にそれぞれ24.8%, 22.8%および24.1%であった(図 2-5E).

2.3.4. 考察

培地充填時の気相率はK区で高く, 鹿沼土細粒は本実験で用いた他の培地よりも通気性に優れていたと考えられる. 一方, P区やR区では気相率が低く液相率が高かったことや土壤水分張力が常に低く推移したことから, ピートとパーライトの混合培地やロックウール細粒綿は鹿沼土よりも通気性に劣り, 保水性に優れていたと考えられる.

鹿沼土細粒を用いてPPFD $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の条件下で養液栽培し, 0.5 g程度の根を得られたとの報告がある(松本ら, 2012). また, 鹿沼土細粒を用いて1年生オタネニンジン(オタネニンジン)を養液栽培したところ, PPFD $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では約140日, PPFD $70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では約170日で約半数の地上部が枯死し, その時の根の乾物重は約0.1 gであったとの報告がある(Kuronuma et al., 2020). しかし, 本実験の条件下(PPFD $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)では, K区のSPADは播種後124日で1.4と枯死に近い値を示し, さらに播種後149日におけるK区の根の新鮮重は0.28 g, 乾物重は0.067 gであり, 鹿沼土細粒を用いたにもかかわらず既報よりも枯死が早く, 根は小さかった.

P区では根新鮮重が播種後149日で0.29 gであった. しかし既報ではピートとパーライトの混合培地を用いた養液栽培によって0.5 g以上の1年生苗が得られた例があり, 温室において土壤水分張力が7 kPaに達した際にEC 1.0 dS m^{-1} の培養液を給液する方法で播種後197日に平均0.93 gの根が得られた(Park et al., 2020). また, 底面給液法ではEC 0.85 dS m^{-1} の培養液を用いてPFALで20週間栽培し, 最大で平均0.5 g程度の根が得られた(Lee et al., 2021). 本実験のK区やP区における根の新鮮重および乾物重は, 同様の培地を用いたにもかかわらず, 過去の報告よりも小さかった. 本実験の結果から, 根の肥大は培地の種類による影響を受けることが明らかになったが, 各培地における根の肥大は, 給液方法等の栽培条件や環境条件によっても大きく影響されると考えられる.

ISO-17217-1では1年生苗の根新鮮重および主根長の基準として, それぞれ0.5 gおよび10 cmを超えることを定めている(ISO17217-1, 2014). 本実験においてこれらの基準を満たしたのはR区のみであり, 根新鮮重は0.91 gに達したことから, ロックウール細粒綿は本実験の栽培方法においては鹿沼土細粒やピートとパーライトの混合培地よりも優れた培地であると考えられる. 甲参に相当する0.94 gにはR区においても届かなかったものの, R区では収穫時の播種後149日におけるSPADは12.4であった. SPADはクロロフィル含量と

正の相関を示すことから (Wood et al., 1993), R 区の葉には収穫時にクロロフィルが残存していたと考えられ, 栽培期間を延長すればより大きな苗を得られた可能性がある.

R 区の乾物率は他の試験区とはほぼ同じであり, 乾物重は 0.226 g で最も重く, 根に同化産物を多く蓄積して根径が増大していた. ロックウールでは養分の吸着や溶出がほとんどないことが知られており (一般社団法人日本施設園芸協会, 2015), 土壤水分張力の推移からは培地中の水分は常に十分であったと推察され, 培養液の養分バランスが損なわれずに供給されやすかったことが SPAD の維持や根の肥大に寄与した一因かもしれない. P 区では R 区と同程度かわずかに低い土壤水分張力で推移していたが, 肥大は R 区より劣り乾物重は 0.066 g であった. ピートは有機培地であり, 養分の吸着や溶出が R 区よりも生じやすいため, そのことが悪影響を及ぼしたのかもしれない. また, 本実験では培地充填時の三相分布を測定したが, 実際の栽培中の三相分布の推移は測定していない. 栽培中の三相分布が異なり, P 区では R 区よりも気相率が低く, 加湿な条件となり根の生育が停滞した可能性もある.

主根長は R 区では K 区よりも短く, P 区と同程度の 102.2 mm であった. 一般的に, 土壤中の酸素濃度が低いと根の伸長は停止する. また, ニンジン (*Daucus carota*) の湛液水耕では通気時間が長いほど培養液中の溶存酸素濃度が高く, 主根肥大部が長くなるとの報告がある (寺林ら, 2008). R 区や P 区の培地中の気相率が低く, 液相率が高かったことが, 主根が短かった原因だと考えられる. また, 給液頻度は培地中の酸素濃度や根の養分吸収速度に影響を及ぼし, 適切な頻度での給液は生育を促進することから (Balliu et al., 2021), 土壤水分張力が K 区では大きく変動した一方で, R 区や P 区では常に低く推移したことも主根長に影響した可能性がある. 今後, ロックウール細粒綿においても培地中の酸素濃度を高める処理, 例えば通気の有無, 給液の方法および頻度を検討したり, 最適な培地の水分含量を検討することで, 肥大しつつも更に長い根を得られるかもしれない.

以上より, 本実験では, 2.3.2 で示した栽培条件のもとではロックウール細粒綿を用いて播種後 149 日以上養液栽培することで, 1 年生苗において国際規格を満たす苗を得られることを明らかにした.

表 2-1 各試験区における培地の三相分布

Depth (cm)	Treatment	Ratio (%)					
		Solid		Liquid		Gas	
5-10	Kanuma (K)	16.5	± 1.0	28.4	± 2.1	55.1	± 1.2
	Peat+Perlite (P)	15.4	± 2.2	35.9	± 5.2	48.8	± 7.4
	Rockwool (R)	3.8	± 0.8	53.8	± 7.4	42.4	± 8.2
10-15	Kanuma (K)	17.7	± 2.7	31.5	± 2.8	50.7	± 0.1
	Peat+Perlite (P)	21.1	± 1.1	48.9	± 1.6	29.9	± 2.7
	Rockwool (R)	5.3	± 0.2	61.1	± 3.9	33.7	± 4.0

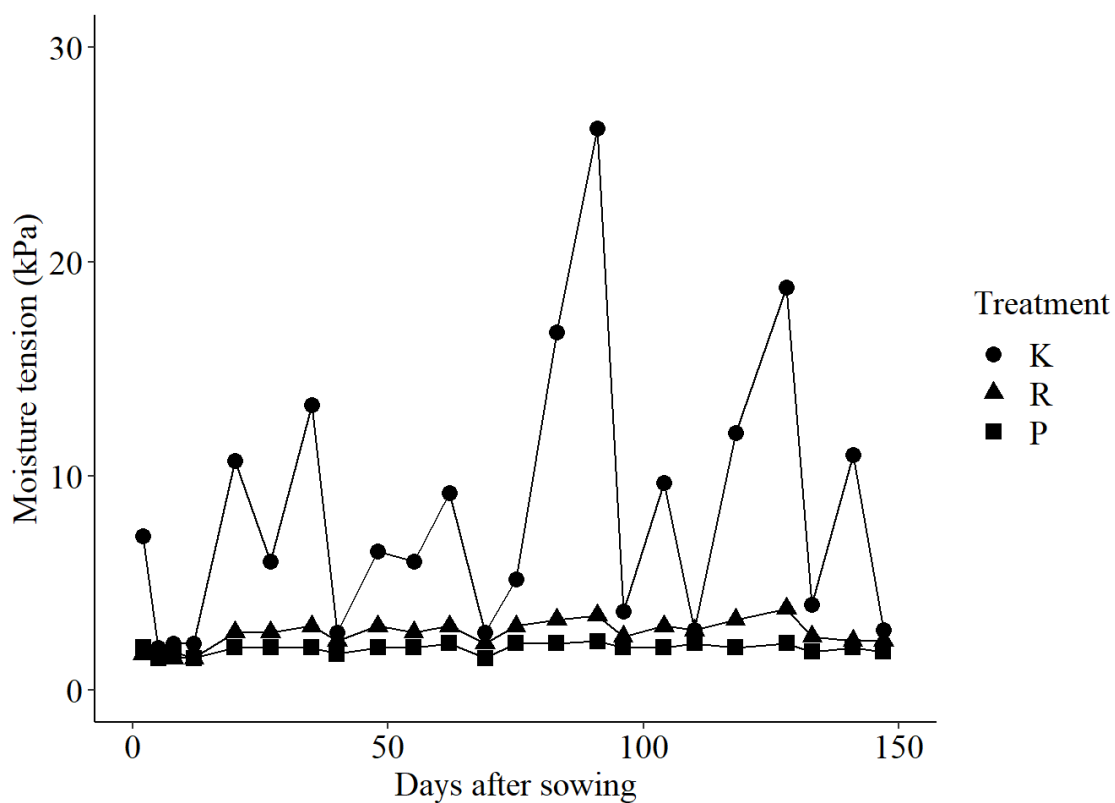


図 2-3 各試験区の灌水直前における土壤水分張力の推移

Kは鹿沼土のみ、Pはピートとパーライトの混合培地、Rはロックウール細粒綿のみを培地として充填した試験区を表す。3反復の平均値。

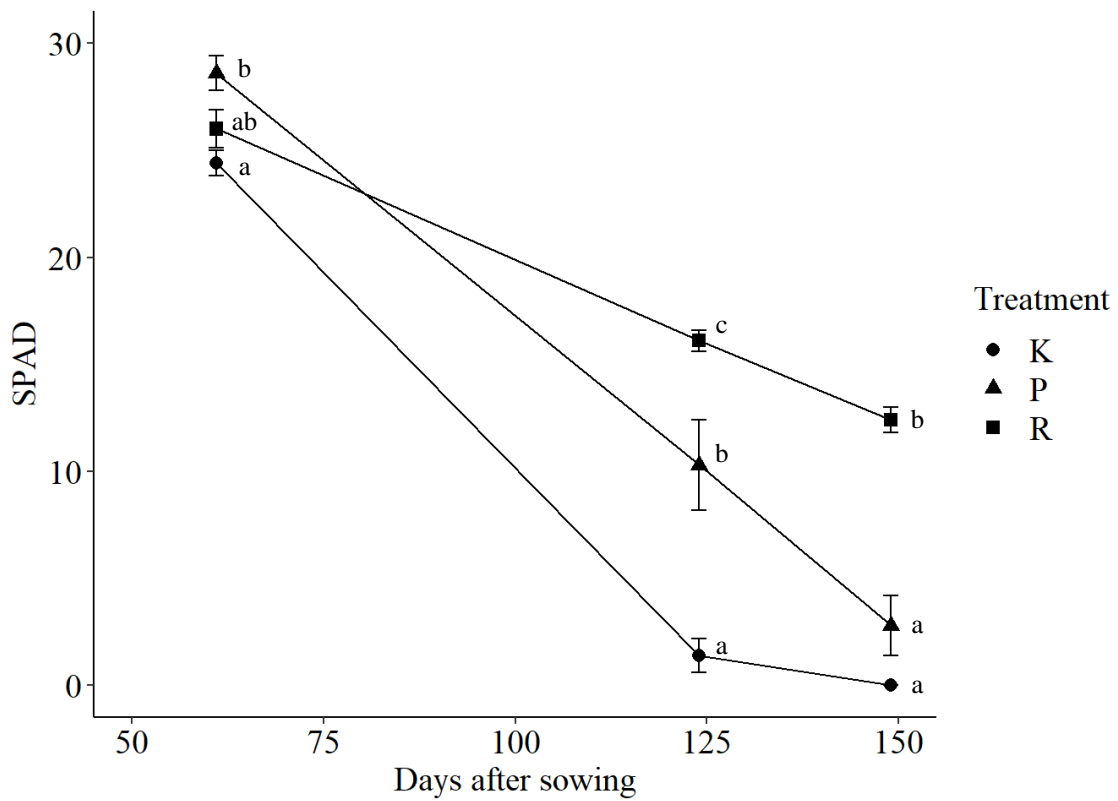


図 2-4 異なる培地における SPAD の推移

K は鹿沼土のみ、P はピートとパーライトの混合培地、R はロックウール細粒綿のみを培地として充填した試験区を表す。エラーバーは標準誤差を示す (n = 7)。同一の播種後日数において異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)。

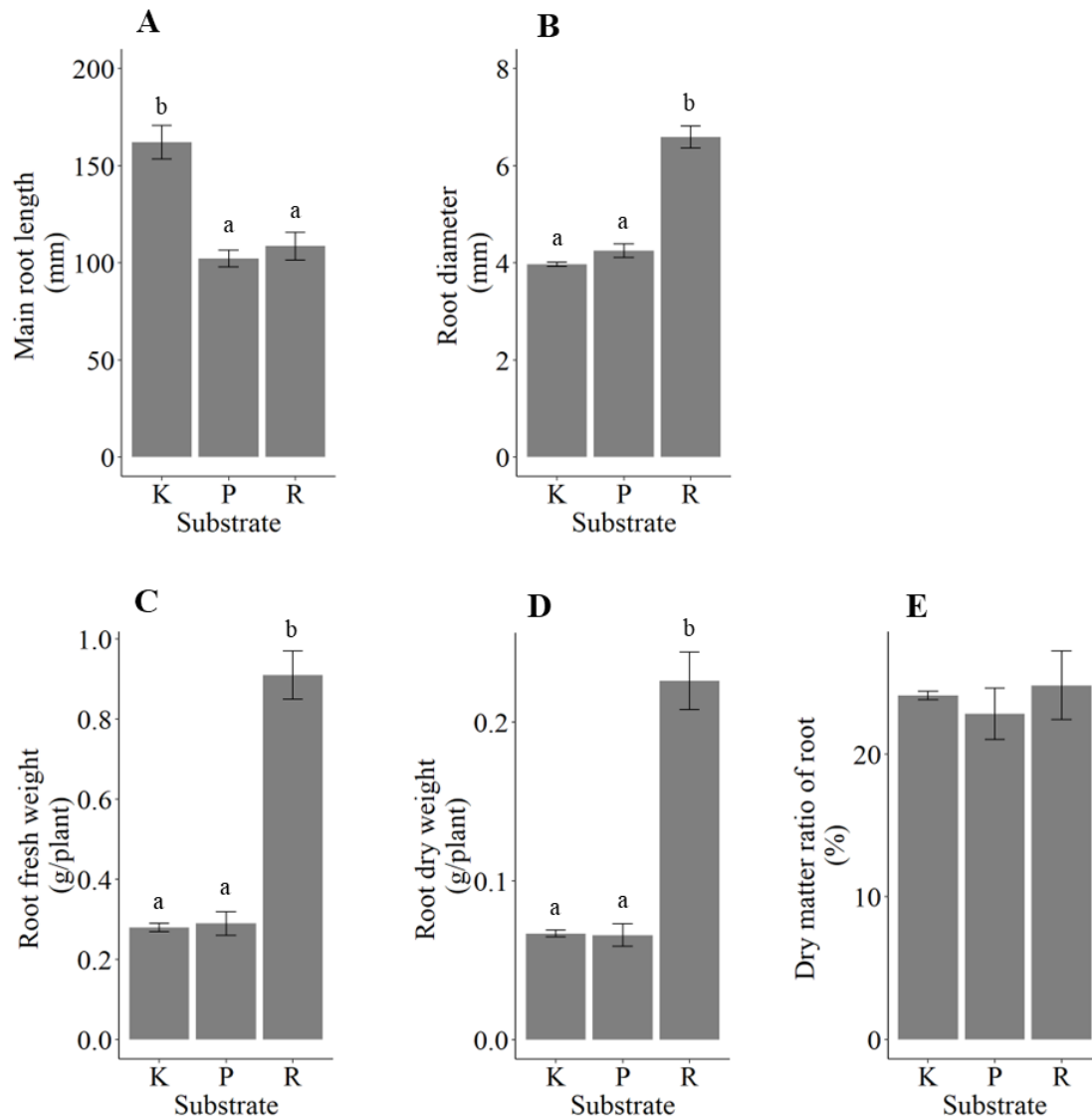


図 2-5 異なる培地における収穫時調査結果

A から E の図は、順に主根長、最大根径、根新鮮重、根乾物重および根の乾物率を表す。横軸の項目のうち、K は鹿沼土のみ、P はピートとパーライトの混合培地、R はロックウール細粒綿のみを培地として充填した試験区を表す。A から D の図におけるエラーバーは標準誤差、E の図におけるエラーバーは標準偏差を示す (n=7)。異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)。



図 2-6 各試験区の収穫物

左から3本ずつ、それぞれK区、P区およびR区の収穫物。Kは鹿沼土のみ、Pはピートとパーライトの混合培地、Rはロックウール細粒綿のみを培地として充填したことを表す。

2.4 気温と培養液濃度の影響

2.4.1 材料および方法

試験区に共通の材料および方法

基本的な材料および方法は 2.2 の通りとした。2019 年 8 月 1 日から芽切り処理した種子を用いた。2021 年 1 月 21 日に播種前殺菌を行い、2021 年 1 月 27 日に播種した。ロックウール細粒綿をロングポリポットに充填し、開裂種子を 1 ポットに 16 粒ずつ、深さ 2 cm で播種した。栽培はグロースチャンバー (MLR-352H, パナソニックヘルスケア株式会社) で行った。気温は 24 時間一定とし、均一な発芽と初期生育を得るために播種後 34 日まで 15°C に設定した後、試験区によって 20°C または 25°C になるまで 1 日に 1°C ずつ昇温した。相対湿度は 70% とした。光源には蛍光灯を用い、明期 14 時間、暗期 10 時間に設定した。光源点灯時のポット表面付近における PPF_D を分光色彩照度計 (C-7000, 株式会社セコニック) で測定した結果、平均±標準偏差は $100 \pm 20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。試験区に応じた濃度の培養液を 1 週間に 1 回、1 ポット 300 mL ずつ上面から手灌水し、排液は全て廃棄した。播種後 26 日に培地表面に長さ 3 cm、幅 5 mm 程度の黒色の不織布を敷き詰めてマルチングした。播種後 33 日に 1 ポットあたり 6 株となるように地際部で切除して間引いた。播種後 187 日に収穫した。

試験区

栽培時の気温および培養液濃度を因子とし、気温は 20°C または 25°C の 2 水準、培養液濃度は 0, 1/16 または 1/8 単位の 3 水準とした。2 因子を組み合わせて 6 試験区を設け、1 ポットを 1 反復とみなして 1 試験区につき 6 反復を設けた。気温 1 水準につき 1 台のグロースチャンバーとし、グロースチャンバー内には培養液濃度 3 水準を乱塊法で配置した。実際には気温はブロック化できていなかったが、グロースチャンバー内の配置は 2 台のグロースチャンバー間で同一としたため、ブロック化したものとみなした。

測定項目

昇温完了後のグロースチャンバー内の気温および湿度を 1 時間間隔でおんどとり (TR-72wf, 株式会社ティアンドデイ製) で記録した。SPAD を播種後 78 日, 103 日, 131 日, 187 日に 1 株ずつ測定した。収穫後に葉, 上胚軸および根に切り分け, 1 株ずつ各部位の新鮮重および乾物重を測定した。各測定項目は, 測定日ごとに 1 反復ずつ平均値を求めた後, 6 反復で解析した。二元配置分散分析および Tukey-Kramer 検定を行った。

2.4.2 結果

栽培中の気温と湿度

20°C または 25°C に設定したグロースチャンバー内において, 昇温が完了してからの平均

気温はそれぞれ 19.8℃または 25.1℃であり、平均湿度は 68.4%または 66.4%であった。

SPAD

SPAD の結果を二元配置分散分析したところ、播種後 78 日および 103 日では気温と培養液濃度の効果は有意であったが、交互作用は検出されなかった (表 2-2)。一方、播種後 131 日、160 日および 187 日では、気温と培養液濃度の効果に加え、交互作用も有意であった。いずれの播種後日数においても、気温 25℃は SPAD を低下させ、培養液濃度は高いほど SPAD を増加させた。

Tukey-Kramer 検定の結果、気温に関わらず培養液濃度が 0 単位の試験区で SPAD は低い傾向にあり、播種後 103 日以降は有意に低く推移した (図 2-7)。試験区間に有意差はなかったものの、播種後 160 日までは 1/16 単位よりも 1/8 単位の培養液濃度において SPAD が高い傾向にあった。培養液濃度が 0 単位の試験区を除けば、気温 25℃よりも 20℃の試験区で常に SPAD が高かったが、播種後 187 日の 1/8 単位の培養液を与えた場合を除き、有意差はなかった。

部位別の新鮮重および乾物重

二元配置分散分析の結果、気温の効果は葉 ($p < 0.01$) や根 ($p < 0.001$) の新鮮重および上胚軸 ($p < 0.05$) や根の乾物重 ($p < 0.001$) において有意であり、培養液濃度の効果は各部位の新鮮重および乾物重において有意であった ($p < 0.001$) (表 2-3)。気温と培養液濃度の交互作用は、葉の新鮮重 ($p < 0.01$) と乾物重 ($p < 0.05$)、上胚軸の新鮮重 ($p < 0.01$) および根の新鮮重 ($p < 0.001$) と乾物重 ($p < 0.001$) で有意であった。気温の効果は、葉と根においては気温 25℃よりも 20℃で重量が増加したことによるものであり、上胚軸においては気温 25℃よりも 20℃で重量が減少したことによるものであった。培養液濃度の効果は、培養液濃度の増加に応じて重量が増加したことによるものであった。

Tukey-Kramer 検定の結果、全ての部位において培養液濃度 0 単位では気温にかかわらず、他の濃度の培養液を与えた場合よりも全ての部位において有意に低い新鮮重となった (図 2-8)。1/16 単位または 1/8 単位の培養液を与えた場合には、気温 20℃の条件では根のみにおいて、また、気温 25℃の条件では葉および根において、新鮮重は培養液濃度の高まりに応じて有意に高い値を示した。1/16 単位の培養液を与えた場合には、葉および根において 25℃よりも 20℃で有意に高い新鮮重となり、1/8 単位の培養液を与えた場合には、根において 25℃よりも 20℃で有意に高い新鮮重を示した。根の新鮮重は気温 20℃で培養液濃度 1/16 または 1/8 単位を与えた場合でのみ、甲参の重量基準 (0.94 g) を超え、それぞれ 1.03 g および 1.17 g となった。また、培養液濃度 0 単位の試験区を除く 4 試験区においては、ISO-17217-1 で示されている 1 年生苗の重量基準 (0.5 g) を上回った。

乾物重の傾向は新鮮重に類似しており、培養液濃度 0 単位では気温にかかわらず、他の濃度の培養液を与えた場合よりも全ての部位において有意に低かった (図 2-9)。ただし、培

養液濃度の高まりに応じた乾物重の増加は 20℃では葉のみで、25℃では葉、上胚軸および根で認められた。また、同じ濃度の培養液を与えた条件では、気温による有意差は 1/16 単位または 1/8 単位の培養液を与えた根においてのみ認められた。

2.4.3 考察

設定した気温および湿度はグロースチャンバー内にほぼ正確に反映され、各グロースチャンバー内の相対湿度の差は平均で 2% しかなかった。これらのグロースチャンバー間の比較によって、本実験の目的の一つである気温による影響は確認できると考えられる。

SPAD の二元配置分散分析では気温の効果が有意であったことから、25℃では播種後 78 日の時点で葉の老化が 20℃よりも早く進行していたと考えられる。生育適温を超える高気温は葉のクロロフィル含量を減少させ、光合成速度を低下させ、落葉を早める。オタネニンジンには高温に弱いとされ、生育適温は 21-25℃程度とされる (Lee et al., 2010)。本実験では気温を生育適温の範囲に近い 20℃および 25℃に設定し、一定条件下での生育適温を検討した。オタネニンジンにおける光合成速度の適温は 15℃から 20℃付近であり、個葉の光合成速度は 20℃よりも高い気温で低下するとの報告がある (Hyun et al., 1993; Lee, 2002; Qin et al., 2011)。本実験において SPAD や根乾物重は気温 20℃で高い値を示す傾向にあったことから、一定条件下での栽培では、根の肥大は光合成速度の傾向に一致することが示唆された。25℃では低い光合成速度と地上部の老化の進行が同時に起こり、肥大が劣ったと考えられる。本実験では一定の気温を設定したが、同じ平均気温でも昼夜温較差によって生育や SPAD に影響を及ぼす場合があるため (Liu et al., 2019)、苗の生育をさらに促進する条件を明らかにするうえでは、日内較差を含めたより詳細な気温の制御について検討の余地がある。

気温にかかわらず、0 単位の培養液を与えた場合には、SPAD や各部位の乾物重は 1/16 単位または 1/8 単位の培養液を与えた試験区よりも有意に低かった。SPAD はクロロフィル含量や葉身窒素含量と正に相関する (Wood et al., 1993)。窒素欠乏では、光合成速度が大きく低下し、次いでクロロフィルが分解され、葉寿命が短くなり、植物体の生育は大きく抑制されることから (Agüera & de la Haba, 2018)、0 単位の培養液を与えた試験区では少なくとも窒素は欠乏していたと考えられる。播種後 131 日以降の SPAD や根乾物重の結果において、気温と培養液濃度の交互作用が有意であり、0 単位の培養液条件では気温の影響は認められなかったことは、気温の影響よりも窒素を始めとした必須元素の欠乏による生育抑制の影響が大きいことを示唆している。

同じ気温においては、葉の乾物重は 1/16 単位よりも 1/8 単位の培養液を与えた試験区において有意に高く、25℃では根においても同様の傾向が認められたことから、オタネニンジンの生育に対しては、温度に関わらず 1/16 単位の培養液濃度では不十分であり、1/8 単位以上の濃度が適すると考えられる。

以上より、本実験では養液栽培において 1 年生オタネニンジン苗を肥大させる条件とし

て、生育適温とされる温度帯の中でも気温は25℃よりも20℃が適することや、1/16 単位以下の培養液濃度は不適であることを明らかにした。

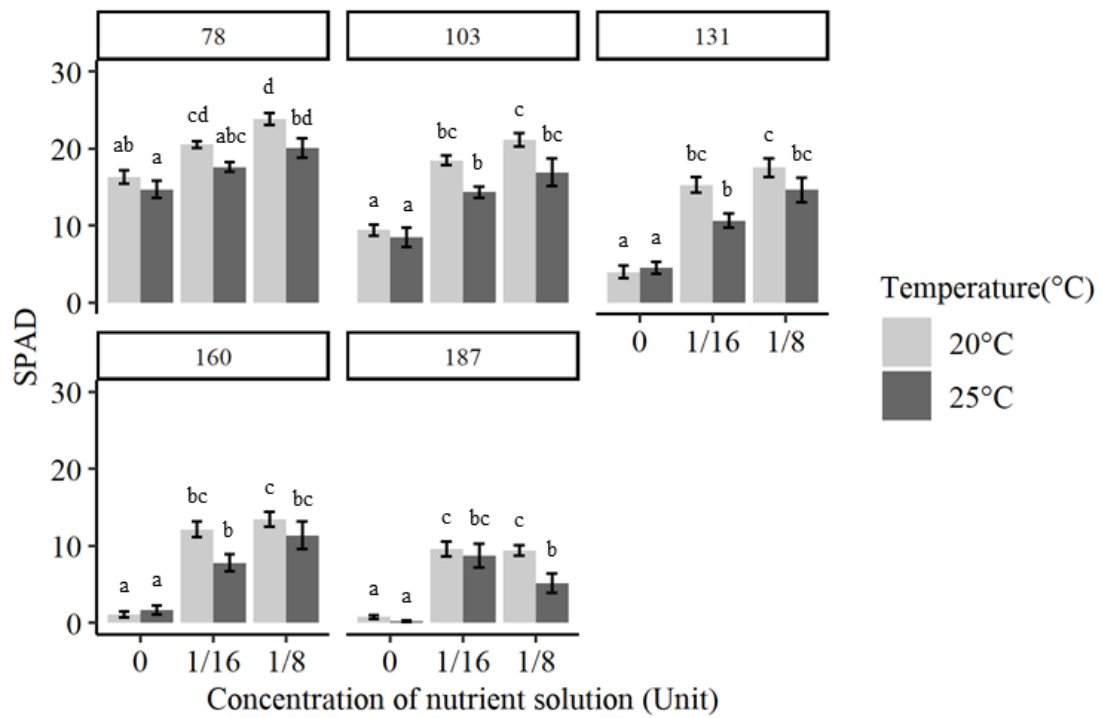


図 2-7 異なる栽培気温と培養液濃度における SPAD の推移

棒グラフ上部のカラムは播種後日数を示す。エラーバーは標準誤差を示す (n=6)。同一播種後日数において異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)。

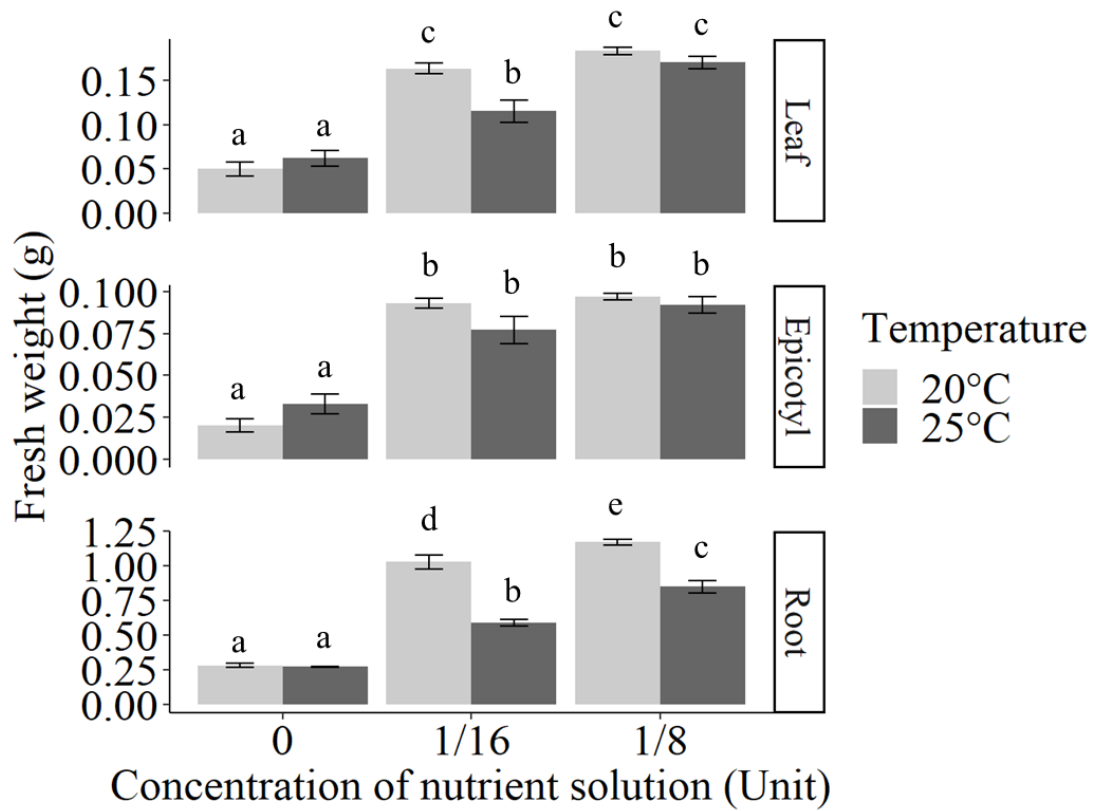


図 2-8 異なる栽培気温と培養液濃度における部位別の新鮮重（播種後 187 日）
 棒グラフの右側のカラムは測定対象部位を示し，Leaf は葉，Epicotyl は上胚軸，Root は根を表す．エラーバーは標準誤差を示す（ $n=6$ ）．同一の測定対象部位における異なるアルファベット間に有意差あり（ $p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定）．

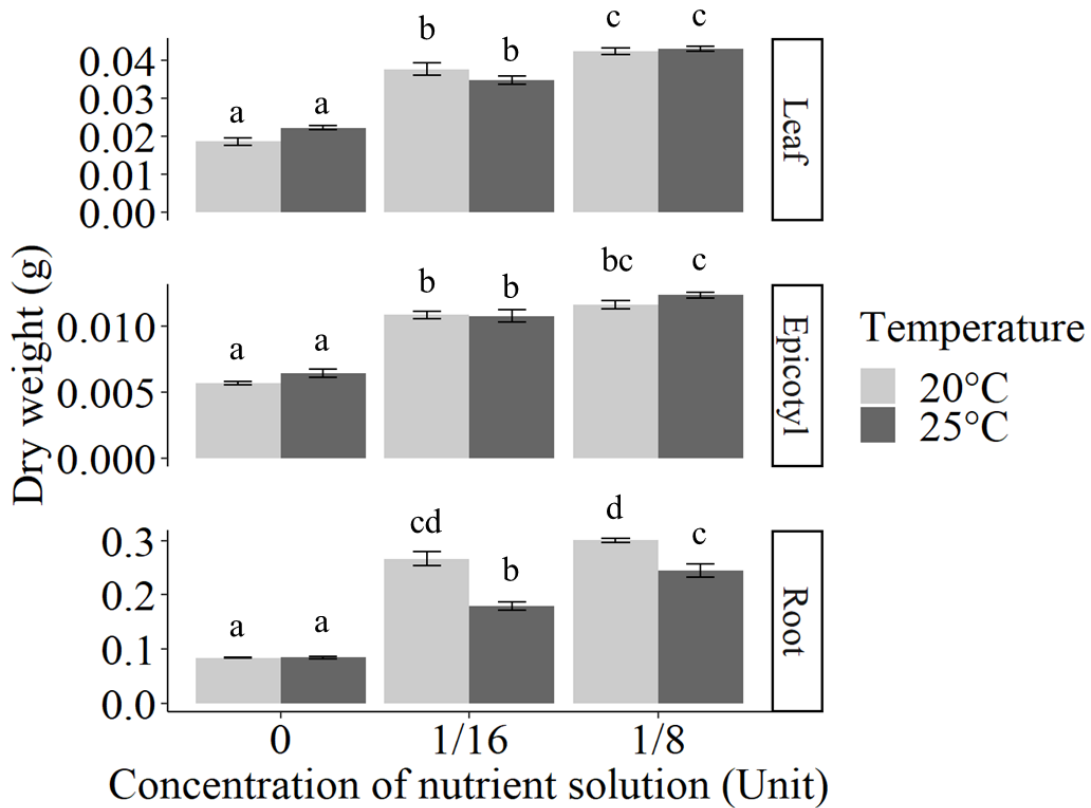


図 2-9 異なる栽培気温と培養液濃度における部位別の乾物重（播種後 187 日）

棒グラフの右側のカラムは測定対象部位を示し、Leaf は葉、Epicotyl は上胚軸、Root は根を表す。エラーバーは標準誤差を示す (n=6)。同一の測定対象部位における異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)。

表 2-2 SPAD に対する栽培気温と培養液濃度の効果および二元配置分散分析結果

Factors	Levels	SPAD				
		DAS 78	DAS 103	DAS 131	DAS 160	DAS 187
(1) Temperature	20	20.2	16.3	12.3	8.9	6.6
(C°)	25	17.4	13.2	9.9	7.0	4.7
(2) Nutrient	0	15.5	9.0	4.2	1.4	0.5
(Unit)	1/16	19.1	16.4	13.0	10.0	7.4
	1/8	22.0	19.0	16.1	12.5	9.1
ANOVA	(1)	***	***	***	**	**
	(2)	***	***	***	***	***
	(1)x(2)	NS	NS	**	**	*

DAS は播種後日数を示し, Factors のうち Temperature は気温, Nutrient は培養液濃度を示す.
 NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

表 2-3 新鮮重と乾物重に対する栽培気温と培養液濃度の効果および二元配置分散分析結果

Factors	Levels	Fresh weight (g / plant)			Dry weight (g / plant)		
		Leaf	Epicotyl	Root	Leaf	Epicotyl	Root
(1) Temperature	20	0.13	0.07	0.83	0.0329	0.0094	0.2170
(C°)	25	0.12	0.07	0.57	0.0334	0.0099	0.1701
(2) Nutrient	0	0.06	0.03	0.28	0.0204	0.0060	0.0846
(Unit)	1/16	0.14	0.09	0.81	0.0363	0.0108	0.2231
	1/8	0.18	0.09	1.01	0.0427	0.0120	0.2730
ANOVA	(1)	**	NS	***	NS	*	***
	(2)	***	***	***	***	***	***
	(1)x(2)	**	**	***	*	NS	***

DAS は播種後日数を示し, Factors のうち Temperature は気温, Nutrient は培養液濃度を示す.
NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

2.5 培地温の影響

2.5.1 材料および方法

試験区に共通の材料および方法

基本的な材料および方法は 2.2 の通りとした。2019 年 8 月 1 日から芽切り処理した種子を用いた。2021 年 5 月 11 日に播種前殺菌を行い、2021 年 5 月 25 日にバーミキュライトを充填したポリポットへ 1 ポットに 30 粒ずつ、深さ 2 cm で開裂種子を播種した。栽培室内で栽培し、PPFD は $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とした。プラスチックコンテナ（内寸 44 cm×30 cm×高さ 26 cm）に培養液を 30 L 入れてエアポンプ（200SB, ジェックス株式会社）で連続通気して湛液水耕装置とし、1 試験区に 3 つずつ装置を設けた。播種後 16 日に、1 つの装置につき 50 株ずつ、株間 4.5 cm として千鳥状に本葉展開中の株を定植した。播種後 24 日に萎れた株を取り除き、1 つの装置につき 2 から 8 株を補植した。培養液は 1/8 単位とし、試験中培養液の交換は行わなかった。播種後 55, 87, 119 および 153 日に 1 つの装置につき 5 株をランダムに収穫（1 試験区につき 15 株）し、調査した。

試験区

栽培時の培養液温を因子とし、20°C または 25°C の 2 試験区（20°C 区および 25°C 区）を設けた。培養液温は、培養液中に観賞魚用ヒーター（SH220, ジェックス株式会社）を投入して調節した。

測定項目

各試験区のうち 1 反復における気温および各水耕装置内の培養液温を 1 時間間隔でおんどとり（TR-72wf, 株式会社ティアンドデイ製）で記録した。各収穫日に 1 株ずつ SPAD を測定し、葉、上胚軸および根に切り分け、各部位の新鮮重を測定した後、乾物重を測定した。各収穫日において 1 株を 1 反復として 15 反復で解析し、Welch の t 検定を行った。

2.5.2 結果

栽培中の気温と培養液温

平均気温は 20°C 区および 25°C 区においてそれぞれ 19°C および 20.1°C であり、平均培養液温は 19.5°C および 24.7°C であった。

SPAD

SPAD は播種後日数とともに低下し、播種後 55 日では 20°C 区および 25°C 区においてそれぞれ 32.0 および 33.5 であったが、播種後 87 日には 25.7 および 25.3 と低下し、最終的に播種後 153 日には 11.5 および 10.1 となった（図 2-10）。いずれの収穫日においても試験区間で有意差はみとめられなかった。

根長

根長は播種後 55 日から 87 日にかけて長くなり、20°C区と 25°C区でそれぞれ 86 mm および 93 mm となったが、その後は一定の値であった (図 2-11)。いずれの収穫日においても試験区間で有意差はみとめられなかった。

部位別の新鮮重および乾物重

新鮮重および乾物重ともに、葉や上胚軸は播種後 55 日以降変化しなかったが、根は播種後 119 日まで肥大し続け、根新鮮重は 20°C区と 25°C区でそれぞれ 0.70 g および 0.64 g、根乾物重は 0.1800 g および 0.1713 g となった (図 2-12)。新鮮重では播種後 153 日の葉および上胚軸においてのみ試験区間の有意差がみとめられたが、その差は葉および上胚軸でそれぞれ 0.01 g および 0.01 g 未満であった。乾物重では全ての収穫日および部位において、試験区間で有意差はみとめられなかった (図 2-13)。

2.5.3 考察

オタネニンジンの養液栽培に適した気温は、本章の 2.4 において 25°Cよりも 20°Cが適することが明らかとなったが、グロースチャンバーでの試験であったため、気温だけでなく培地温も試験区間で大きく異なっていたと推察される。そこで、本実験では培地温が 1 年生オタネニンジンの生育に及ぼす影響を明らかにする目的で、気温 20°Cのもとで培養液温のみを 20°Cと 25°Cの 2 通りに設定し、その生育を比較した。

試験区間の気温の平均気温の差は 1.1°Cあったものの、各区 1 点のみで測定した値であったこと、全ての装置上の空間は区切ることなく共通であったこと、および装置に反復を設けていたことから、実質的に気温には試験区間で差はなかったと思われる。一方、培地である培養液の平均温度には 5.2°Cの差があり、試験区に応じた培養液温を設定できていた。

本実験では SPAD、根長および各部位の乾物重において、播種後日数にかかわらず有意差は認められず、培地温の影響は確認できなかった。播種後 153 日における 25°C区の葉や上胚軸の新鮮重は 20°C区よりも有意に小さかったが、その差は葉および上胚軸で 0.01 g 以下と極めて小さく、実質的な差はなかったといえる。したがって、本実験の気温 20°Cという条件下では、培地温は生育に大きな影響を及ぼさなかったと考えられる。

これは、本章 2.4 において気温 25°Cでは 20°Cよりも根乾物重が有意に低下したことは対照的である。気温 (葉温) が 20°Cから 25°Cに増加すると、オタネニンジンの光合成速度は約 30%低下した例がある (Hyun et al., 1993)。一方、根の呼吸量は 20°Cから 25°Cにかけて約 40%増加したとの報告がある (Sung-Woo & Kwang-Soo, 1979)。光合成速度や呼吸量のみで植物の生長を論じることはできないが、20~25°Cの範囲では、高地温による呼吸量の増加よりも、高気温による光合成速度の低下や葉の老化の進行の方が、同化産物の蓄積を妨げるうえで影響が大きい可能性がある。

本実験および本章 2.4 の結果からは, 20°Cから 25°Cの範囲では, 培地温よりも気温を重視して栽培することが根の肥大に結び付く可能性が示唆された.

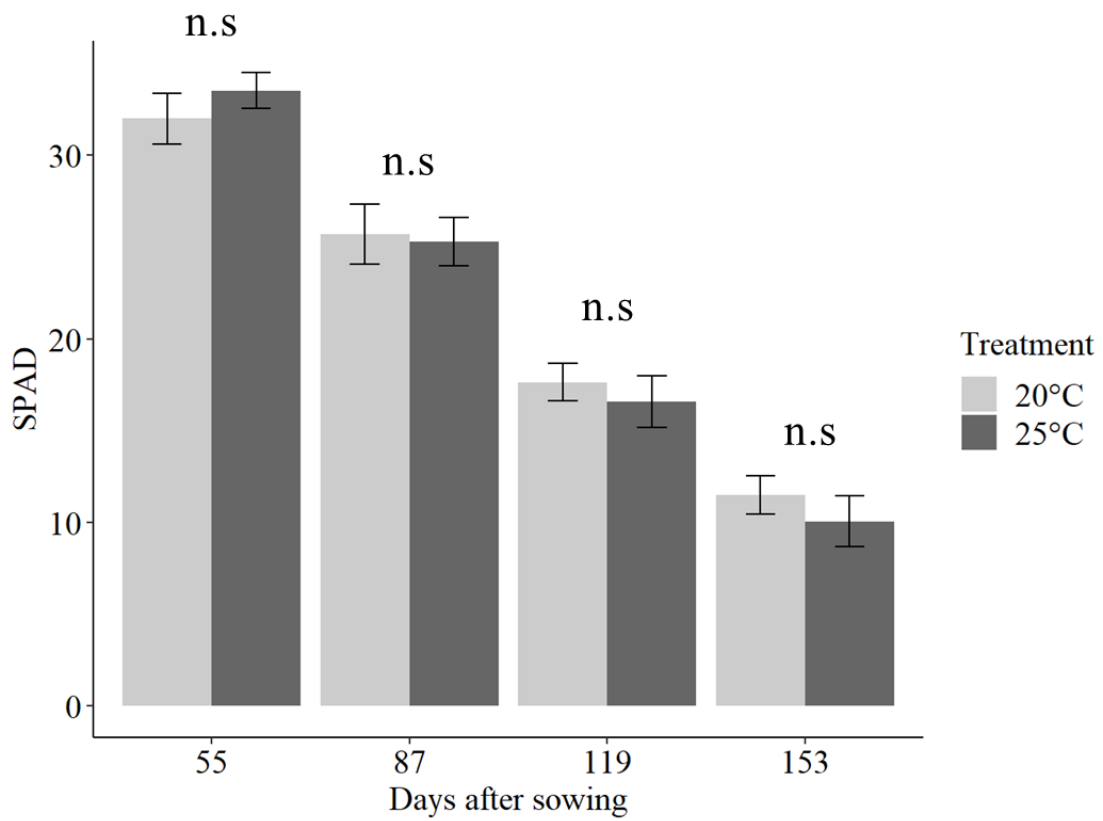


図 2-10 異なる培地温における SPAD の推移

棒グラフの上側のカラムは播種後日数を示す。エラーバーは標準誤差を示す (n = 15)。

同一の播種後日数における試験区間において n.s は有意差なし (Welch の t 検定, $p < 0.05$)。

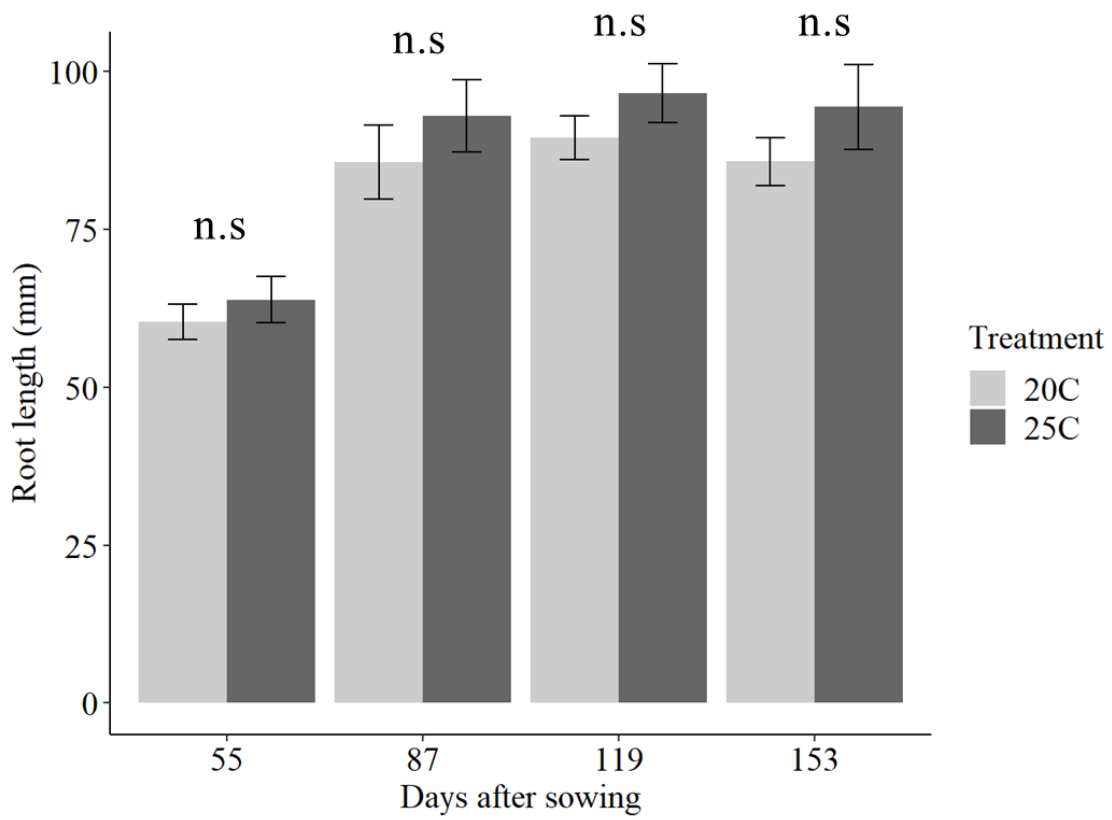


図 2-11 異なる培地温における根長の推移

棒グラフの上側のカラムは播種後日数を示す。エラーバーは標準誤差を示す (n = 15)。

同一の播種後日数における試験区間において n.s は有意差なし (Welch の t 検定, $p < 0.05$)。

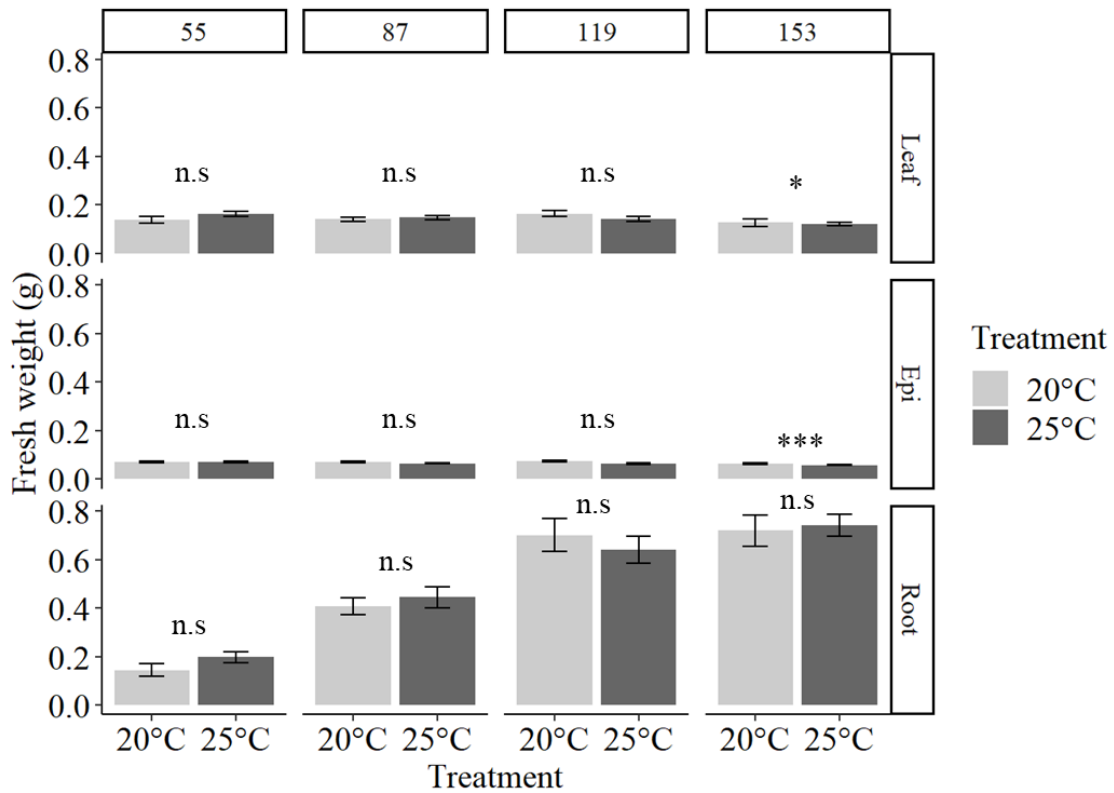


図 2-12 異なる培地温における部位別の新鮮重

棒グラフの上側のカラムは播種後日数を示す。棒グラフの右側のカラムは測定対象部位を示し、Leafは葉、Epicotylは上胚軸、Rootは根を表す。エラーバーは標準誤差を示す (n = 15)。同一の播種後日数における試験区間において n.s は有意差なし、*および***はそれぞれ $p < 0.05$, $p < 0.001$ で有意差あり (Welch の t 検定, $p < 0.05$)。

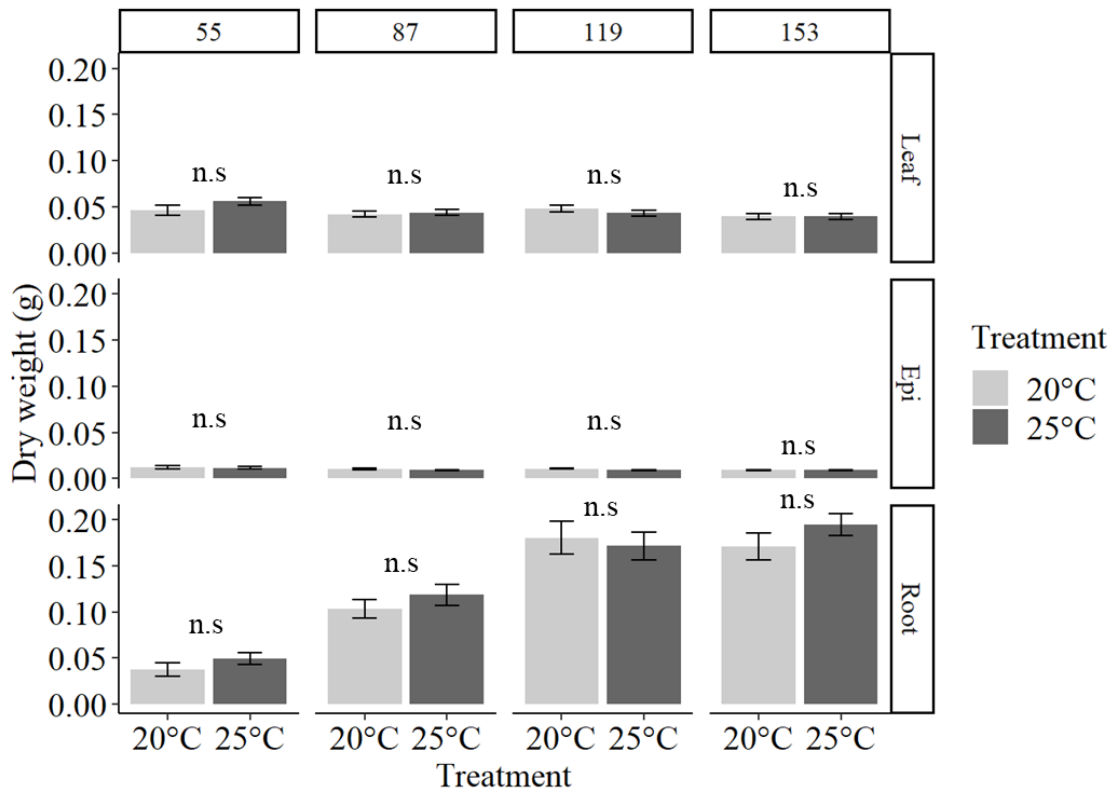


図 2-13 異なる培地温における部位別の乾物重

棒グラフの上側のカラムは播種後日数を示す。棒グラフの右側のカラムは測定対象部位を示し、Leaf は葉、Epicotyl は上胚軸、Root は根を表す。エラーバーは標準誤差を示す (n = 15)。同一の播種後日数における試験区間において n.s は有意差なし、*および***はそれぞれ $p < 0.05$, $p < 0.001$ で有意差あり (Welch の t 検定, $p < 0.05$)。

2.6 光強度および培養液濃度の影響

2.6.1 材料および方法

試験区に共通の材料および方法

基本的な材料および方法は 2.2 の通りとした。2019 年 8 月 1 日から芽切り処理した種子を用いた。2020 年 10 月 30 日に播種前処理を開始し、2020 年 11 月 5 日に播種した。ロックウール細粒綿をロングポリポットに充填し、栽培室で栽培した。各試験区に応じた光強度となるように LED ランプの本数および方向を調節し、開裂種子を 1 ポットに 16 粒ずつ、深さ 2 cm で播種した。培養液は各試験区に応じた濃度に調製し、毎週 1 回、1 ポットにつき 300 mL ずつ手灌液し、排液は全て廃棄した。播種後 32 日に 1 ポットあたり 4 株ずつとなるよう間引きした。播種後 62、124 および 188 日に各試験区 6 ポットずつ収穫した。

試験区

光強度と培養液濃度の 2 要因とし、光強度では PPFD が 30、130 および 230 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の 3 水準を設け、培養液濃度では 0、1/8、1/4 および 1/2 単位の 4 水準を設け、組み合わせで計 12 試験区とした。ここで、PPFD は光源点灯時のポット表面付近において分光色彩照度計 (C-7000, 株式会社セコニック製) で測定した平均値である。PPFD が 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験区では 1 本のランプを上向きの照射方向となるように設置した。PPFD が 130 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および 230 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験区ではそれぞれ 2 本および 4 本のランプを下向きの照射方向となるように設置した。初回灌液時に測定した培養液の EC は 0、1/8、1/4 および 1/2 単位の順にそれぞれ 0.2、0.5、0.8 および 1.4 dS m^{-2} であった。1 ポットを 1 反復とみなして乱塊法に準じて配置し、1 回の収穫につき各試験区 6 反復とした。

測定項目

全ての測定は 1 株ずつ実施した。播種後 188 日に収穫したポットにおいては、播種後 33、61、91、120、151 および 187 日に SPAD を測定した。収穫物は葉、上胚軸および根に切り分け、播種後 62 および 124 日の収穫においてはスキャナー (GT-X980, セイコーエプソン株式会社) で画像化し、ImageJ (バージョン 1.53 g) を用いて葉面積を測定し、葉面積を葉の乾物重で除して比葉面積 (以下、SLA) を算出した。播種後 124 日および 188 日の収穫においては根の新鮮重および乾物重を測定した。各測定項目では、測定日ごとに 1 反復ずつ平均値を求めた後、6 反復として二元配置分散分析および Tukey-Kramer 検定を行った。

2.6.2 結果

SPAD

二元配置分散分析の結果、播種後 33 日では培養液濃度のみが $p < 0.001$ で有意であった (表 2-4)。播種後 61 日以降は光強度と培養液濃度の両方で $p < 0.001$ で有意であり、交互

作用は播種後 91 日では $p < 0.05$, 播種後 120 日から 151 日までは $p < 0.001$ で有意であった。光強度の効果は光強度が高まるにつれて SPAD が低下したことによるもので、培養液濃度の効果は播種後 33 日の場合を除き、培養液濃度の高まりに応じて SPAD が増加したことによるものであった。なお、播種後 33 日では、培養液濃度が 0 単位と 1/2 単位の場合に SPAD が増加した。

Tukey-Kramer 検定の結果、播種後 61 日以降は培養液濃度が高まるにつれて SPAD も高まる傾向がみとめられ、0 単位の培養液を与えた試験区で特に低くなり、播種後 120 日以降は PPFD $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ または $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験区において葉がほぼ枯死した (図 2-14)。また、光強度の影響も認められ、PPFD $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ または $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験区は、 $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の試験区よりも有意に SPAD が低かった。

葉の乾物重、面積および SLA

葉の乾物重に対する二元配置分散分析の結果では、播種後 62 日では光強度と培養液濃度の効果と交互作用が $p < 0.001$ で有意であり、播種後 124 日では培養液濃度が $p < 0.001$, 光強度と培養液濃度の交互作用が $p < 0.01$ で有意であった (表 2-5)。光強度の効果は PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において葉の乾物重が小さかったことによるもので、培養液濃度の効果は 0 単位において葉の乾物重が小さかったことによるものであった。

Tukey-Kramer 検定の結果では、0 単位の培養液を与えた試験区では光強度に応じた葉乾物重の増加がみとめられなかった (図 2-15)。播種後日数にかかわらず、PPFD 130 または $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 0 単位の培養液を与えた試験区で葉乾物重が有意に小さく、播種後 124 日では PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ においても有意に小さかった。播種後 62 日から播種後 124 日にかけて、葉乾物重は低下する傾向にあり、特に PPFD 130 または $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 0 単位の培養液を与えた試験区では、それぞれ 43% および 46% 低下した。

葉面積に対する二元配置分散分析の結果では、葉の乾物重とは異なり、播種日にかかわらず交互作用は検出されず、光強度と培養液濃度が $p < 0.001$ で有意であった (表 2-5)。光強度が高いほど葉面積は小さく、培養液濃度が高いほど葉面積は大きくなる傾向がみとめられた。葉の乾物重とは異なり、各試験区の葉面積は播種後 62 日から 124 日にかけて変化しなかった (図 2-15)。

SLA に対する二元配置分散分析の結果では、播種後 62 日において光強度および培養液濃度がそれぞれ $p < 0.001$ および $p < 0.001$ で有意となり、交互作用も $p < 0.05$ で有意であった (表 2-5)。一方、播種後 124 日では交互作用は検出されず、光強度および培養液濃度が $p < 0.001$ で有意であった。播種後日数にかかわらず、光強度が高まるほど SLA は小さくなった。培養液濃度の効果は播種後日数によって異なり、播種後 62 日では 0 単位の培養液濃度の場合に SLA は小さくなった一方、播種後 124 日では 0 単位の培養液濃度の場合に SLA は大きくなった。

Tukey-Kramer 検定の結果、播種後 62 日において、PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では 1/8 単位以上

の培養液の供給によって SLA が有意に高まったのに対し、その他の光強度では培養液濃度による有意差はみとめられなかった (図 2-15).

根の新鮮重および乾物重

根新鮮重に対する二元配置分散分析の結果では、光強度および培養液濃度が播種後日数にかかわらず $p < 0.001$ で有意であり、交互作用は播種後 124 および 188 日においてそれぞれ $p < 0.05$ および $p < 0.01$ で有意であった (表 2-6). 光強度の効果は、PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において根新鮮重が低かったことによるもので、培養液濃度の効果は、0 単位において根新鮮重が低かったことによるものであった.

Tukey-Kramer 検定の結果、播種後日数にかかわらず、0 単位の培養液を与えた場合には光強度の影響はみとめられず、いずれの光強度においてもその他の培養液濃度を与えた場合よりも根新鮮重が有意に小さく、0.20 g から 0.25 g の範囲であった (図 2-16). 播種後 124 日の時点では、0 単位の培養液を与えた試験区を除けば、光強度にかかわらず全ての試験区において ISO-17217-1 で示されている 1 年生苗の重量基準 (0.5 g) を上回った (ISO17217-1, 2014). また、PPFD $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 1/4 または 1/2 単位の培養液を与えた 2 つの試験区では、それぞれ 0.99 g および 1.04 g となり、甲参の重量基準から算出した値 (0.94 g) を超えた (RDA, 2019). 播種後 188 日において 0.5 g を上回った試験区は播種後 124 日と同じであったが、0.94 g を上回った試験区は 7 つにまで増加した. PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 1/2 単位の培養液を与えた試験区では 0.96 g となり、PPFD $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 1/8, 1/4 および 1/2 単位の培養液を与えた試験区では、それぞれ 1.23, 1.25 および 1.30 g となり、PPFD $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 1/8, 1/4 および 1/2 単位の培養液を与えた試験区では、それぞれ 1.08, 1.20 および 1.33 g となった.

根乾物重に対する二元配置分散分析の結果では、光強度、培養液濃度および交互作用が播種後日数にかかわらず $p < 0.001$ で有意であった (表 2-6). 各因子の効果や交互作用の傾向は根新鮮重の場合と概ね同じであった. 0 単位の培養液を与えた試験区では、播種後日数にかかわらず根乾物重は 0.059 g から 0.081 g の範囲となり、他の試験区よりも有意に低かった (図 2-16).

2.6.3 考察

本実験において認められた全ての交互作用は、0 単位の培養液を与えた場合の大幅な生育抑制に起因するものであった. したがって、養分供給は極めて重要である. 同じ光強度の場合には、0 単位の培養液を与えた試験区において播種後 61 日以降に SPAD が低かった. このことは、本章 2.4 で認められたのと同様に、生育初期から窒素が欠乏していたことを示唆している. これらの試験区では、播種後 62 日の PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 条件における葉乾物重を除き、葉乾物重や葉面積も有意に低かったことから、地上部の生長が大きく制限されてい

た。さらに、窒素欠乏では光合成速度も大きく低下するため、結果的に根の新鮮重は低く、0.5 g に満たなかったと考えられる。ピートとパーライトの混合培地では、水のみ (EC 0.2 dS m⁻¹) で栽培しても 0.6 g の苗が得られる場合もあるが (Park et al., 2020)、ロックウールのような養分に乏しい無機培地では、特に養分供給が必須であると考えられる。

一方、1/8 単位以上の培養液を与えた場合には、同一の光強度において有意差が認められた項目はなく、全ての試験区で播種後 124 日の時点で根新鮮重は ISO-17217-1 で示されている 1 年生苗の重量基準 (0.5 g) を上回った (ISO17217-1, 2014)。したがって、1 年生オタネニンジンの養液栽培においては 1/8 単位から 1/2 単位の培養液を与えることが有効であると考えられる。

オタネニンジンは半陰性植物であるとされ (大隅, 1979)、光飽和点は PPFD 600 μmol m⁻² s⁻¹ 程度とする報告もあるものの、200 μmol m⁻² s⁻¹ から 400 μmol m⁻² s⁻¹ 程度とする報告が多い (Lee et al., 2012; Qin et al., 2011; Woo et al., 2004; Yong et al., 2007; Zhang et al., 2022)。本実験では、同じ培養液濃度の場合には、播種後 61 日以降、光強度が弱いほど SPAD が高い傾向にあった。強い光はストレスとなりクロロフィルの分解を促進することから、光飽和点付近であった PPFD 230 μmol m⁻² s⁻¹ に加え、130 μmol m⁻² s⁻¹ においても 30 μmol m⁻² s⁻¹ に比べて強い光ストレスを受けていたと考えられる。光強度に対する反応は葉の形態においても認められた。SLA は光環境に応じて変化し、光が弱い場合には植物はより多く光を得るために同化産物を葉面積の拡大に投資するため増加し、十分な光のもとでは面積ではなく葉の厚みに投資して減少する (Evans & Poorter, 2001)。SLA は調査日にかかわらず、同一の培養液濃度の場合には PPFD 30 μmol m⁻² s⁻¹ の試験区で有意に高かったことから、30 μmol m⁻² s⁻¹ は光強度としては不十分であったと考えられる。

根の新鮮重および乾物重の結果は、葉で得られた結果に対応するように、播種後日数にかかわらず PPFD 30 μmol m⁻² s⁻¹ で小さかった。PPFD 30 μmol m⁻² s⁻¹ で 1/8 単位以上の培養液を与えた試験区では、播種後 188 日時点で SPAD が 10 以上あり、これ以降も肥大が継続すると考えられた。しかし、弱光 (PPFD 70 μmol m⁻² s⁻¹) では強光 (300 μmol m⁻² s⁻¹) よりも休眠に入るまでの期間が長い、最終的な根重に差がないとの報告がある (Kuronuma et al., 2020)。時間あたりに得られる苗が少なくなるため、栽培期間が長くなる PPFD 30 μmol m⁻² s⁻¹ での栽培は好ましくないと考えられる。

一方、PPFD 130 μmol m⁻² s⁻¹ や 230 μmol m⁻² s⁻¹ で 1/8 単位以上の培養液を与えた場合には、播種後 188 日の全ての試験区において、根新鮮重は甲参の重量基準 (0.94 g) を超えた。本章 2.4 において、PPFD 100 μmol m⁻² s⁻¹ の条件下で 1/8 単位の培養液を与えた場合にも根新鮮重が 0.94 g を超えたこともふまえると、PPFD 100 μmol m⁻² s⁻¹ から 230 μmol m⁻² s⁻¹ 程度が 1 年生オタネニンジンの育苗に適すると考えられる。

また、PPFD 230 μmol m⁻² s⁻¹ で 1/4 単位以上の培養液を与えた場合には、播種後 124 日の時点で根新鮮重は 0.94 g を超えた。PPFD 130 μmol m⁻² s⁻¹ 以上で 1/8 以上の培養液を与えた

試験区間では有意差が認められなかったことから、0.94 g 以上の根新鮮重を苗の基準として判断する場合には、栽培期間は 124 日から 188 日までの間で十分であり、1 年に 2 回以上の栽培が可能であると考えられる。

本実験および本章 2.4 の結果からは、PPFD $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の光強度のもとで 1/8 単位から 1/2 単位の培養液を与えることで、甲参の重量基準である 0.94 g 以上の根の肥大を確保でき、かつ 1 年に 2 回以上の栽培が可能であることが明らかとなった。

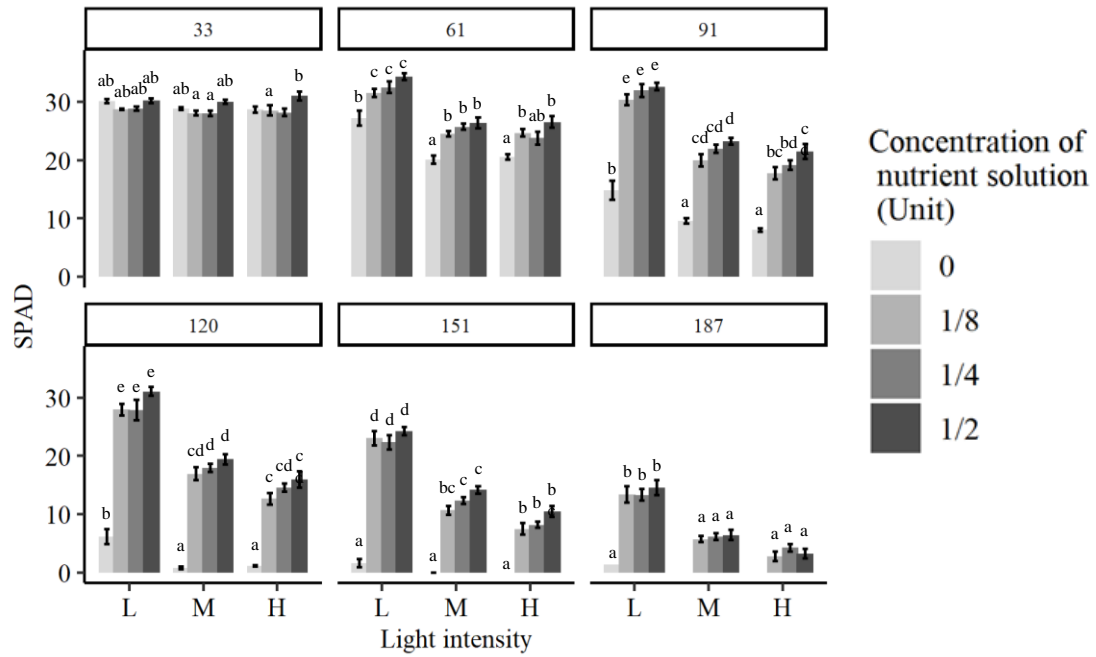


図 2-14 異なる光強度および培養液濃度における SPAD の推移

横軸は光強度を示し，L, M および H はそれぞれ PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ， $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す．棒グラフ上部のカラムは播種後日数を示す．エラーバーは標準誤差を示す (n=6)．同一の播種後日数において異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)．

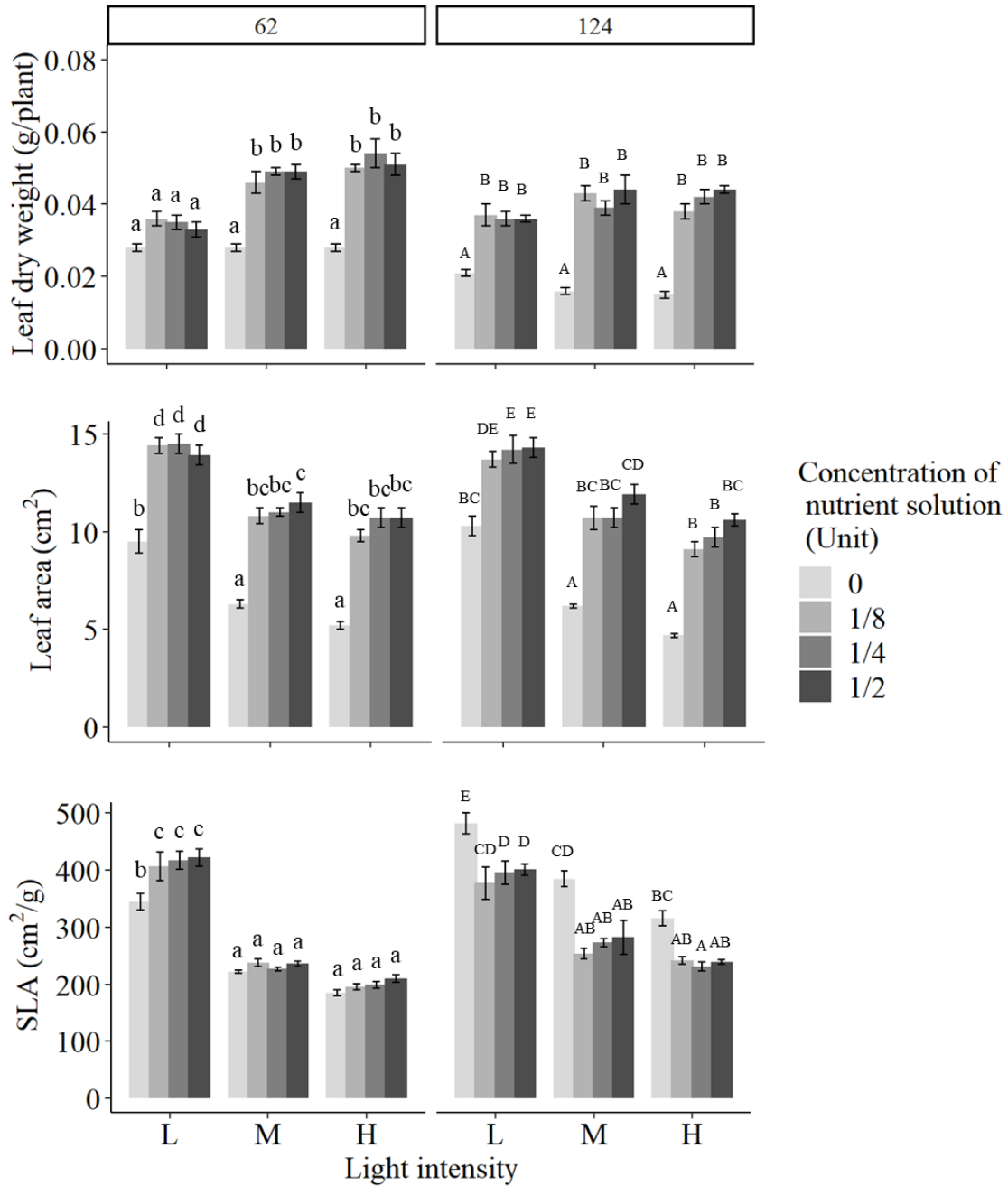


図 2-15 異なる光強度および培養液濃度における葉乾物重，葉面積および SLA

図上部のカラムは播種後日数を示す。横軸は光強度を示し，L，M および H はそれぞれ PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ， $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す。エラーバーは標準誤差を示す ($n=6$)。各調査項目の同一の播種後日数において異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)。

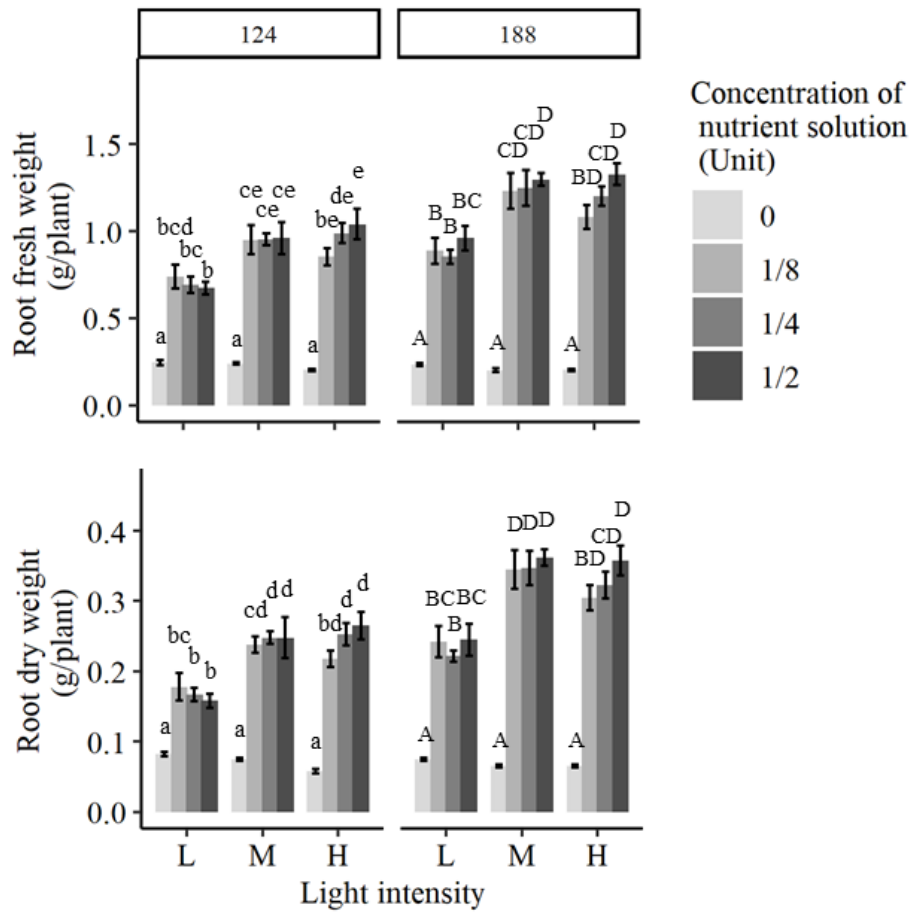


図 2-16 異なる光強度および培養液濃度における根の新鮮重および乾物重

図上部のカラムは播種後日数を示す. 横軸は光強度を示し, L, M および H はそれぞれ PPFD $30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $130 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $230 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す. エラーバーは標準誤差を示す ($n=6$). 各調査項目の同一の播種後日数において異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定).

表 2-4 SPAD に対する光強度および培養液濃度の効果および二元配置分散分析結果

Factors	Levels	SPAD					
		DAS 33	DAS 61	DAS 91	DAS 120	DAS 151	DAS 187
(1) Light intensity	L	29.5	31.4	27.4	23.3	18.5	13.1
	M	28.7	24.2	18.7	13.8	11.2	6.1
	H	29.1	23.9	16.6	11.1	8.3	3.4
(2) Nutrient (Unit)	0	29.2	22.6	10.8	2.7	1.0	1.4
	1/8	28.4	26.9	22.7	19.2	13.7	7.3
	1/4	28.3	27.3	24.3	20.1	14.3	7.9
	1/2	30.4	29.1	25.8	22.1	16.3	8.1
ANOVA	(1)	NS	***	***	***	***	***
	(2)	***	***	***	***	***	***
	(1)x(2)	NS	NS	*	***	***	NS

DAS は播種後日数を示し, Factors のうち Light intensity は光強度, Nutrient は培養液濃度を示す. NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

表 2-5 葉乾物重, 葉面積および SLA に対する光強度および培養液濃度の効果と二元配置分散分析結果

Factors	Levels	DAS62			DAS124		
		Leaf dry weight (g / plant)	Leaf area (cm ²)	SLA (cm ² / g)	Leaf dry weight (g / plant)	Leaf area (cm ²)	SLA (cm ² / g)
(1) Light intensity	L	0.033	13.1	398	0.033	13.1	414
	M	0.043	9.9	231	0.035	9.8	298
	H	0.046	9.1	198	0.035	8.5	257
(2) Nutrient (Unit)	0	0.028	7.0	251	0.018	7.1	394
	1/8	0.044	11.7	280	0.039	11.1	291
	1/4	0.046	12.1	281	0.039	11.5	300
	1/2	0.044	12.0	299	0.041	12.2	308
ANOVA	(1)	***	***	***	NS	***	***
	(2)	***	***	***	***	***	***
	(1)x(2)	***	NS	*	**	NS	NS

DAS は播種後日数を示し, Factors のうち Light intensity は光強度, Nutrient は培養液濃度を示す. NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

表 2-6 根の新鮮重および乾物重に対する光強度および培養液濃度の効果と二元配置分散分析結果

Factors	Levels	DAS124		DAS188	
		Root fresh weight (g / plant)	Root dry weight (g / plant)	Root fresh weight (g / plant)	Root dry weight (g / plant)
(1) Light intensity	L	0.59	0.146	0.73	0.196
	M	0.78	0.202	1.00	0.280
	H	0.77	0.199	0.96	0.262
(2) Nutrient (Unit)	0	0.23	0.072	0.21	0.068
	1/8	0.85	0.213	1.07	0.297
	1/4	0.88	0.223	1.10	0.298
	1/2	0.89	0.223	1.20	0.321
ANOVA	(1)	***	***	***	***
	(2)	***	***	***	***
	(1)x(2)	*	***	**	***

DAS は播種後日数を示し, Factors のうち Light intensity は光強度, Nutrient は培養液濃度を示す. NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

第3章 育苗効率を高める栽培条件の検討

3.1 緒言

第2章において、PFALにおいても国際規格や甲参の重さの基準を上回る苗を得ることができることが明らかとなった。PFALは一般にコストが高くなりがちであるため、時間や単位面積あたりに得られる苗の数を増やして苗単価を低減することが重要である。時間あたりに得られる苗を増やす試みとして、強光により生育期間を短縮して強制的に休眠させた後、低温あるいはジベレリンを処理することで1年生苗を強制的に休眠打破し、1年間に実質2年生とする技術が開発されている(渡辺ら, 2015)。しかし、PFALにおいて単位面積あたりに得られる苗の数を増やそうとした検討例は見当たらない。単位面積あたりの苗の数を増加させるには密植が有効であると予想される。例えば、養液栽培によるジャガイモの種イモ増殖においては栽植密度を高めてもイモの大きさに悪影響を及ぼすことなく、より多くの種イモを得られる(Muro et al., 1997)。

一般的には、過剰な栽植密度下では徒長が生じ、通風が妨げられ病害が発生しやすくなる。また、光、養分、水などの競合によって個体単位でのバイオマスは減少する(Postma et al., 2021)。しかし、PFALでは病害が発生しにくく、養液栽培による十分な養分供給も容易である。また、1年生オタネニンジンの葉は1枚のみで葉数の増加による競合は起こらない。一般的な作物よりも低い光強度で栽培が可能であるため、光の競合に対しても照明の増加等で対応しやすい。以上の背景から、苗数を増やすためにPFALにおける密植を検討する価値はあり、また、光や養水分を十分に与えれば競合の影響を緩和して肥大を確保しつつ、慣行に比べて採苗本数を増加できると考えた。

そこで第3章では、面積あたりの採苗数の増加に向けた密植の有効性や、密植による競合に対する光強度および養分の影響を明らかにするために、PFAL条件下において栽植密度、光強度および培養液濃度の3要因を組み合わせる栽培した。

3.2 栽植密度、光強度および培養液濃度の影響

3.2.1 材料および方法

試験区に共通の材料および方法

2.2の材料および方法を基本とし、2020年7月30日から芽切り処理した種子を用いた。2021年11月12日に播種前処理を開始し、2021年11月29日に播種した。栽培室で栽培し、ロックウール細粒綿をロングポリポット(上面の直径15 cm, 177 cm²)に充填した。1ポットに100粒の開裂種子を深さ2 cmで播種した。各試験区に応じた光強度となるようにLEDランプの本数を調節し、14時間日長とした。培養液は各試験区に応じた濃度に調製し、毎週1回、1ポットにつき300 mLずつ手灌液し、排液は全て廃棄した。灌液の度に、環境の偏りを減らす目的で、ポットの位置をブロック内でローテーションした。播種後は1週間に1回以上発芽数を数え、1ポットあたりの株数が試験区で定めた株数となるように複数回

わたり間引きした。播種後 91 および 182 日に各試験区 6 ポットずつ収穫した。

試験区

栽植密度、光強度および培養液濃度の 3 要因を組み合わせで試験区とした。栽植密度では 1 ポットあたり 10, 20, 30 または 40 株の 4 水準、光強度では PPFD が $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の 2 水準、培養液濃度では 1/8 単位および 1/2 単位の 2 水準を設けた。ここで、各栽植密度はそれぞれ 1 ポットあたり 560, 1130, 1690 および 2260 株 m^{-2} に相当する。また、初回灌液時に測定した培養液の EC は 1/8 単位および 1/2 単位において、それぞれ 0.5 dS m^{-2} および 1.4 dS m^{-2} であった。1 ポットを 1 反復とみなして 1 回の収穫につき各試験区 6 反復とした。

測定項目

播種後 91 日の収穫物では、1 株ずつ SPAD、葉の乾物重、根の新鮮重および乾物重を測定した。ISO-17217-1 および甲参の重量基準を参考として、根の新鮮重が 0.50 g 以上を「国際規格苗」、 0.94 g 以上を「優良苗」の基準とし、各基準に基づき 1 ポットずつの成苗数を計測した (ISO17217-1, 2014; RDA, 2019)。第 2 章の 2.6.1 と同様にして葉面積を測定し、SLA も算出した。播種後 92 日から 93 日にかけて、残った各区 6 ポットにおいて Fv/Fm 値を 1 ポットにつき 2 株で測定した。測定対象はポット内で最も上および最も下にある葉とした。播種後 182 日の収穫物では、根の新鮮重および乾物重を測定し、国際規格苗と優良苗の成苗数を計測した。各測定項目では、測定日ごとに 1 反復ずつ平均値を求めた後、6 反復として三元配置分散分析および Tukey-Kramer 検定を行った。

3.2.2 結果

SPAD

SPAD に対する三元配置分散分析の結果、栽植密度 ($p < 0.001$)、光強度 ($p < 0.001$) および培養液濃度 ($p < 0.001$) の効果が有意であったが、1 次および 2 次の交互作用は有意でなかった (表 3-1)。栽植密度が高いほど SPAD は高く、比較的高い光強度の PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では SPAD は低く、比較的高い培養液濃度の 1/2 単位では SPAD が高かった。Tukey-Kramer 検定の結果、PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で 1/2 単位の培養液を与えた場合を除き、同じ光強度や培養液濃度の条件においては 40 株/ポットと 10 株/ポットとの間で有意差が認められ、 $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で 1/2 単位の培養液を与えた場合には 30 株/ポットにおいても 10 株/ポットよりも有意に高かった (図 3-1)。同じ栽植密度や培養液濃度の条件においては、PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ よりも高い SPAD であったが、有意差は栽植密度 40 株/ポットの $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ のみで認められた。同じ栽植密度および光強度の条件においては、培養液濃度が高い方が SPAD も高くなる傾向にあったが、有意差は認められなかった。

Fv/Fm

Fv/Fm に対する三元配置分散の結果、光強度 ($p < 0.001$) および培養液濃度 ($p < 0.001$) の効果が有意であったが、1 次および 2 次の交互作用は有意でなかった (表 3-2)。比較的高い光強度の PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で Fv/Fm は低く、比較的高い培養液濃度の 1/2 単位でも Fv/Fm は低かった (図 3-2)。

葉の乾物重、葉面積および SLA

葉乾物重に対する三元配置分散分析の結果、栽植密度 ($p < 0.001$)、光強度 ($p < 0.01$) の効果が有意であったが、1 次および 2 次の交互作用は有意ではなかった (表 3-3)。栽植密度が高いほど葉乾物重は小さく、比較的高い光強度の PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でも葉乾物重は小さくなった (図 3-3)。

葉面積に対する三元配置分散分析の結果、栽植密度 ($p < 0.05$)、光強度 ($p < 0.001$) の効果に加え、光強度と培養液濃度の交互作用 ($p < 0.01$) が有意であった (表 3-3)。栽植密度が高まるほど葉面積は小さく、また、比較的高い光強度の PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ においても葉面積は小さくなった。光強度と培養液濃度の交互作用は、培養液濃度が高まると PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ においては葉面積が大きくなる傾向にあったのに対し、 $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ においてはわずかに小さくなる傾向があったことによる。Tukey-Kramer 検定の結果、PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で 1/2 単位の培養液を与え、10 または 20 株/ポットの栽植密度とした 2 試験区が、 $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ における一部の試験区よりも有意に大きな葉面積であった (図 3-3)。

SLA に対する三元配置分散分析の結果、栽植密度 ($p < 0.05$)、光強度 ($p < 0.001$) の効果に加え、栽植密度と光強度の交互作用 ($p < 0.05$) が有意であった (表 3-3)。栽植密度が高まるにつれて SLA は増加し、比較的低い光強度の PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ においても SLA は増加した。栽植密度と光強度の交互作用は、PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では培養液濃度にかかわらず栽植密度が高まるにつれて SLA は増加する傾向にあった一方、 $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ではほぼ一定であったことによるものであった。Tukey-Kramer 検定の結果、同一の培養液濃度と栽植密度の場合には、PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ より低い SLA となり、1/8 単位の培養液を与えた場合には栽植密度 40 株/ポットで、1/2 単位の培養液を与えた場合には栽植密度 20 から 40 株/ポットにおいて有意差が認められた (図 3-3)。

根の新鮮重および乾物重

根新鮮重に対する三元配置分散分析の結果、栽植密度 ($p < 0.001$)、光強度 ($p < 0.001$) の効果が有意であり、栽植密度と光強度の交互作用 ($p < 0.05$) も有意であった (表 3-4)。栽植密度が高まるにつれて根新鮮重は低下し、比較的高い光強度の PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でも根新鮮重は低下する傾向にあった。しかし、栽植密度の増加による根新鮮重の低下は比較的低い光強度の PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で顕著であり、 $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では培養液濃度にかかわ

らず栽植密度が 20 株/ポット以上で高まるにつれて根新鮮重は低下する傾向にあったが、 $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ではほぼ一定であった (図 3-4)。

根乾物重に対する三元配置分散分析の結果は根新鮮重の場合と同様であり、栽植密度 ($p < 0.001$)、光強度 ($p < 0.001$) の効果が有意であり、栽植密度と光強度の交互作用 ($p < 0.01$) も有意であった (表 3-4)。一部、Tukey-Kramer 検定の結果に違いがあったものの、試験区間の傾向は根新鮮重と同様であった (図 3-4)。

成苗数

国際規格苗 ($> 0.5 \text{ g}$) の成苗数に対する三元配置分散分析の結果、栽植密度 ($p < 0.001$)、光強度 ($p < 0.001$) の効果が有意であり、栽植密度と光強度の交互作用 ($p < 0.05$) も有意であった (表 3-5)。栽植密度が高まるにつれて成苗数も増加し、比較的低い光強度の PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でも成苗数が増加した。しかし、栽植密度が 40 株/ポットの場合には、光強度による違いは認められなかった (図 3-5)。栽植密度 40 株/ポットの試験区では 1 ポットあたり 31~32 株の範囲で苗が得られ、最も多い苗が得られたのは栽植密度 40 株/ポットの PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ のもと 1/2 単位の培養液を与えた試験区であり、1 ポットあたり 31.9 株の国際規格苗を得られた。一方、栽植密度 20 株/ポット以下の試験区では 8~19 株の範囲であり、光強度や培養液濃度にかかわらず、40 株/ポットの試験区との間に Tukey-Kramer 検定による有意差が認められた。

国際規格苗のみを対象とした根新鮮重に対する三元配置分散分析の結果は、栽植密度 ($p < 0.001$) および光強度 ($p < 0.001$) の効果が有意であり、交互作用は有意でなかった (表 3-5)。栽植密度が 20 株/ポットを超えた場合や、比較的高い光強度の PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において根新鮮重は低い傾向にあった (図 3-5)。ただし、最も小さかったのは $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 1/2 単位の培養液を与えた栽植密度 10 株/ポットの試験区で、 0.73 g であった。

優良苗 ($> 0.94 \text{ g}$) の成苗数に対する三元配置分散分析の結果は国際規格苗の場合と異なり、栽植密度 ($p < 0.001$) と光強度 ($p < 0.001$) に加えて培養液濃度 ($p < 0.001$) の効果が有意であり、栽植密度と培養液濃度の交互作用 ($p < 0.01$) も有意であった (表 3-5)。栽植密度が高いほど、また比較的低い光強度の PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ や比較的高い培養液濃度の 1/2 単位の条件において成苗数は増加した。しかし、1/2 単位の培養液を与えた場合には栽植密度の高まりに応じた採苗本数の増加が認められたが、1/8 単位の培養液を与えた場合には明瞭な傾向はなかった (図 3-5)。同一の培養液濃度または栽植密度においては PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において採苗本数が少ない傾向にあり、1/8 単位の培養液を与えた栽植密度 20 株/ポットの条件においては Tukey-Kramer 検定による有意差も認められた。最も多く優良苗を得られたのは栽植密度 40 株/ポットで PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ のもと 1/2 単位の培養液を与えた試験区であり、1 ポットあたり 13.6 株の優良苗を得られた。

優良苗のみを対象とした根新鮮重に対する三元配置分散分析の結果、光強度 ($p < 0.001$) の効果が有意であり、交互作用は有意でなかった (表 3-5)。比較的高い光強度の PPFD 370

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において根新鮮重は低かった。なお、優良苗の根新鮮重は全ての試験区で 1.02 g から 1.16 g の範囲にあった (図 3-5)。PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において根新鮮重は低い傾向にあったものの、Tukey-Kramer 検定の結果では $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 1/8 単位の培養液を与えた栽植密度 30 株/ポットの試験区と、 $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ において 1/2 単位の培養液を与えた栽植密度 10 株/ポットの試験区の間でのみ有意差が認められ、その他の試験区間に有意差は認められなかった。

3.2.3 考察

本実験では、育苗効率を向上させるために単位面積あたりの成苗数を増加するための条件を検討した。SPAD は葉のクロロフィル含量や窒素含量を表す指標となる。一方、SLA は葉の形態変化を反映する代表的な指標であり、SLA は密植等によって弱光に順化した葉で高い値をとる (Postma et al., 2021)。SPAD は培養液濃度 1/2 単位で 1/8 単位よりも高い値を示し、養分供給量の多寡は植物の栄養状態に反映されていた。光強度によらず栽植密度に比例して SPAD が高まったのは、高い栽植密度では葉の遮蔽が多くなり、下の葉 (個体) では光が当たりにくく、老化が遅れたためだと考えられる。一方、SLA においては光強度と栽植密度の交互作用が認められ、密植による弱光への順化、すなわち光の競合は PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でのみ生じ、 $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では生じなかったと考えられる。これは SPAD の結果から得られた考察とは一致しないが、SLA は葉の厚みを反映する構造的な違いであるため、SPAD とは影響の現れ方が異なると考えられる。葉の厚みは葉の寿命のうち、特に初期に決定されると思われ、また、葉の構造は一度決定した後は変化しにくいと考えられる。例えばオタネニンジンと同様に葉を年に一枚しか出さず強光を嫌うコンニャクにおいては、展葉直後の遮光処理の有無によって、4 週間には柵状組織の発達に違いがみられる (稲葉, 1984)。また、トウモロコシにおいては一度強光に順化した葉の解剖学的構造は弱光条件下においても変化しない (Yabiku & Ueno, 2019)。本実験の SLA の結果には、葉が小さく相互遮蔽が少ない生育初期に受けた光強度の影響が表れたと考えられる。一方で、クロロフィルの分解に伴う SPAD の低下は形態形成の停止以降も継続的に生じると考えられ、光強度の影響が栽培期間を経るにつれて表れやすかったと考えられる。

Fv/Fm は光阻害の指標としてよく用いられ、健全な葉では 0.83 程度となる (Maxwell & Johnson, 2000)。本実験における SPAD と Fv/Fm の結果からは、PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では栽植密度によらず光阻害がより強く生じ、播種後 91 日ごろには既に老化が早まり、光合成速度も低下していたと考えられる。また、十分な養分供給も、SPAD の増加とは反対に、Fv/Fm を低下させた。しかし、Fv/Fm は光合成反応のうち光化学系 II の量子収率のみを反映するため、実際の光合成速度とは必ずしも一致せず、Fv/Fm と光合成速度との間には葉の窒素状態の違いによる差異が生じうる (Maxwell & Johnson, 2000)、培養液濃度の影響については

実際の光合成速度を測定して確認する余地がある。

根乾物重は SLA の傾向を反映するように、PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でのみ栽植密度の増加に応じて低下する傾向が認められたことから、 $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では密植による光の競合によって肥大が劣ったと考えられる。一方、PPFD $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では密植による光の競合は生じなかったものの、栽植密度に関わらず光阻害が大きく生じたために、 $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ よりも肥大が劣ったと考えられる。SPAD の結果が根乾物重に反映されなかったのは、葉内の窒素の分配よりも SLA が光合成により大きく影響するためだと考えられる (Evans & Poorter, 2001)。

苗の生産効率には平均重量ではなく、単位面積や時間あたりに得られる苗の数で評価すべきである。大隅 (1986) は、長野県において、一般には 774粒 m^{-2} で播種されることや、その場合には 592株 m^{-2} (76.1%) が苗として得られ、重量は平均 0.72g であること、また、1.5 倍量 (1161粒 m^{-2}) 播種した場合には 842株 m^{-2} (72.5%) が苗として得られ、その重量は平均 0.63g であったと紹介している (1 間口 1.55m^2 として計算) (大隅, 1979)。本実験では、栽植密度を 40株/ポット (2260株 m^{-2}) とすることで 1 ポットあたり $31\sim 32 \text{株}$ ($1751\sim 1808 \text{株 m}^{-2}$) の国際規格苗 ($>0.5 \text{g}$) を得ることができ、これは栽植密度 10株/ポット または 20株/ポット (560 または 1130株 m^{-2}) の場合よりも有意に多かった。また、本実験における国際規格苗の平均新鮮重は試験区によって異なったが、最低でも 0.73g であった。したがって、 2260株 m^{-2} の栽植密度で養液栽培することで、慣行の約 3 倍の数の苗を得られる可能性が明らかとなった。

本実験結果のうち、甲参の重量基準 ($>0.94 \text{g}$) を上回った優良苗の数では、栽植密度と培養液濃度との交互作用が認められ、 $1/2$ 単位の培養液供給下では密植に伴い苗数が増加する傾向にあった。 $1/8$ 単位の培養液では密植に伴って光だけではなく養分の競合も生じた結果、重い苗が少なくなった可能性がある。この結果は、全株を対象とした根乾物重において培養液濃度の影響が認められなかったことに反する。オタネニンジン葉は 1 株につき 1 枚のみであるため、密植下では光の獲得に株間で大きな不均一性が生じると考えられる。そのため光の競合に打ち勝つ株は限られており、養分ではなく光の競合に負けて肥大が劣る株 (0.94g 以下) が多かったために、全体の根重の平均値では養分供給の影響がマスクされたのかもしれない。

韓国の温室内育苗で推奨される播種密度は 1074粒 m^{-2} であり (RDA, 2018)、これは本実験における 20株/ポット (1130株 m^{-2}) と近い値である。温室内育苗における播種数に対する良苗の割合が不明であるため本実験の結果と比較することはできないが、PFAL 条件下で養液栽培する場合には、慣行と同程度の 20株/ポット (1130株 m^{-2}) 以上の栽植密度が適すると考えられ、国際規格苗が多く得られることを考慮すると、 40株/ポット (2260株 m^{-2}) が好ましいと考えられる。また、得られる苗の数が 40株/ポット まで直線的に増加し続けた

ことや、 $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では40株/ポットにおいても密植による光の競合や根重低下が生じなかったことから、 2260株 m^{-2} を超える密植についても検討の余地があると考えられる。

最後に、苗生産に関するコストについて考察する。本研究で使用した建物や光熱費、労働の費用を把握することは困難であったため、人工光利用型の完全閉鎖型育苗装置として日本国内で利用されている「苗テラス」を用いた場合のコストに関する情報をもとに試算すると、養液栽培苗の価格は以下の通り予想される。なお、苗テラスとはプレハブ庫内に多段式育苗棚、LED照明、底面灌水装置、庫内の温度環境を均一にできる空調、培養液の自動作成と供給装置および炭酸ガス施用装置を有し、温度、光および水環境を自動制御できる育苗装置である。

苗テラスは標準型で1台あたり4段ないし5段の栽培棚を6棚有し、1段はセルトレイ4枚相当の栽培スペース (0.72 m^2) である (苗テラスカタログ, 不明)。しかし、棚の高さは2m程度であることや、本実験で使用したロングポリポットの高さ (30.5 cm) および1年生オタネニンジン草丈を最大10 cmと仮定し、更に群落上部の空間高さをカタログでLED照射条件として採用されている17 cmであると仮定すると1棚あたり3段が限度であると予想される。そのため、本試算ではオタネニンジン苗を生産する場合の苗テラス1台あたりの実栽培面積は 13 m^2 と仮定する。本実験の播種後182日において最大の生産効率を示した、栽植密度40株/ポットのPPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ のもと1/2単位の培養液を与えた試験区では、1ポット (177 cm^2) あたり31.9株の国際規格苗を得られる。実栽培面積とポットの面積の比から算出すると1作につき734ポットを栽培でき、23415株/作を得られ、栽培期間を考慮すると、少なくとも1年に2回の生産が可能であることから、1年間に苗テラス1台あたり46830株の国際規格苗を得ることができる。

PFALでは減価償却費、人件費および光熱水費が主な経費で、テラス生産の事例ではこれらが経費の80%を占めるとされるので (一般社団法人日本施設園芸協会, 2015)、まずこれらだけを考慮して試算を進める。耐用年数と修理費を加味した苗テラスの年間固定費は1,380,540円で、LEDランプが1年当たり73,529円と想定されるため、減価償却費は1,454,069円と仮定する (福島県農業総合センター, 2018)。人件費についての正確な試算は困難であるが、灌水は自動化され不要であり、その他の作業として培地充填、播種、運搬および収穫に5分/ポットを要すると仮定すると、年間122.3時間の作業となり、1人あたり時給1,000円では122,300円/年となる。光熱費のうち、電気代はフル稼働の場合に5段6棚型で720,000万円/年程度とされる (三菱ケミカルアクア・ソリューションズ株式会社, 不明)。なお、苗テラスではPPFDを約 $260 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ で管理できるとされるため、電気代の試算に光強度の影響はないこととし、日長についてもフル稼働の範疇に収まることと仮定する。電気代のうち、標準的な消費電力は電灯系と動力系でほぼ同じだと想定されるため (福島県農業総合センター, 2018)、ここでは50%ずつであると仮定する。棚が3段となるため、5段の棚に比べて電灯系の電気代は3/5になり、動力系の電気代は変わらないと考えると、それぞれ

216,000 円および 320,000 円となり、電気代は 536,000 円となる。PFAL でのレタス生産の例では光熱水費のうち電気代が 95%程度であることを参考にすると（一般社団法人日本施設園芸協会, 2015）、光熱費は 564,211 円/年となる。結果として、本試算では減価償却費、人件費および光熱水費は 2,140,580 円と試算される。これら 3 つの費用以外が 20%を占めるとすれば、全体で 2,675,725 円の経費がかかる。

さらに、オタネニンジン苗生産の特徴として、多量の培地の使用に伴う資材費の負担が予想される。そこで、本実験で用いたロックウール細粒綿やロングポリポットの実際の資材費はそれぞれ、120 L あたり 4,000 円および 200 ポットあたり 12,795 円であったことを考慮すると、1 ポット 4 L の培地を用いるとして 1 ポットあたり約 197 円の資材費がかかり、年間の資材費は 289,196 円となる。本試算で既に算出した全体の経費と合わせると、苗テラスによるオタネニンジン苗生産には 2,964,921 円/年の経費がかかると想定され、これを国際規格苗の生産数 (46830 株/年) で除すると、1 株あたりのコストは 63.3 円であると考えられる。

ただし、本試算では底面灌水を前提にしている点が本実験の前提条件と異なる。有機培地を用いた底面灌水によるオタネニンジン栽培で十分な根長を得られることは確認されているものの (Lee et al., 2021)、底面灌水条件下で本実験結果を再現できるかは検討の余地がある。

以上より、本章においては PFAL において慣行よりも密植にすることで、面積あたりの国際規格苗の採苗数を増やせることや、密植に加えて 1/2 単位の培養液濃度を与えることで良苗を多く得られることが明らかとなった。しかし、栽植密度が 1 ポット 40 株 (2260 株 m^{-2}) までの範囲では、PPFD 370 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ の光は強すぎ、光競合を起こすことなく光阻害を強く引き起こし、根重や良苗数の増加には寄与しなかった。

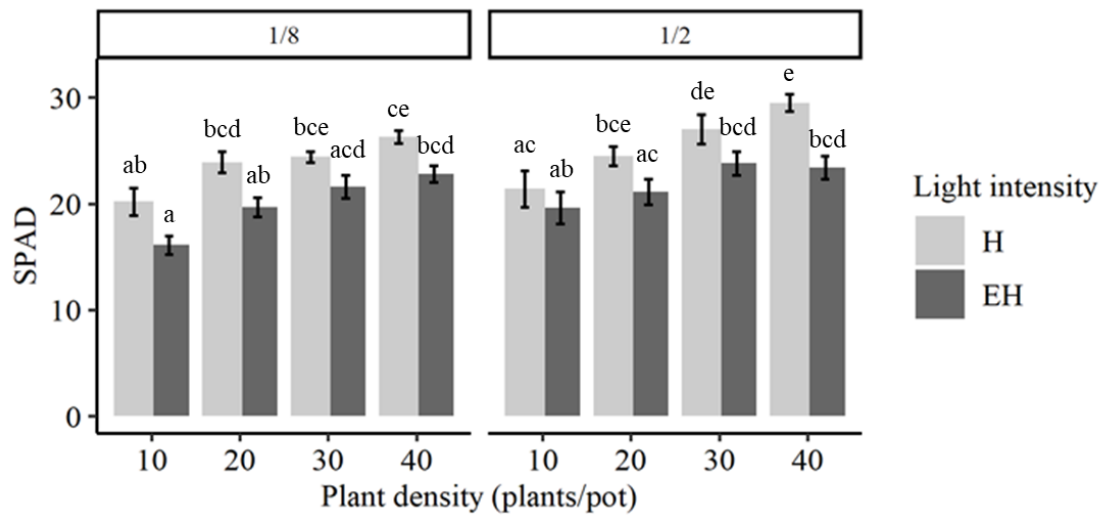


図 3-1 異なる栽植密度，光強度および培養液濃度における SPAD

播種後 91 日に測定．凡例の H および EH はそれぞれ PPFD 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および 370 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す．棒グラフ上部のカラムは培養液濃度（単位）を示す．エラーバーは標準誤差を示す ($n=6$)．異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)．

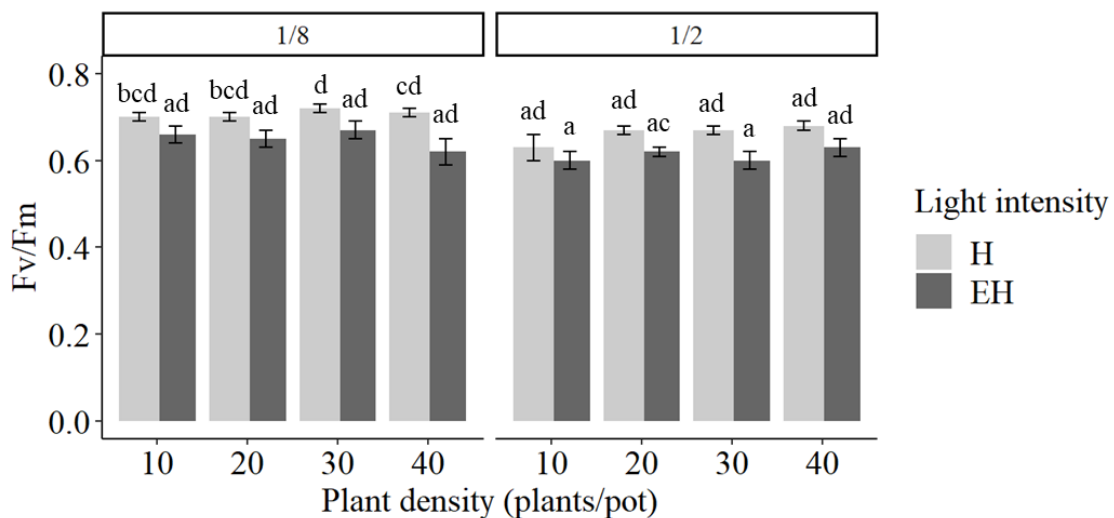


図 3-2 異なる栽植密度、光強度および培養液濃度における Fv/Fm

播種後 92 日から 93 日に測定. 凡例の H および EH はそれぞれ PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す. 棒グラフ上部のカラムは培養液濃度 (単位) を示す. エラーバーは標準誤差を示す ($n = 6$). 異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定).

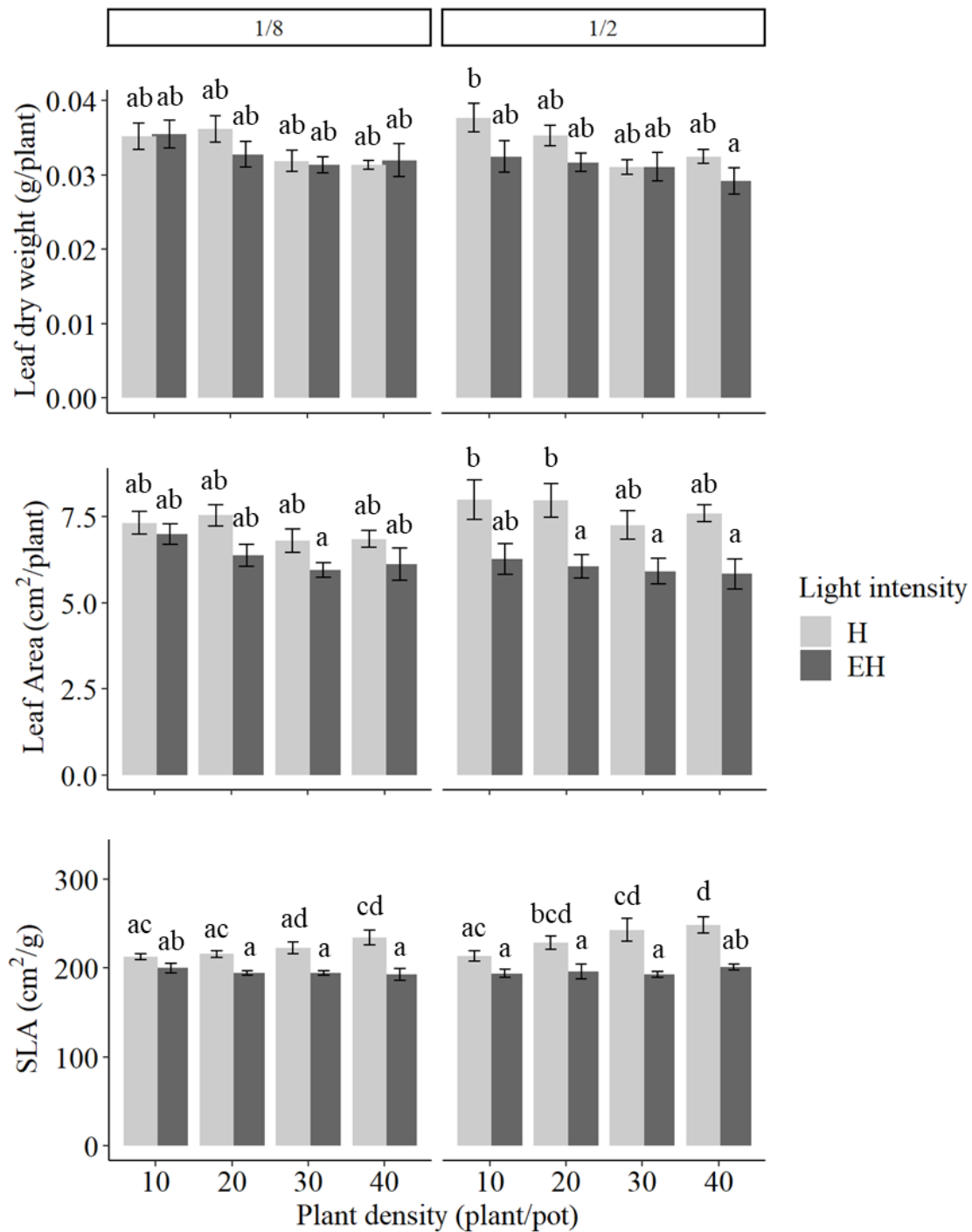


図 3-3 異なる栽植密度、光強度および培養液濃度における葉乾物重、葉面積および SLA 播種後 91 日に測定。凡例の H および EH はそれぞれ PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す。棒グラフ上部のカラムは培養液濃度（単位）を示す。エラーバーは標準誤差を示す ($n=6$)。異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)。

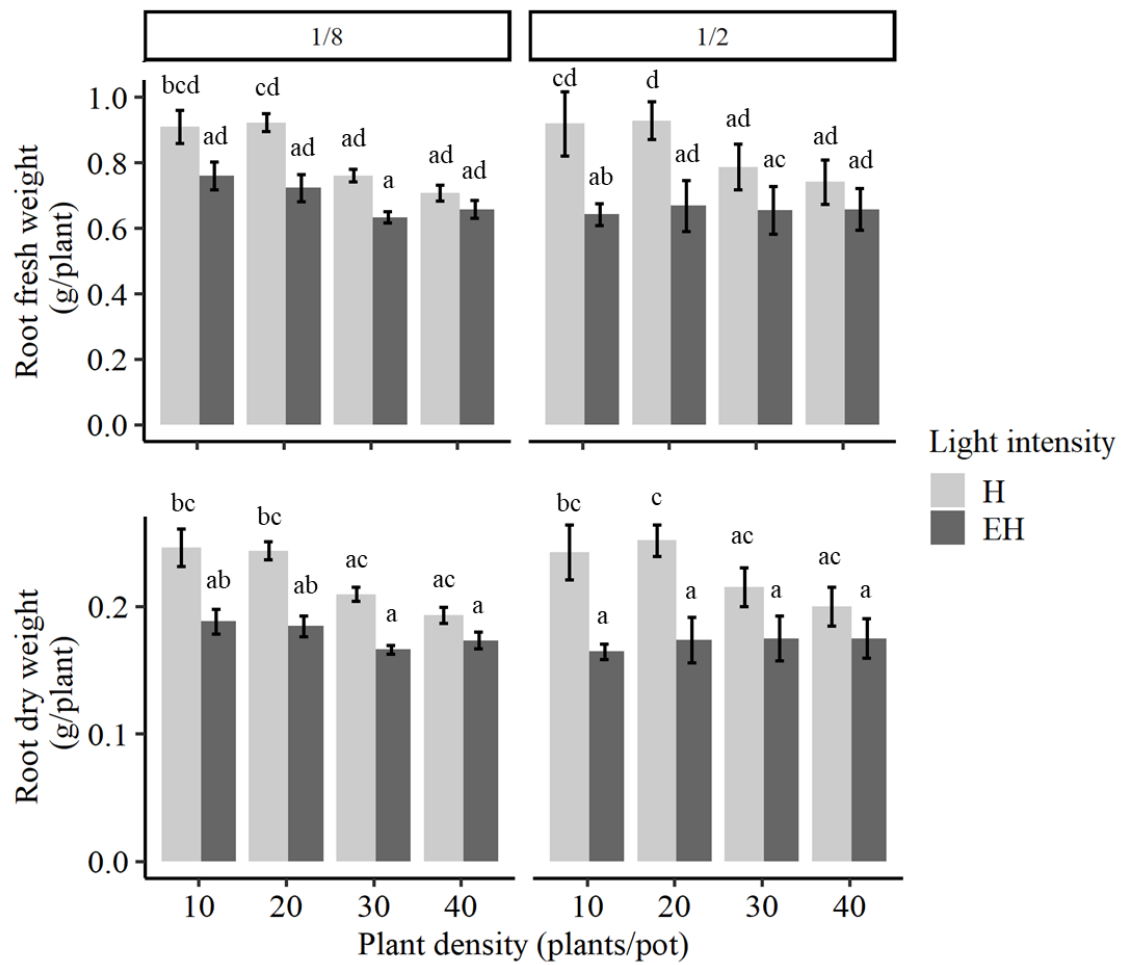


図 3-4 異なる栽植密度、光強度および培養液濃度における根の新鮮重および乾物重
 播種後 182 日に測定. 凡例の H および EH はそれぞれ PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す. 棒グラフ上部のカラムは培養液濃度 (単位) を示す. エラーバーは標準誤差を示す ($n=6$). 異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定).

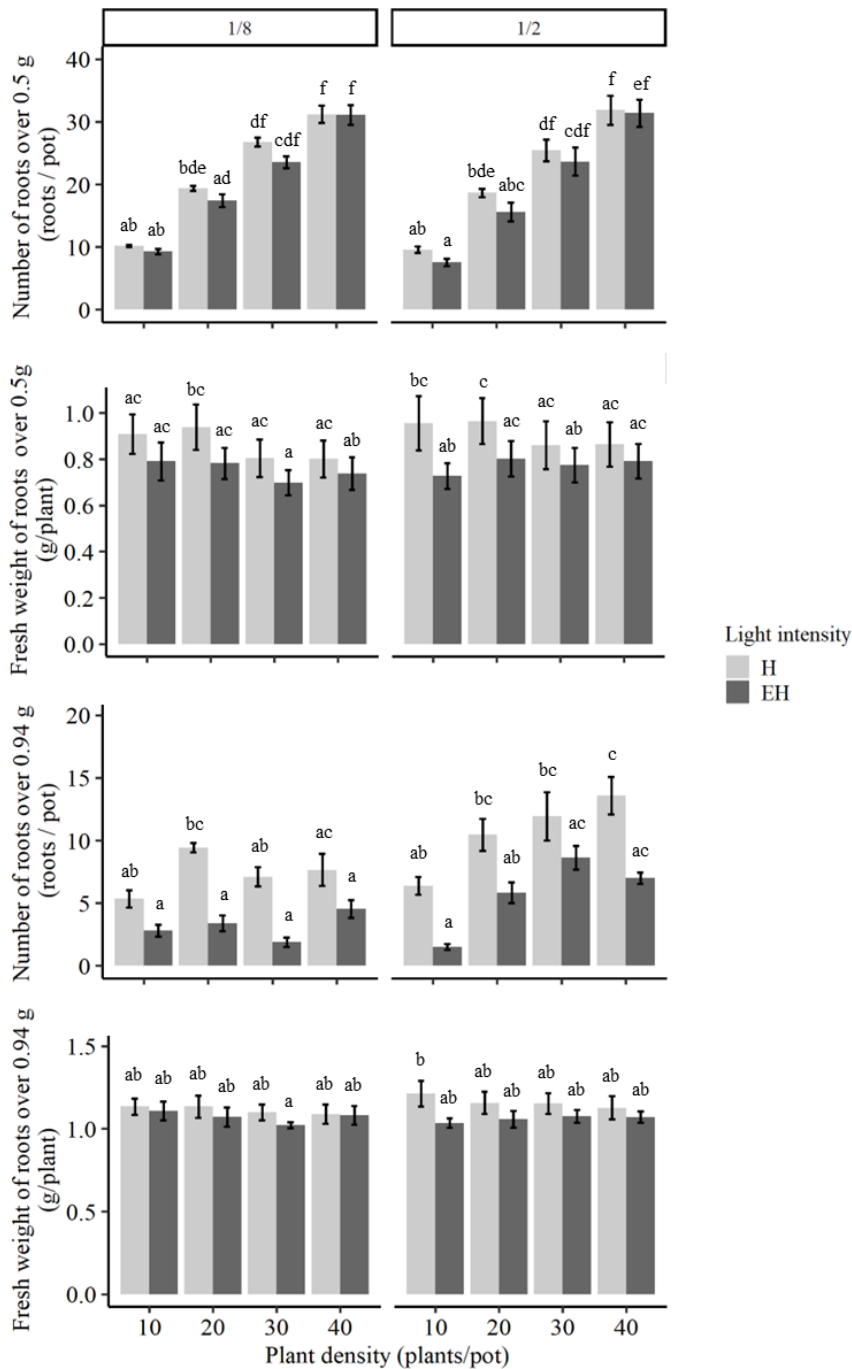


図 3-5 異なる栽植密度、光強度および培養液濃度における採苗本数と苗の新鮮重
 播種後 182 日に測定。凡例の H および EH はそれぞれ PPFD $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ および $370 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ を示す。棒グラフ上部のカラムは培養液濃度（単位）を示す。0.5 g を超える根を国際規格苗，0.94 g を超える苗を優良苗と定義した。グラフは上から順に，1 ポットあたりの国際規格苗の数，国際規格苗の新鮮重，1 ポットあたりの優良苗の数，優良苗の新鮮重を表す。エラーバーは標準誤差を示す (n = 6)。異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定)。

表 3-1 SPAD に対する栽植密度, 光強度および培養液濃度の効果および三元配置分散分析結果

Factors	Levels	SPAD
(1) Plant density (plants / pot)	10	19.3
	20	22.3
	30	24.2
	40	25.5
(2) Light	H	24.6
	EH	21.0
(3) Nutrient (Unit)	1/8	21.9
	1/2	23.8
(1) x (2)	10 x H	20.8
	20 x H	24.2
	30 x H	25.7
	40 x H	27.9
	10 x EH	17.9
	20 x EH	20.4
	30 x EH	22.7
	40 x EH	23.1
(1) x (3)	10 x 1/8	18.1
	20 x 1/8	21.8
	30 x 1/8	23.0
	40 x 1/8	24.6
	10 x 1/2	20.5
	20 x 1/2	22.8
	30 x 1/2	25.4
	40 x 1/2	26.4
(2) x (3)	H x 1/8	23.7
	EH x 1/8	20.1
	H x 1/2	25.6
	EH x 1/2	22.0
ANOVA	(1)	***
	(2)	***
	(3)	***
	(1) x (2)	NS
	(1) x (3)	NS
	(2) x (3)	NS
	(1) x (2) x (3)	NS

Factors のうち Density は栽植密度, Light は光強度, Nutrient は培養液濃度を示す.

NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

表 3-2 Fv/Fm に対する栽植密度, 光強度および培養液濃度の効果および三元配置分散分析結果

Factors	Levels	Fv/Fm
(1) Plant density (plants / pot)	10	0.65
	20	0.66
	30	0.66
	40	0.66
(2) Light	H	0.68
	EH	0.63
(3) Nutrient (Unit)	1/8	0.68
	1/2	0.64
(1) x (2)	10 x H	0.66
	20 x H	0.69
	30 x H	0.70
	40 x H	0.69
	10 x EH	0.63
	20 x EH	0.63
	30 x EH	0.64
	40 x EH	0.62
(1) x (3)	10 x 1/8	0.68
	20 x 1/8	0.68
	30 x 1/8	0.69
	40 x 1/8	0.66
	10 x 1/2	0.62
	20 x 1/2	0.64
	30 x 1/2	0.64
	40 x 1/2	0.66
(2) x (3)	H x 1/8	0.71
	EH x 1/8	0.65
	H x 1/2	0.66
	EH x 1/2	0.61
ANOVA	(1)	NS
	(2)	***
	(3)	***
	(1) x (2)	NS
	(1) x (3)	NS
	(2) x (3)	NS
	(1) x (2) x (3)	NS

Factors のうち Density は栽植密度, Light は光強度, Nutrient は培養液濃度を示す.

NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

表 3-3 葉乾物重, 葉面積および SLA に対する栽植密度, 光強度および培養液濃度の効果および三元配置分散分析結果

Factors	Levels	Leaf dry weight (g / plant)	Leaf area (cm ²)	SLA (cm ² / g)
(1) Plant density (plants / pot)	10	0.035	7.1	205
	20	0.034	7.0	209
	30	0.031	6.5	213
	40	0.031	6.6	219
(2) Light	H	0.034	7.4	227
	EH	0.032	6.2	196
(3) Nutrient (Unit)	1/8	0.033	6.7	208
	1/2	0.033	6.9	215
(1) x (2)	10 x H	0.036	7.7	213
	20 x H	0.036	7.8	222
	30 x H	0.032	7.0	233
	40 x H	0.032	7.2	241
	10 x EH	0.034	6.6	197
	20 x EH	0.032	6.2	195
	30 x EH	0.031	5.9	193
	40 x EH	0.031	6.0	197
(1) x (3)	10 x 1/8	0.035	7.2	206
	20 x 1/8	0.035	7.0	205
	30 x 1/8	0.032	6.4	209
	40 x 1/8	0.032	6.5	214
	10 x 1/2	0.035	7.1	204
	20 x 1/2	0.034	7.0	212
	30 x 1/2	0.031	6.6	218
	40 x 1/2	0.031	6.7	225
(2) x (3)	H x 1/8	0.034	7.1	221
	EH x 1/8	0.033	6.4	195
	H x 1/2	0.034	7.7	233
	EH x 1/2	0.031	6.0	196
ANOVA	(1)	***	*	*
	(2)	**	***	***
	(3)	NS	NS	NS
	(1) x (2)	NS	NS	*
	(1) x (3)	NS	NS	NS
	(2) x (3)	NS	**	NS
	(1) x (2) x (3)	NS	NS	NS

Factors のうち Density は栽植密度, Light は光強度, Nutrient は培養液濃度を示す.

NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし, $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す.

表 3-4 根の新鮮重および乾物重に対する栽植密度、光強度および培養液濃度の効果
および三元配置分散分析結果

Factors	Levels	Root fresh weight (g / plant)	Root dry weight (g / plant)
(1) Plant density (plants / pot)	10	0.81	0.210
	20	0.81	0.214
	30	0.71	0.192
	40	0.69	0.185
(2) Light	H	0.84	0.225
	EH	0.68	0.175
(3) Nutrient (Unit)	1/8	0.76	0.201
	1/2	0.75	0.200
(1) x (2)	10 x H	0.92	0.244
	20 x H	0.93	0.248
	30 x H	0.77	0.212
	40 x H	0.72	0.197
	10 x EH	0.70	0.176
	20 x EH	0.70	0.179
	30 x EH	0.64	0.171
	40 x EH	0.66	0.174
(1) x (3)	10 x 1/8	0.84	0.217
	20 x 1/8	0.82	0.214
	30 x 1/8	0.70	0.188
	40 x 1/8	0.68	0.183
	10 x 1/2	0.78	0.204
	20 x 1/2	0.80	0.213
	30 x 1/2	0.72	0.195
	40 x 1/2	0.70	0.188
(2) x (3)	H x 1/8	0.83	0.223
	EH x 1/8	0.69	0.178
	H x 1/2	0.84	0.227
	EH x 1/2	0.66	0.172
ANOVA	(1)	***	***
	(2)	***	***
	(3)	NS	NS
	(1) x (2)	*	**
	(1) x (3)	NS	NS
	(2) x (3)	NS	NS
	(1) x (2) x (3)	NS	NS

Factors のうち Density は栽植密度、Light は光強度、Nutrient は培養液濃度を示す。

NS, *, **および***はそれぞれ有意差なし、 $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す。

表 3-5 苗の数と重量に対する栽植密度，光強度および培養液濃度の効果および三元配置分散分析結果

Factors	Levels	Criteria : > 0.5 g		Criteria : > 0.94 g	
		Number of seedlings (roots / pot)	Weight of seedlings (g / plant)	Number of seedlings (roots / pot)	Weight of seedlings (g / plant)
(1) Plant density (plants / pot)	10	9.3	0.86	5.1	1.16
	20	17.9	0.88	8.7	1.13
	30	25.0	0.79	9.1	1.11
	40	31.4	0.80	9.4	1.10
(2) Light	H	24.6	0.87	9.7	1.14
	EH	23.5	0.76	5.5	1.07
(3) Nutrient (Unit)	1/8	24.2	0.80	6.7	1.10
	1/2	24.0	0.84	10.0	1.13
(1) x (2)	10 x H	9.9	0.93	5.9	1.18
	20 x H	19.0	0.95	9.9	1.15
	30 x H	26.2	0.83	9.9	1.13
	40 x H	31.5	0.83	11.3	1.11
	10 x EH	8.5	0.76	2.5	1.09
	20 x EH	16.6	0.79	4.8	1.06
	30 x EH	23.6	0.73	6.7	1.06
	40 x EH	31.2	0.76	6.0	1.07
(1) x (3)	10 x 1/8	9.8	0.85	4.5	1.13
	20 x 1/8	18.5	0.87	8.2	1.12
	30 x 1/8	25.3	0.75	6.1	1.08
	40 x 1/8	31.2	0.77	6.5	1.09
	10 x 1/2	8.7	0.86	5.7	1.19
	20 x 1/2	17.4	0.90	9.3	1.13
	30 x 1/2	24.6	0.82	10.9	1.13
	40 x 1/2	31.6	0.83	11.2	1.11
(2) x (3)	H x 1/8	24.8	0.85	7.8	1.11
	EH x 1/8	23.5	0.74	3.5	1.07
	H x 1/2	24.4	0.90	11.3	1.15
	EH x 1/2	23.5	0.78	6.9	1.07
ANOVA	(1)	***	**	***	NS
	(2)	***	***	***	***
	(3)	NS	NS	***	NS
	(1) x (2)	*	NS	NS	NS
	(1) x (3)	NS	NS	**	NS
	(2) x (3)	NS	NS	NS	NS
	(1) x (2) x (3)	NS	NS	NS	NS

Factors のうち Density は栽植密度，Light は光強度，Nutrient は培養液濃度を示す。

NS, *, ** および *** はそれぞれ有意差なし， $p < 0.05$, $p < 0.01$ および $p < 0.001$ を示す。

第4章 養液栽培苗の評価

4.1 緒言

第2章および第3章では、PFALで1/8から1/2単位の圃試処方培養液を用いて養液栽培することで国際規格や韓国における甲参の重量規格を満たす1年生オタネニンジンの育苗が可能であることが明らかとなった。しかし、実用においては苗自体の品質ではなく定植後の生育や成分が重要である。

圃場に定植する場合、温室で育苗された1年生の養液栽培苗を4月に圃場に定植して半年後に調査し、圃場や培養土で育苗した苗に比べて、養液栽培苗では根の赤変（赤さび）や腐敗が多発し、赤さびの発生率が83.5%であったとの報告があるが、用いられた苗には定植前から赤さびが発生していたうえ、詳細な育苗方法は記載されていないため、検証の余地がある（Park et al., 2017）。

また、オタネニンジンにおける育苗時の培養液濃度の違いが定植後の生育に及ぼす影響についての報告は知る限り見当たらない。コンニャクでは、植え付け時の種球における窒素含量の多寡がその後の生育の良否に影響することが知られている（稲葉, 1992）。また、イチゴの花芽形成には体内窒素濃度が影響しており、窒素濃度が高いと低温感性が低下することや、炭素/窒素比（以下、C/N比）が小さいと花芽分化が抑制されることが知られている（古谷ら, 1988; 奥ら, 2013）。オタネニンジンにおいても育苗時の培養液濃度の違いが体内窒素濃度やC/N比を変化させ、定植後の生育や休眠中の低温感性に影響を及ぼすかもしれない。

オタネニンジンにおいて代表的な有効成分であるギンセノシドは、他種に含有されるものを含めると約300種類が報告されているが、オタネニンジンの根においてはギンセノシドRb₁、Rg₁、これらのマロニル体およびReが主であるとされる（Hou et al., 2021）。各種ギンセノシドが持つ生理活性は種類によって一部異なり（Cheng et al., 2005）、また各ギンセノシドの適量を規定することは困難であるものの（Sievenpiper et al., 2003）、Ginseng sproutにおいては総ギンセノシドおよびギンセノシドRb₁、Rd、ReおよびRg₁が生薬と同等かそれ以上に多く含まれることが報告されている（Lee et al., 2020）。しかしながら、定植後のギンセノシド含量に対する育苗法の影響については知る限りでは報告がない。

本章では1年生苗の利用用途として、植物工場内で数週間栽培することでGinseng sproutとして利用する場合と、圃場に定植して数年間栽培し生薬として利用する場合を想定した。異なる培養液濃度で育苗した養液栽培苗と、圃場で採取した苗とを栽培室内で養液栽培し、あるいは圃場で栽培した場合の定植後の2年生時の生育を確認するとともに、Ginseng sproutのギンセノシド含量を確認し、野菜や生薬生産のための苗として適用できうるかについて評価および考察を進めた。

4.2 制御環境下における定植後短期間の生育およびギンセノシド含量の評価

4.2.1 材料および方法

試験区に共通の材料および方法

試験区によって由来の異なる1年生苗を用いた。ただし、全ての苗は2020年7月30日から芽切り処理した種子に由来し、遺伝的背景は同じであった。高さ22.5cm、上面の直径10.5cm、容量1.6Lのポリエチレン製ポット（TOロングポット，株式会社東海化成）にロックウール細粒綿を詰め、2022年5月3日に1株ずつ定植し、栽培室で栽培した。PPFDは $90\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ とし、pH 6.5程度に調節した1/8単位の培養液を毎週1回、1ポットにつき200mLずつ手灌液し、排液は全て廃棄した。定植後35日に収穫した。

試験区

苗の由来を要因として3試験区を設けた。圃場で得た苗（圃場区）と養液栽培した苗を用いた。養液栽培した苗では、育苗時に給液した培養液濃度が1/8単位（1/8区）および1/2単位（1/2区）の2試験区を設け、合計3試験区とした。1ポットを1反復とし、各試験区18反復を設け、乱塊法で配置した。圃場で得た苗（圃場区）は、長野県のオタネニンジン生産者の圃場において2021年3月に播種されたもので、2022年4月6日に採取した後、試験開始まで1°Cの冷蔵庫（HCR-180A-ML，ホシザキ株式会社）で保管した。養液栽培した苗は3.2.1と同様の環境条件のもとで2021年6月22日に1ポットあたり25粒播種し栽培したもので、栽培時の光強度はPPFD $220\ \mu\text{mol m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ 、培養液濃度は1/8単位または1/2単位であった。播種後185日に収穫して鹿沼土に埋め、試験開始まで2°Cのインキュベーター（MIR-153，三洋電機株式会社）で130日間保管した。

測定項目

定植時の苗の新鮮重を測定した。収穫までの間、週に1~2回ポットを目視して萌芽率を記録した。収穫時の生育調査として、シュートの有無をもとに萌芽率を求め、最大小葉長、シュートおよび根の新鮮重を各試験区18反復で測定した。新鮮重を測定後、サンプルを-80°Cで凍結させ、凍結乾燥し、分析可能な量のサンプルを対象としてシュートおよび根のギンセノシドを1株ずつUPLCによって定量した。ここでは、第十八改正日本薬局方および中華人民共和国薬典2020年版で人参に対して規定されているギンセノシドRb₁、ReおよびRg₁に加え、Rb₂およびRcも測定対象とした。なお、各ギンセノシドの構造式を図4-1に示した。定量値をもとに、新鮮重および凍結乾燥物1gあたりのギンセノシド含量を部位別に算出した。結果的に、ギンセノシドを分析したサンプル数はシュートでは圃場区、1/8区および1/2区においてそれぞれ17、17および1反復であり、根では全試験区とも18反復であった。萌芽率以外の項目において、Tukey-Kramer検定を行った。ただし、ギンセノシド含量のうち、1/2区のシュートでは1サンプルの分析であったため、検定対象外とした。

ギンセノシドの定量条件

各株のシュートおよび根をロッドミル (TI-100, CMT 株式会社) で粉碎し, シュートでは 0.05 g, 根では 0.01 g を秤量して分析用サンプルとした. 分析用サンプルにメタノール/水混液 (3 : 2) 1 mL を加えて 30 分間超音波抽出した. 上澄み液を全量とり, 6 mol L⁻¹ 水酸化ナトリウム溶液 0.5 mL を加えて 30 分間放置した後, 6 mol L⁻¹ 塩酸 0.5 mL を加え, メタノール/水混液 (3 : 2) で 2 mL にメスアップして試料溶液とした. 試料溶液 5 μ L ずつを正確にとり, 次の条件で液体クロマトグラフィーによる分析を行った.

LC システム : ACQUITY™ UPLC® H-Class システム (日本ウォーターズ株式会社)

検出器 : 紫外吸光光度計 (測定波長 203 nm)

カラム : ACQUITY™ UPLC® BEH C8 2.1 \times 100 mm, 1.7 μ m, (日本ウォーターズ株式会社)

カラム温度 : 30°C

移動相 : 水とアセトニトリルを用い, 各移動相の混合比は表 4-1 の通りに設定し, 濃度勾配を制御した.

流量 : 毎分 0.65 mL

なお, 各種ギンセノシド標準溶液には株式会社ツムラ提供品を用いた.

4.2.2 結果

定植時の苗新鮮重

定植時の苗新鮮重は, 圃場区, 1/8 区および 1/2 区の順に, それぞれ 0.93 g, 0.78 g および 0.63 g であった (表 4-2). 圃場区は 1/2 区よりも有意に重かった.

萌芽率, 最大小葉長, シュートおよび根の新鮮重

萌芽は圃場区で最も早く, 定植後 6 日から 13 日にかけて 88.9% が萌芽した (図 4-2). 次いで 1/8 区が萌芽し, 萌芽は圃場区より緩やかに進行した. 1/2 区では定植後 27 日から萌芽がみられた. 収穫物の萌芽率は圃場区と 1/8 区では 94.4% であったが, 1/2 区では低く 55.6% であった (表 4-2). 最大小葉長, シュートおよび根の新鮮重はいずれも圃場区, 1/8 区および 1/2 区の順に高く, 最大小葉長はそれぞれ 57.5 mm, 31.4 mm および 5.2 mm であり, 各試験区間に有意差が認められた. シュート新鮮重は 1.01 g, 0.31 g および 0.06 g であり, また, 根新鮮重は 1.00 g, 0.70 g および 0.60 g で, いずれも圃場区で有意に高かった.

ギンセノシド含量

新鮮重 1 g あたりでは, 各部位における試験区間のギンセノシド含量に有意差は認められなかった. (図 4-3). 凍結乾燥物 1 g あたりでは, 根において 1/8 区が圃場区よりも有意に高いギンセノシド Rb₁ 含量を示し, またシュートにおいて 1/8 区が圃場区よりも有意に高い

ギンセノシド Rg₁ 含量を示したが、これら以外には各部位のギンセノシド含量において試験区間で有意差は認められなかった (図 4-4)。ギンセノシド Rb₁ はシュートよりも根に多い傾向があり、それ以外の 4 種類のギンセノシドでは根よりもシュートで多い傾向があった。

4.2.3 考察

本実験では養液栽培で得られる 1 年生苗を野菜として利用できる可能性について確認するために、圃場で得られた苗を参考の比較対象としつつ、定植後 5 週におけるギンセノシド含量および生育を確認した。

新鮮重 1g あたりのギンセノシド含量は、圃場区とそれ以外の試験区との間に有意差が認められず、また、シュートのギンセノシド Re を除き、養液栽培苗で高い傾向がみられた。したがって、養液栽培苗を用いた場合でも、同量の Ginseng sprout を食することで圃場苗を用いた場合と同程度かそれ以上のギンセノシド含量を摂取できると考えられる。

シュートと根の新鮮重は Ginseng sprout の収量に直結する要素であるが、圃場区のシュート新鮮重と根新鮮重は、1/8 区と比較するとそれぞれ 3.3 倍および 1.4 倍であり、1/2 区と比較すると 16.9 倍および 1.7 倍であり、養液栽培苗を用いることで収量が低下する可能性が示唆された。特に、1/2 区は萌芽率が他の試験区よりも低く 55.6%であったことに加え、小葉長も 5.2 mm と小さく、シュートをほとんど得られなかったため、今回の条件では Ginseng sprout の栽培には適さなかった。1/2 区では萌芽が遅く、萌芽率も低かったため葉が展開中であつたり、光合成ができず根が肥大しなかった影響が大きかったと考えられる。加えて、本実験で用いた苗の重さは育苗条件によって異なっており、1/2 区では圃場区よりも有意に小さかった。苗の大きさは翌年以降の生育に影響することも (Zhang et al., 2018)、1/2 区の小葉長、シュート新鮮重および根新鮮重が小さかった一因と考えられる。圃場区と 1/8 区間での生育の差異にも、苗の重さの影響だけでなく、1/8 区で比較的萌芽が遅かったことが影響した可能性がある。

定植時の目視確認において芽は既に肥大していたことから、本実験で認められた萌芽率の試験区間差は休眠の深さの違いに起因すると考えられる。11 月に圃場から採取した 2 年生苗においては、休眠は 0 から 10°C の処理によって打破され、特に 3°C で 120 日間の処理が有効とされるが、温度処理の期間が短いと萌芽率は低下し、また定植後萌芽までの期間が長くなる (松本ら, 2011)。本実験では圃場区が最も早く高い萌芽率を示しており、これは圃場において 11 月から約 5 か月間の低温を受け、十分に休眠が打破されていたためだと考えられる。一方、養液栽培苗では萌芽の斉一性が悪く、1/2 区では萌芽率も低かったことから、2°C 130 日間の処理では十分に休眠打破されていなかったと考えられる。養液栽培苗は低温処理前まで 20°C で栽培されていたために、比較的地温が低下している 11 月に圃場で採苗する場合よりも長い低温期間が必要であった可能性がある。

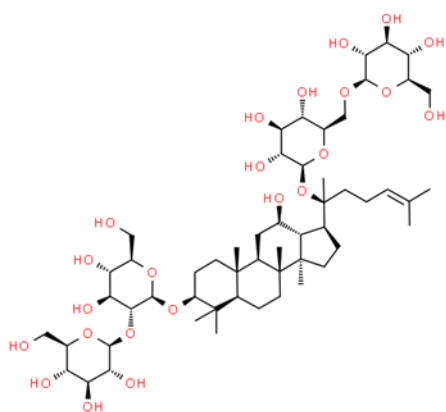
養液栽培苗においては、育苗時の培養液濃度が 1/8 単位の場合に、1/2 単位よりも萌芽が早かった。休眠前の培養液濃度が休眠の深さに及ぼす影響について研究した例は調べた限り見当たらなかったが、イチゴの花芽形成では体内窒素濃度が高いと低温感応性が低下することや、炭素/窒素比（以下、C/N 比）が小さいと花芽分化が抑制されることが知られている（古谷ら, 1988; 奥ら, 2013）。オタネニンジンにおいて、育苗時の培養液濃度が高いほど 1 年生苗に含まれる総窒素含量も高まることから（Park et al., 2020）、比較的高い窒素濃度で育苗した 1/2 単位区において C/N 比が小さくなり、低温感応性が低下して、休眠が定植時に比較的深い状態であった結果、萌芽率が低下したのかもしれない。

植物体内の C/N 比は様々な代謝経路を左右する要因であり、オタネニンジンの近縁種である *Panax notoginseng* では、窒素施用量の増加がサポニン合成経路上の遺伝子発現量の低下や β グルコシダーゼ活性の増加等の複合的な影響を及ぼしてサポニン含量を減少させることが示唆されている（Zhang et al, 2020）。その際の遺伝子発現量の結果からは、全てのギンセノシド生合成の上流にあたる基質（2,3-オキシドスクアレン）が減少すると考えられ、全てのギンセノシドが窒素施用量の影響を受ける可能性がある。オタネニンジンにおいても、窒素欠乏条件下ではギンセノシド含量が高まることが報告されている（Park et al., 1986）。本実験では有意差はなかったものの、凍結乾燥物 1 g あたりのギンセノシド含量はシュートのギンセノシド Re を除き 1/8 区で 1/2 区よりも高いギンセノシド含量となる傾向が認められた。このことは既存の知見と整合性があるように思われる。したがって、育苗時の窒素施与量や培養液濃度は定植後のギンセノシド含量にも影響するかもしれない。

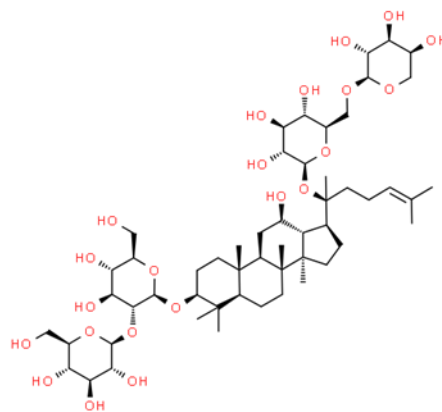
休眠には植物ホルモンであるジベレリンやアブシジン酸が大きく関与し、休眠から覚醒する過程でアブシジン酸は低下し、ジベレリンが増加することが知られている（Fadón et al., 2020）。本実験の萌芽率からは、休眠の程度は 1/8 区よりも 1/2 区で深かったと考えられ、1/2 区では内生のアブシジン酸は高く、ジベレリンは低い状態にあったと考えられる。オタネニンジンにおいてアブシジン酸はギンセノシドの含量を低下させ（Li et al., 2022）、ジベレリンは浸漬処理によりギンセノシド含量を高めるとの報告がある（Hong et al., 2021）。これらの情報は、本実験において 1/8 区よりも 1/2 区で萌芽率やギンセノシド含量が低い傾向にあったことと一致する。したがって、植物ホルモンが休眠のみならずギンセノシド含量に影響した可能性がある。また、ジャスモン酸にはギンセノシド生合成を高める作用があるが（Lu et al., 2018）、植物体内では他の植物ホルモンと協調しており、例えば環境ストレスによる ABA 合成はジャスモン酸の合成を促進する（Liu & Timko, 2021）。このように、培養液濃度などの育苗時の環境条件の違いは様々な植物ホルモンの挙動を変化させ、ギンセノシド含量に影響する可能性がある。

今後、養液栽培苗を用いた場合の萌芽やギンセノシド含量を安定化させるためには、育苗時の培養液濃度、特に窒素濃度が休眠の深さや萌芽後のギンセノシド含量に及ぼす影響について明らかにするとともに、適切な培養液濃度管理や休眠打破条件について検討を深めることが必要だと考えられる。

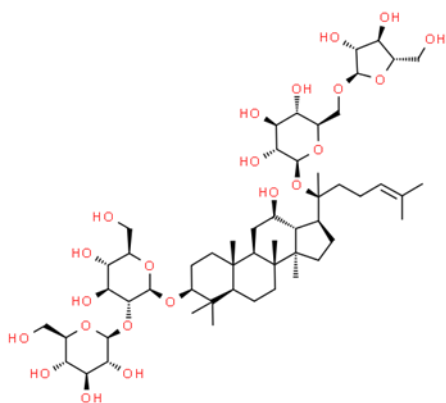
一般に苗の状態は栽培条件のほか、様々な要因でばらつく。また、本実験において用いた苗の大きさや休眠の程度は試験区によって異なると推察される。そのため圃場苗と養液栽培苗の生育や成分含量の優劣は本実験の結果のみで断定できるわけではない。しかし、本実験結果からは、養液栽培苗は定植後も萌芽可能であることや、Ginseng sprout のギンセノシド含量に問題は生じないことが示唆された。また、育苗時の培養液濃度の違いが休眠の深さや定植後の生育に影響しうることが示唆された。



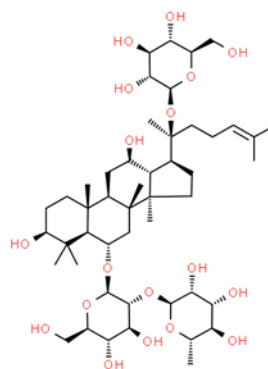
Rb₁



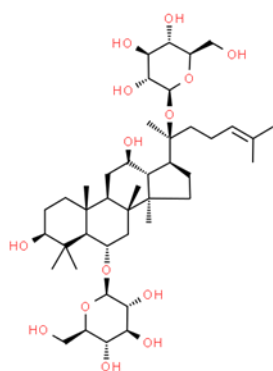
Rb₂



Rc



Re



Rg₁

図 4-1 ギンセノシド Rb₁, Rb₂, Rc, Re および Rg₁ の構造

ChemSpider (Royal Society of Chemistry, 2023) より引用.

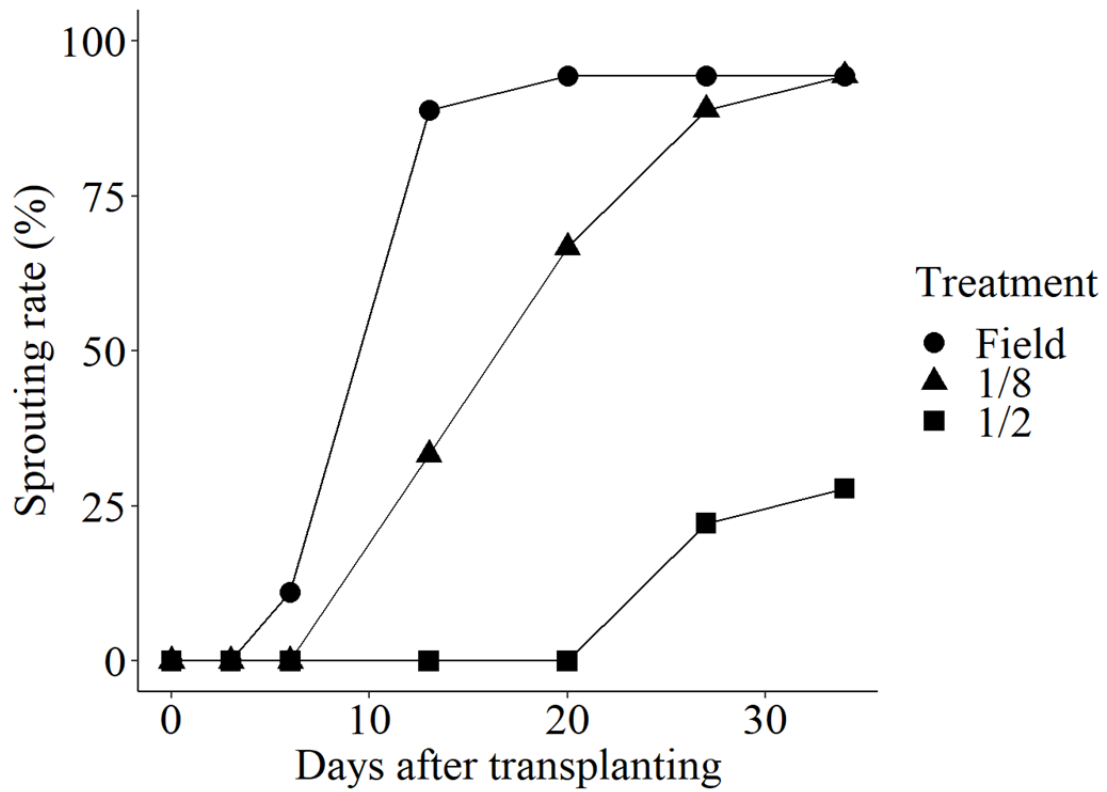


図 4-2 異なる培養液濃度および方法で育苗した苗の定植後における萌芽率
栽培中に 18 株のうち萌芽を認めた株数から算出

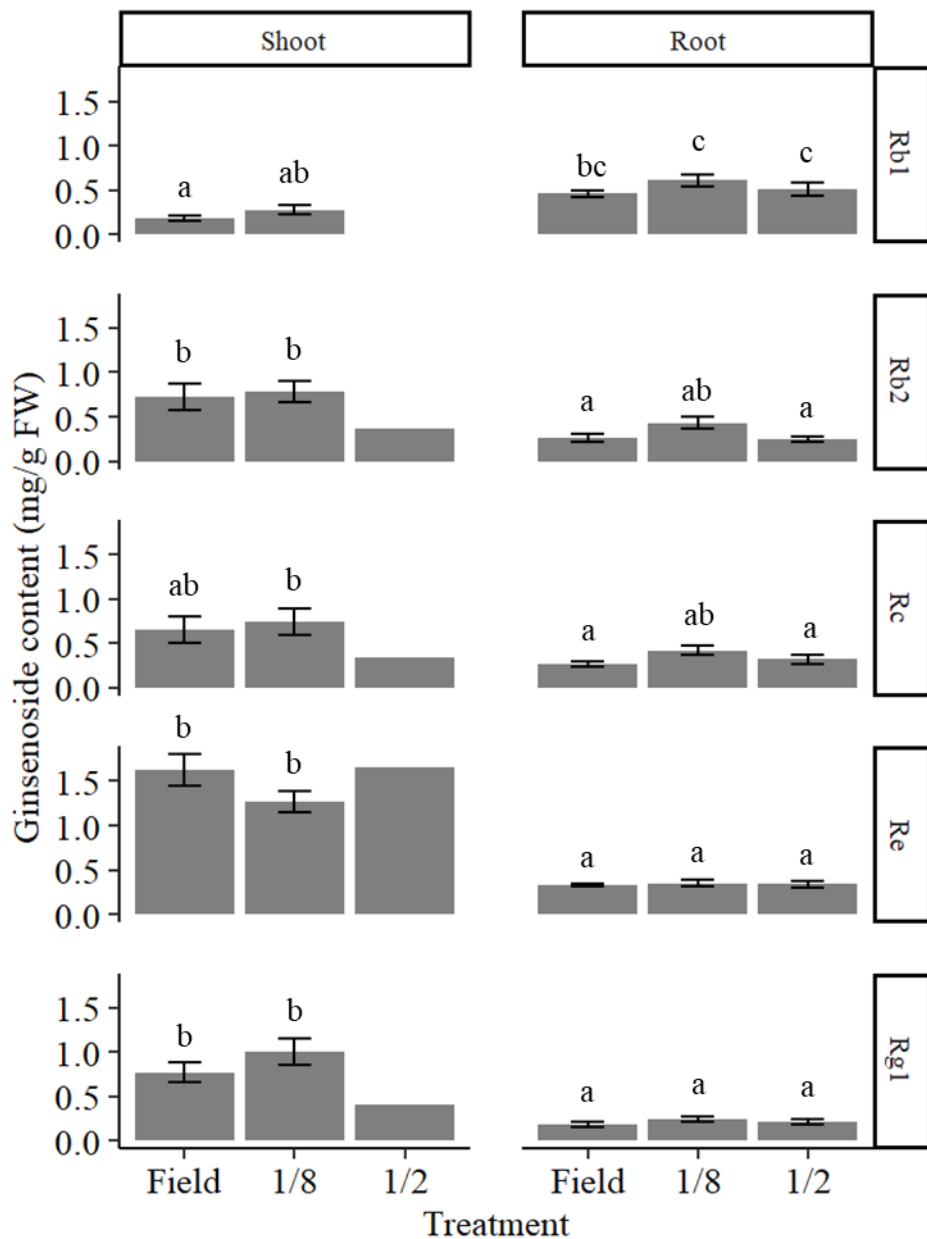


図 4-3 異なる培養液濃度および方法で育苗した苗の定植後におけるギンセノシド含量 (ロックウール定植後 5 週, 新鮮重 1 g あたり)

棒グラフの上側のカラムは分析対象部位を示し, Shoot はシュート, Root は根を表し, 右側のカラムはギンセノシドの種類を表す. 縦軸は新鮮重 1 g あたりの含量. エラーバーは標準誤差を示す (n = 16~18). 同一種類のギンセノシドにおける異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定).

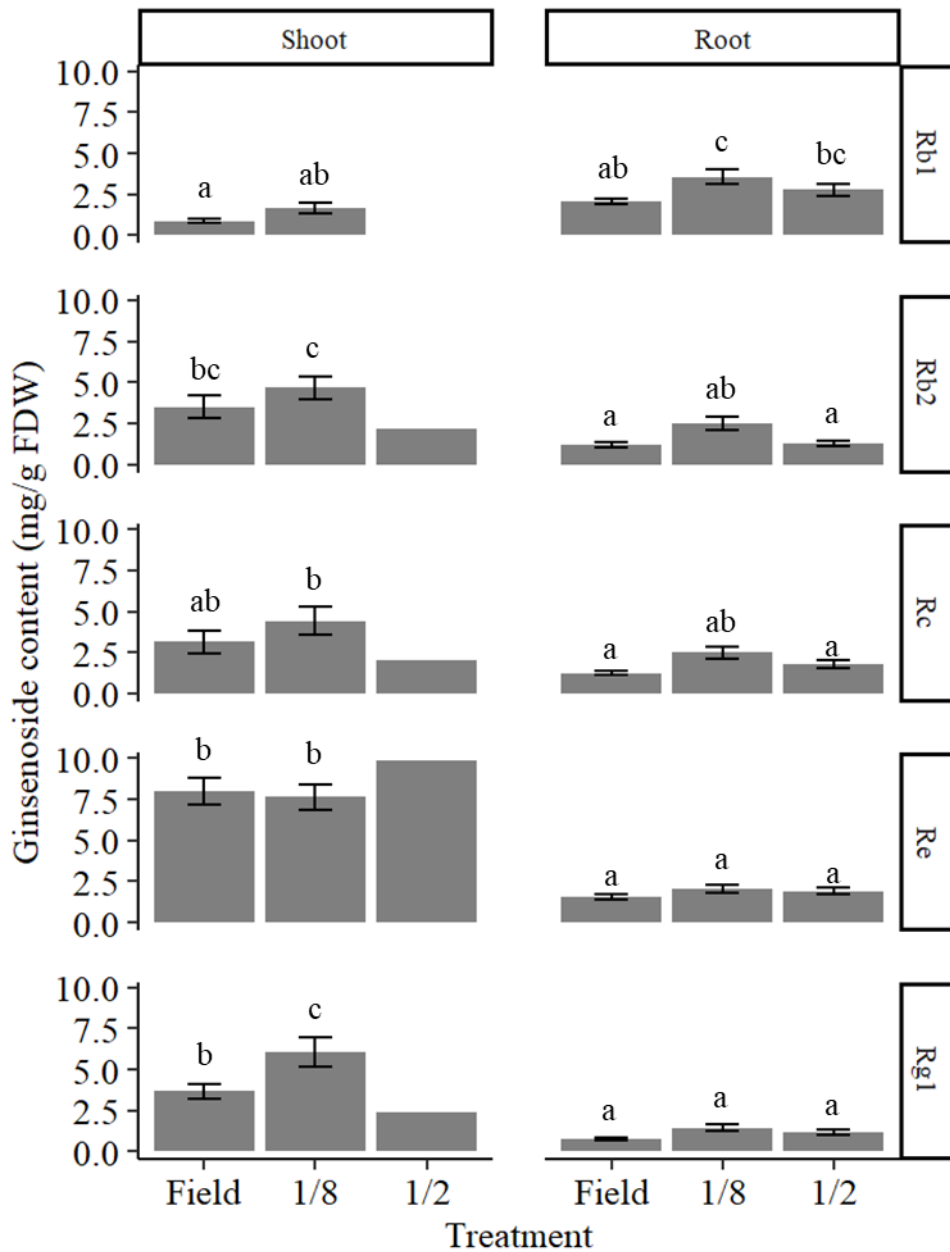


図 4.4 異なる培養液濃度および方法で育苗した苗の定植後におけるギンセノシド含量 (ロックウール定植後 5 週, 凍結乾燥重 1 g あたり)

棒グラフの上側のカラムは分析対象部位を示し, Shoot はシュート, Root は根を表し, 右側のカラムはギンセノシドの種類を表す. 縦軸は凍結乾燥物 1 g あたりの含量. エラーバーは標準誤差を示す (n = 16~18). 同一種類のギンセノシドにおける異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定).

表 4-1 ギンセノシド分析における移動相の条件

Time (min)	Water (vol %)	Acetonitrile (vol %)
0 ~ 0.5	85	15
0.5 ~ 2.0	85→80	15→20
2.0 ~ 7.0	80	20
7.0 ~ 7.5	80→75	20→25
7.5 ~ 24.0	75→60	25→40
24.0 ~ 26.0	60→15	40→85
26.0 ~ 28.0	15	85
28.0 ~ 28.5	15→85	85→15
28.5 ~ 30.0	85	15

表 4-2 定植時の苗新鮮重および収穫時の萌芽率, 最大小葉長, シュートおよび根の新鮮重

	Sprouting rate (%)	Leaflet length(mm)	Fresh weight (g/plant)					
			Seedling		Shoot		Root	
Field	94.4	57.5±3.7 c	0.93±0.06 b		1.01±0.10 b		1.00±0.08 b	
1/8Unit	94.4	31.4±2.7 b	0.78±0.03 ab		0.31±0.04 a		0.70±0.04 a	
1/2Unit	55.6	5.2±0.8 a	0.63±0.05 a		0.06±0.01 a		0.60±0.05 a	

萌芽率は収穫後のシュートの有無により判別した値.

萌芽率は平均, その他の項目は平均±標準誤差 (n = 10~18). 同一の測定項目における異なるアルファベット間に有意差あり ($p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定).

4.3 圃場における定植後の生育の評価

4.3.1 材料および方法

試験区に共通の材料および方法

試験区によって由来の異なる1年生苗を、長野県北佐久郡立科町の栽培圃場に2022年4月6日に定植した。条間と株間は15 cmとし、苗は約30°に傾け、根頭部が深さ3 cmになるよう植え付けた。畝の表面はわらでマルチングし、栽培農家の慣行に従い、金属パイプと遮光ネットからなる栽培小屋を設置して栽培した。追肥は行わず、2022年10月6日に地上部つきのまま1株ずつ収穫した。

試験区

用いた材料および試験区の設定は本章4.2.1と同様とし、材料の由来が異なる圃場区、1/8区、1/2区の計3試験区を設けた。1株1反復として各試験区12反復を設け、乱塊法で配置した。

測定項目

収穫時の最大小葉長、主根長、シュートおよび根の新鮮重を測定した後、目視により変色指数および腐敗指数を測定した。変色指数は、主根の変色面積に応じて、なし、軽症および重症の3段階で評価し、それぞれを0、1および2で点数化した値とした。変色指数の判定基準は、主根に占める赤変部の面積が軽症と重症でそれぞれ1/3未満および1/3以上であることとした。腐敗指数は根における腐敗の程度に応じて、なし、軽症および重症の3段階で評価し、軽症および重症の判定基準は、腐敗部の長さが1 mm未満および1 mm以上であることとした。最大小葉長、主根長、シュートおよび根の新鮮重ではTukey-Kramer検定を行い、変色指数および腐敗指数ではFisherの正確確率検定を行った。

4.3.2 結果

最大小葉長

最大小葉長は圃場区、1/8区および1/2区の順に長く、それぞれ77、66および42 mmとなり、各試験区間に有意差が認められた(図4-5)。

主根長

主根長は圃場区と1/8区で等しく144 mmであり、次いで1/2区が92 mmであった(図4-5)。1/2区とその他の2試験区との間に有意差が認められた。

シュートおよび根の新鮮重

シュート新鮮重は圃場区、1/8区および1/2区の順に重く、それぞれ0.98 g、0.69 gおよび0.38 gであり、根新鮮重は2.50 g、2.10 gおよび0.75 gであった(図4-5)。シュートおよび

根の新鮮重の両方で、各試験区間に有意差が認められた。

変色指数

変色指数の平均値は圃場区、1/8区および1/2区の順に高く、それぞれ1.2、0.7および0.2で、試験区による影響は有意 ($p < 0.01$) であった (図 4-6)。

腐敗指数

腐敗指数の平均値は圃場区、1/2区および1/8区の順に高く、それぞれ1.0、0.4および0.6で、試験区による影響に有意性は認められなかった (図 4-6)。

4.3.3 考察

本実験では、ロックウールを用いた養液栽培によって得た1年生苗が将来的に生薬栽培に利用できるかを判断するために、圃場に定植して生育を確認した。

最大小葉長やシュート新鮮重には各試験区間で有意差が認められ、圃場区、1/8区および1/2区の順であった。これは、本章4.2で得られた結果と同様である。本実験では萌芽率の推移を調査していないが、本章4.2と同様の材料を用いたことから、1/8区や1/2区では用いた苗が小さかったことや、萌芽が遅れたことによって地上部の生育が劣り、結果として根の生育にも影響したと考えられる。1/8区では、根新鮮重は圃場区よりも有意に小さかったものの、主根長は圃場区と同程度であり、養液栽培苗でも根は圃場定植後に正常に伸長すると考えられる。

変色指数や腐敗指数は圃場区で最も高かったが、養液栽培苗では低い傾向にあり、養液栽培苗で赤さびや腐敗が多発するわけではなかった。特に変色指数は試験区による影響が有意であり、養液栽培苗で赤さびや腐敗が多発するとした従来の報告とは異なる結果であった (Park et al., 2017)。これは育苗時の栽培方法の違いに起因する可能性があり、養液栽培苗でも圃場への定植は可能な場合があることが明らかとなった。

赤さびの原因は、高い土壌水分、病原菌や高い土壌中アルミニウム濃度であることが示唆されている (Farh et al., 2018; Lu et al., 2020; You et al., 2015; Zhou et al., 2017)。既報と異なり養液栽培苗で赤さびが多発しなかったことや、1/8区よりも1/2区で赤さびが少なかったことから、育苗時の栽培方法によって苗の性質が変化し、圃場定植後の病原菌や金属ストレスなどへの反応が変化することが示唆された。

本章4.2.3で述べたように、本実験の結果のみで圃場苗と養液栽培苗の優劣を断定できるわけではないが、本実験では、ロックウールを用いた養液栽培によって得た1年生苗は、圃場へ定植後も生育可能であることが示唆された。

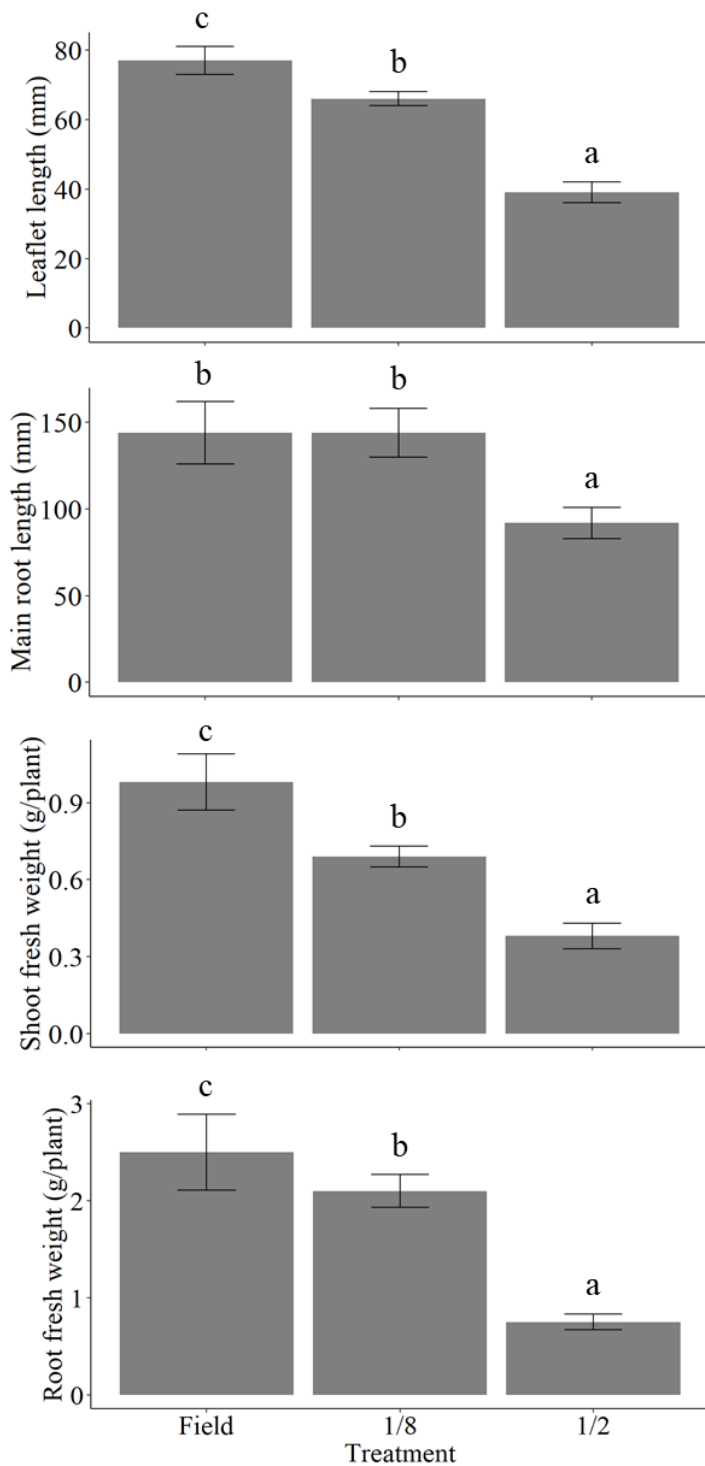


図 4-5 異なる培養液濃度および方法で育苗した苗の定植後における小葉長，主根長，シュート新鮮重および根新鮮重（圃場定植後 183 日）
 エラーバーは標準誤差を示す（ $n=8\sim 12$ ）。同一項目において異なるアルファベット間に有意差あり（ $p < 0.05$, Tukey-Kramer 検定）。

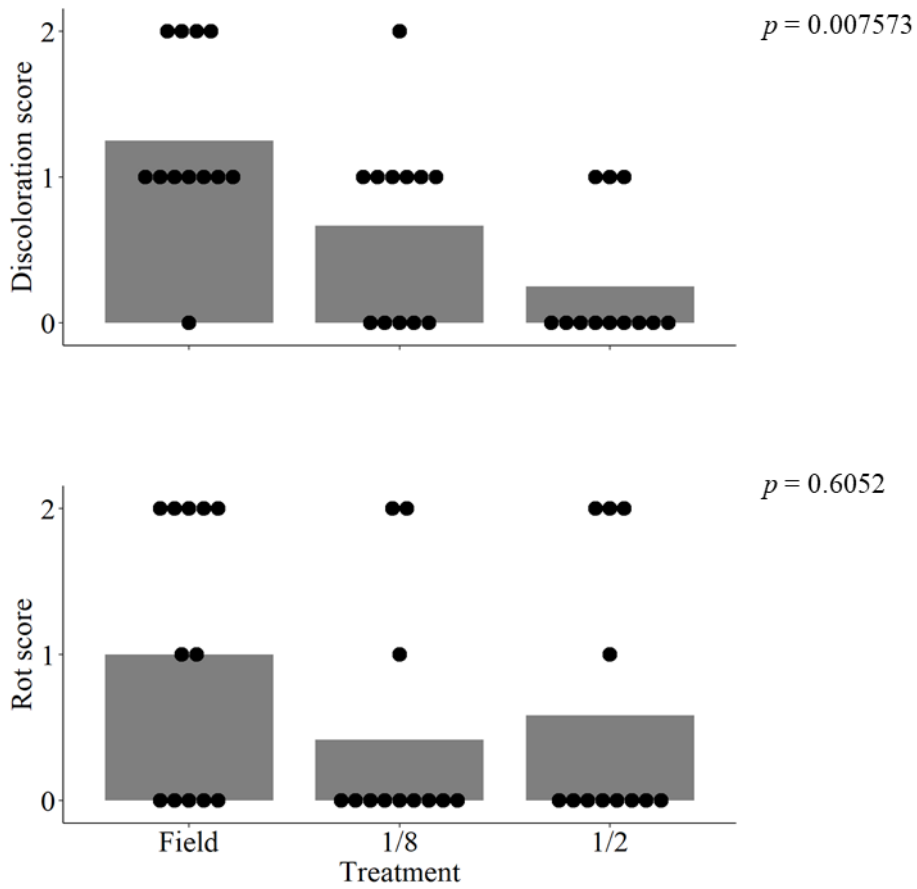


図 4-6 異なる培養液濃度および方法で育苗した苗の定植後における変色指数および腐敗指数（圃場定植後 183 日）

棒グラフは平均値，点は観測値を示す（ $n = 12$ ）．各グラフ右側の p 値は Fisher's exact 検定の結果を示す．

第5章 総合考察

オタネニンジンには主要な有効成分としてギンセノシドを含む多年生落葉草本薬用植物であり、循環器系疾患、肥満、糖尿病、中枢神経系障害など、幅広い対象に効果があるとされている (Kim, 2018; Ratan et al., 2021; Shishtar et al., 2014; NCCIH, 2020). 医薬品 (生薬)、健康食品やサプリメントの原料および野菜などとして利用され、日本においては漢方薬の原料生薬「人参」として最も多く利用される。人参は医薬品である漢方薬の供給の安定性に影響するが、オタネニンジンの栽培には多くの課題があり、価格や供給量の安定性には懸念がある。オタネニンジンの栽培においては移植する苗の質が特に重要である (Zhang et al., 2018; 大隅, 1979). また、近年は1年生苗を定植後短期間で収穫して植物体全体を野菜 (Ginseng sprout) として利用する技術が開発され、食としての普及も期待されるが、そこでは苗の清浄性も求められる。そこで、本研究では将来的なオタネニンジンの栽培安定化に向けて、安定的な栽培が期待できる人工光を用いた閉鎖型植物工場 (PFAL) での育苗に注目した。第2章において、PFAL での育苗において望ましい環境条件を検討した。一般的に植物工場は高コストが課題であり、苗単価の低減のためには苗収量を増やす必要があるため、第3章において苗の収量を慣行よりも増やす手段として培養液濃度や光強度を制御したうえでの密植の効果を検討した。第4章では、養液栽培した苗が将来的に利用できるかを評価するために、本圃や PFAL 下において、養液栽培苗の定植後の生育やギンセノシド含量を確認した。

本研究では、基本的な栽培条件を決定するために、第2章において培地の種類、気温と培地温、光強度および培養液濃度が生育に及ぼす影響を確認した。過去の文献から、PFAL 条件において使用された培地である鹿沼土細粒やピートとパーライトの混合培地 (PP 培地) に加え、新たにロックウール細粒綿を用い、3種類の培地で1年生オタネニンジンの生育を比較したところ、ロックウール細粒綿において根の肥大が良好であり、根長も国際規格の 10 cm 以上を満たしたことから、ロックウール細粒綿を有望な培地とみなし、本研究における基本培地とした。本研究の PP 培地における根長は約 10 cm であり、ロックウール細粒綿においても PP 培地と同程度の根長であった。温室において PP 培地を利用し、土壌水分張力 7 kPa を灌水開始点として養液栽培した先行研究においては、根長が 17.5 cm に達していた (Park et al., 2020)。本研究では PP 培地において、用いた容器や灌水管理が Park らと異なったために加湿となり根長が短くなった可能性が高い。ロックウールは培養液と空気を好適な比率で保持できるが、給液量が多いと加湿や酸欠を起こす (小川, 2012)。粒状綿はマットに比べ粗孔隙が多く加湿になりにくいとされるものの、本研究においてロックウール細粒綿でも根長が PP 培地と同様に短かったことから、加湿であった可能性はある。陰生植物かつ葉面積の小さいオタネニンジンでは蒸散量が一般的な作物に比べて小さいと思われ、培地の土壌水分張力が常に 3.8 kPa 以下で低く推移したことから、週 1 回 300 mL での給液は多すぎたのかもしれない。ロックウールにおける培地水分の適切な管理法を今後明らかにすることで、根の伸長を確保しつつ肥大させることができるかもしれない。

ただし、ロックウールでは廃棄にかかるコストや環境に対する負荷が大きいことが問題視されており、農業廃棄物などを代替培地として利用する研究が進められている (Gruda, 2019; 市川・高城, 1999). オタネニンジンの養液栽培においては根の肥大に適した根域が必要であり、Ebb-and-Flow 法によって PP 培地で 1 株ずつ育苗する場合には深さ 20 cm 以上、直径 3 cm 以上の容器が適するとされ (Lee et al., 2021), 必要となる培地の量やコストは花きや果菜類よりも多くなると想定される. 代替培地に農業廃棄物を流用することは、環境負荷低減に加えて培地のコスト削減にもつながりうるため、将来的な応用に向けて代替培地を検討する必要性は大きいと考えられる. また、キュウリにおいてロックウールスラブは 4 作まで再利用可能で、それ以降の収量は 15% 程度減少することが報告されており、減収の原因は病害ではなく培地の物理性の変化であると指摘されている (牛田・松崎, 1990). オタネニンジンにおいてもコスト低減にむけてロックウールの連用を検討する余地はある. また、本研究では深さ 25 cm のポットを用いたが根長は 10 cm 程度しかなく、余分な培地が多かった. 今後、必要最小限の培地で栽培することを想定した検討が求められる.

本研究において、ロックウール細粒綿を用いて人工光条件下で栽培した場合、気温 20°C では気温 25°C よりも生育が優れ、気温 20°C のもとでは培地温 20°C および 25°C との間で生育差は認められなかった. これは光合成適温や葉の老化速度が気温に大きく影響されるためだと考えられた. したがって、オタネニンジンの養液栽培においては気温の管理が重要であることが明らかとなった. 同じ平均気温でも昼夜温較差によって生育や SPAD に影響を及ぼす場合があるため (Liu et al., 2019), 苗の生育をさらに促進する条件を明らかにするうえで、日内較差を含めたより詳細な気温の制御について検討の余地がある.

第 2 章の結果では、培養液濃度は園試処方の場合 1/8 単位から 1/2 単位で根の肥大が優れ、播種後 120 日から 180 日程度で韓国の甲参 (750 g 当たり 800 本以下) に相当する 0.94 g を超える試験区が散見された (RDA, 2019). また、第 3 章において栽植密度が 560 株 m^{-2} 以上の場合には、培養液濃度 1/8 単位 (EC 0.5 $dS m^{-1}$) よりも 1/2 単位 (EC 1.4 $dS m^{-1}$) を与えた場合に 0.94 g 以上に肥大した苗の数が多かった. 温室で PP 培地を用いてオタネニンジン育苗した例では、EC 1.2 $dS m^{-1}$ の培養液を与えることで最終的な根の肥大が EC 1.0 $dS m^{-1}$ よりも劣ったことをふまえると (Park et al., 2020), オタネニンジンの育苗に用いるべき培養液濃度は園試処方 1/2 単位 (EC 1.4 $dS m^{-1}$) で十分だと考えられる.

本研究では異なる光強度と培養液濃度の組み合わせが生育に及ぼす影響についても検討した. その結果、PPFD 30 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ では肥大が遅く、370 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ では光ストレスが生じて肥大が早期に停止し、根が十分に肥大しづらいことが示唆された. 一方、1/8 単位以上の培養液を供給しつつ PPFD 100 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ から 230 $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ 程度の光強度で栽培した場合には 0.94 g を超える根の肥大が得られたことから、これらの光強度が苗生産にとって好ましい条件であると考えられた.

適する光強度に幅があったのはオタネニンジンの特性かもしれないが、計画的な植物工場の展開においては、さらなる環境条件の絞り込みが必要かもしれない. 今回用いた種子は

特定の品種ではなかったため、遺伝的なばらつきが存在したと考えられ、そのことが適する光強度に幅があった原因かもしれない。オタネニンジンでは系統によって強光や高温への耐性が異なることが報告されている (Lee et al., 2010, 2012)。特定の系統ないし品種を選択したうえで栽培条件を検討することで、苗生産にとって最適な条件をさらに絞り込むことができると考えられる。同時に、PFAL では環境を厳密に制御でき、品種の持つ特徴的な遺伝的形質を最大限に発揮できるため (Folta, 2019)、PFAL における野菜利用に用途が限定される可能性はあるものの、植物工場での栽培に特化した品種、例えば病害に非常に弱いが生育旺盛でギンセノイド含量が極めて高い品種などを育種することで、苗生産の効率や付加価値をさらに向上させることができるかもしれない。

第2章で明らかにした PFAL での育苗に適する環境条件を参考として、第3章では PFAL での密植による苗の生産性向上について検討した。ここで、苗の生産性とは一定の期間および面積あたりで利用可能な重さの苗をより多く得ることと定義する。国際規格苗 (ISO-17217-1 で示されている1年生苗 (Qualified) の基準である 0.5 g 以上の面積あたりの採苗数は (ISO17217-1, 2014))、慣行よりも高い 2260 株 m^2 の栽植密度で育苗することで播種後 182 日の時点で慣行の約3倍となった。PPFD を 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、培養液濃度を 1/2 単位とした場合には、0.94 g 以上の苗の数も密植によって増加する傾向にあり、PFAL における密植は苗の生産性向上に効果的であると考えられた。また、得られる苗の数が栽植密度 2260 株 m^2 まで直線的に増加し続けたことや、370 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では 2260 株 m^2 においても密植による光の競合や根重低下が生じなかったことから、2260 株 m^2 を超える密植についても検討の余地があると考えられ、さらなる生産性向上ができる可能性があった。

第2章では PPFD 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でも肥大した苗を得られると考えたが、本研究では 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ よりも低い光強度における密植の効果について検証できなかった。PPFD 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ では栽植密度の増加に伴い SLA が大きく、光の競合が生じていたことから、100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ではさらなる競合が生じると予想されるものの、生育について検証の余地はある。PPFD 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ でも密植が有効であれば、ランプ本数や消費電力の削減につながるため、コスト面で有利となる可能性がある。

現行の圃場における栽培では、実生は春から当年秋にかけて生長するが、秋から春にかけては低温であるため生長できない。一方、植物工場では環境制御による周年栽培が可能である (Kozai, 2018)。本研究では播種後 124 日でも 0.94 g の苗を得られた試験区が存在し、また密植した場合でも播種後 182 日時点で慣行より多くの苗を得られたことから、1年に2回以上の栽培が可能であると考えられる。そのため、密植と周年栽培を組み合わせることで、国際規格苗であれば慣行の6倍以上の生産性が実現できると考えられる。また、この生産性は多段化によりさらに向上できうる。

密植や多段化は面積あたりの苗の数を増加させる手段であるが、時間あたりに得られる苗の数を増加させる試みも報告されている。渡辺ら (2015) は、温度管理によって芽切りを

促進し、低温処理または植物ホルモン処理による休眠打破によって発芽までの期間を短縮し、さらに強光条件下で栽培することで慣行の半分の期間で1年生を休眠させ、再び低温処理することで2年生を出葉させる技術を開発し、1年間に実質2年生苗を得られるとして特許出願している(渡辺ら, 2015)。このような栽培期間の短縮技術を本研究で得られた面積あたりの生産性の向上に関する知見と組み合わせることで、短期間のうちにより大きな苗を多量に得ることができ、育苗のコストダウンに繋がるかもしれない。

第3章において、多段化による生産性向上を前提としてコストを試算した結果、国際規格苗1株あたり63.3円を要すると考えられる。養液栽培苗には、土地を選ばず清潔な苗を周年かつ安定的に供給できる点で従来の方法よりも優れるが、一般的に植物工場の課題として挙げられることの多いコスト面での課題があると考えられた。Ginseng sproutに利用する場合、苗代のみで1株63.3円となることから、スプラウトとして一般的に利用されている豆苗や機能性のあるスプラウトとして有名なブロッコリースプラウトが、いずれも数百本程度入って1袋100円程度で販売されていることと比較すると(おねだんノート, 2022)、高価な食材となることは避けられない。また、現状、Ginseng sproutは日本国内で367~600円/本程度で販売されている例があるが(株式会社イルミファーム, 2022)、養液栽培苗を用いた場合には苗代が販売価格の約11~17%を占めることになる。Ginseng sprout販売におけるコスト構造について正確な情報が見当たらなかったため、上述した養液栽培苗の苗代が妥当なものであるかは検討の余地があるが、実際に養液栽培苗をスプラウト野菜の生産に利用できるかは、食品として消費者に受け入れられる価格を精査したうえで判断する必要がある。

2015年に日本に輸入されたオタネニンジン(加工形態等は不明)の輸入額と数量から推定すると、オタネニンジンは取引量の多い国順に、中国から12570円/kg、韓国から14746円/kg、台湾から44507円/kg程度で輸入されていると推定される(農林水産省, 2015)。輸入の全てが生薬「人参」であり、Wang(2019)の研究で紹介されている中国産の6年生人参の1本あたり重量を参考として、人参が15g/本だと仮定すると、人参の価格は中国産で179円/本、台湾産で668円/本程度と算出される。そのため、本研究で得られた養液栽培苗のコストは人参の価格のうち、中国産では35%、台湾産では9%程度を占める計算になる。実際の栽培で苗が占めるコストの割合は不明であるが、日本において休眠制御技術を利用した新規育苗法を念頭にオタネニンジン栽培のコストを試算した場合、種苗費が粗収益の約30%および経営費用の56%を占めた場合でも慣行と同程度の所得を得られるとされる(川嶋, 2021)。したがって、本試算で得られた養液栽培苗の価格であっても圃場におけるオタネニンジン栽培への応用の可能性はあると考えられる。今後、既に述べたように培地量の低減、栽植密度の更なる増加および密植時の光強度低減による電気代の低減を検討する等して、さらにコストを下げる余地はあると考えられる。

なお、養液栽培苗には第4章で認められたように赤さびが発生しにくいという清浄性や、

第 1 章で述べたような栽培地の確保や栽培に伴う労力を軽減でき、安定供給しやすい等のメリットがあると考えられる。実際の応用可否にあたっては、これらのメリットは慣行の育苗法と金銭的に単純比較できるものではない点に考慮したうえで判断する必要がある。一方で、場合によっては苗生産が分業化されることによる輸送コストや中間マージンの増加なども想定される点も考慮する必要がある。

今後、計画的な養液栽培苗の周年供給のためには、発芽や生長の斉一性を高めることが必要である。オタネニンジンでは密植であっても大きい種子ほど苗が大きいとの情報があり（大隅, 1979）、採種母本の年齢にかかわらず、種子が大きいと発芽率や発芽勢が高く、得られる 1 年生苗の新鮮重も高い傾向にあると報告されていることから（Kim et al., 1981; Lee et al., 2008）、斉一性の向上には種子の大きさによる選別が有効だと考えられる。播種後すぐに発芽させる手法として、開裂種子を保管したうえでプライミング処理することも有効だと考えられる。芽切りした種子を乾燥して 1 年間 2~5°C で保管しても発芽能が保たれ、また、保管しない種子では発芽の収束に 24 週を要したのに対し、保管した種子では 3~4 週であり、保管によって発芽が早まったことが報告されている（新藤 et al., 2016）。今後、温度や薬剤処理、播種前の水分調節等による効果的なプライミング処理を検討し、播種後発芽までの期間をさらに短縮、斉一化することが求められる。

PFAL で 1 年間に複数回育苗して苗を圃場に定植する場合には、萌芽後の低温で枯死してしまうため、休眠打破した苗を秋に植えることはできない。そのため、PFAL で得た苗を春の定植まで保管する技術や、休眠打破せずに秋の定植まで保管する技術が求められる。苗の保管技術は、Ginseng sprout の生産においても任意の時期に栽培・出荷するために必要である。1 年生オタネニンジン苗を機能性フィルムで包み -2°C で保管した場合には、8 か月で 56.7% が Ginseng sprout 栽培に使用可能な状態であったとの報告があり（Chang et al., 2020）、今後、より確実に苗を長期間保管できる条件について知見を蓄積する必要がある。

本研究では、第 4 章において圃場で育苗した 1 年生苗（圃場苗）と異なる濃度の培養液で養液栽培した苗（養液栽培苗）とを栽培室内で養液栽培し、Ginseng sprout の栽培を想定して、定植後 5 週目のシュートおよび根の生育やギンセノシド (Rb₁, Rb₂, Rc, Re および Rg₁) の含量を確認した。その結果、生育には育苗法による有意差が認められ、圃場苗で大きく、また 1/8 単位よりも 1/2 単位の培養液で育苗した苗で生育が劣る傾向にあった。生育差は、苗の大きさの影響や萌芽の早晚に伴って生じたと考えられる。定植前の休眠打破について、2 年生オタネニンジン苗では 3~5°C で 120 日保管することで打破でき、萌芽が斉一になるとの報告があるが（松本ら, 2011）、本研究の 4.2.3 で考察したように、一定温度条件で栽培した 1 年生苗の休眠打破には圃場で得られる苗よりも長期間の低温が必要である可能性がある。また、育苗時の培養液濃度が高い場合には植物体内の窒素含量が高まり（Park et al., 2020）、結果的にイチゴの花芽形成で見られるような低温感応性の低下や（古谷ら, 1988）、

Panax notoginseng において C/N 比の増加に伴いみられるようなサポニン合成経路上の遺伝子発現量の低下および β グルコシダーゼ活性の増加等の影響によるギンセノシド含量の低下を引き起こす可能性が考えられる (Zhang et al, 2020). 本研究において、一部を除き育苗法によるギンセノシド含量に有意差は認められなかったものの、養液栽培苗では比較的濃度の低い 1/8 単位で育苗した場合にギンセノシド含量が高い傾向があったことから、育苗時の窒素施与量は定植後のギンセノシド含量にも影響するかもしれない。今後、養液栽培苗の萌芽やギンセノシド含量を安定化させるために、育苗時の培養液濃度が休眠の深さや萌芽後のギンセノシド含量に及ぼす影響について明らかにするとともに、適切な培養液濃度管理や休眠打破条件について検討を深めることが必要だと考えられる。

スプラウトは一般的に栄養価が高く、機能性成分も多く含むとされて注目されている (水野&山田, 2006; 衛藤, 2020), Ginseng sprout においても、5 年生の根のみを食するよりもギンセノシドを効率的に摂取できると考えられるが (Lee et al., 2020), 今後更に Ginseng sprout のギンセノシド含量を高めることが望ましいと考えられる。そのためには、光質を検討する余地があるかもしれない。本研究で用いた光源は可視光領域全域を含んだ白色と赤色 LED を使用したランプのみであった。しかし、PFAL には光強度だけでなく、光質や日長等の光環境を自在に制御できる特長があり、それによって二次代謝産物の含量を制御できうるため、光環境を更に検討する余地がある。例えばレタスにおいて、クロロゲン酸は青色光を含む光源下で増加し、連続光によっても増加する (Shimomura et al., 2020)。Ginseng sprout においても青色光を含む光源下で総ギンセノシド含量が高まる傾向にあり、生育を加味したギンセノシドの総量の観点からは白色 LED と遠赤色光の混合照射が適するとした報告がある (Kim et al., 2020)。その他にも、栽培期間中の遠赤色光照射は茎の硬化を防ぎ、生食に適した Ginseng sprout の栽培に有効だがギンセノシド含量には影響せず、また、収穫前日 1~3 時間の 0.1 W m^{-2} の紫外線 (UV-B) 照射もギンセノシド含量に影響しないとの報告がある (Choi et al., 2022)。一方、カンゾウ (*Glycyrrhiza uralensis*) においては、15 日間の 0.43 W m^{-2} の紫外線 (UV-B) 照射によってグリチルリチン酸が根において増加したとの報告がある (Afreen et al., 2005)。グリチルリチン酸はギンセノシドと同じトリテルペノイドであるため (水谷ら, 2019), オタネニンジンにおいても紫外線を比較的長時間照射するなど、光条件をより詳細に検討することでギンセノシド含量を増加できるかもしれない。

本研究では、養液栽培苗の圃場への移植についても検討した。養液栽培苗では圃場苗よりもシュートや根の生育は劣ったものの、根が変色する「赤さび」は少なかった。赤さびの原因は高い土壤水分、数種の病原菌や高い土壤中アルミニウム濃度であることが示唆されており、原因は土壤にあると考えられる (Farh et al., 2018; Lu et al., 2020; You et al., 2015; Zhou et al., 2017)。土壤を用いない養液栽培による育苗は、育苗時の土壤に由来する赤さびを防ぎうる点で有利だと考えられる。

一方、土壌中には病原菌のみが存在するわけではなく、オタネニンジンには有用な内生菌や、アーバスキュラー菌根菌が共生するとした報告が多数ある (Chu & Bae, 2022; Zeuske & Weber, 2000). 例えば、オタネニンジンから 18 の菌株が単離され、それらが窒素固定、リン酸可溶化、インドール酢酸の生成、シデロフォア分泌能を有し、成長促進や病原菌の発育抑制に寄与している可能性が示唆された (Vendan et al., 2010). また、アーバスキュラー菌根菌 (*Glomus* sp.) を定植時に接種した 1 年生苗では萌芽後の生育が促進された (Cho et al., 2009). ロックウールを用いた養液栽培においてエンドファイトや菌根菌をオタネニンジンに共生させることができるかは不明であるが、ロックウールに定植したトマトに *Paenibacillus xylanexedens* を複数回灌注することでトマト毛根病を抑制できたとの報告があり (Vargas et al., 2021), オタネニンジンの養液栽培においても有用微生物を利用できるかもしれない. なお、オタネニンジンは一般的には秋に定植される. 本研究では養液栽培苗に人為的な低温処理を施した後に春に定植して生育に問題がないことを確認したが、秋に定植した場合に同様の結果を得られるかは確認の余地がある.

総括すると、本研究では養液栽培を用いて気温、光強度および培養液濃度を適切に制御したうえで密植することで慣行よりも高い面積ないし時間あたりの苗生産が可能であり、得られる苗は PFAL での Ginseng sprout 生産や圃場への定植に利用できることを明らかにした.

論文概要

オタネニンジン (*Panax ginseng* C. A. Meyer) は医薬品 (生薬)、食品の原料および化粧品などの原料として利用されるウコギ科の多年生落葉草本であり、代表的な有効成分としてギンセノシドを全草に含む。乾燥させた根は生薬「人参」として東アジアにおいて古くから利用され、現在の日本におけるオタネニンジンの主たる利用用途となっている。人参の使用量は日本で使用される 293 品目の生薬の中でも 11 位と多く、医療や国民の健康を維持するうえで人参の安定確保は重要である。また、健康関連製品の需要の高まりによってオタネニンジンの需要は世界的にも高まっている。近年では若い 2 年生の茎葉および根を野菜として利用する方法が開発され、市場での需要が拡大している。

オタネニンジンは一般的に圃場において日射と雨を遮る小屋の下で栽培されるが、収穫には 4 年から 6 年の期間を要するうえ、気候、土壌および病害の影響を受けやすい等の課題があり収量は不安定である。栽培において 1 年生苗を移植する場合には、苗が重いほど収穫物の肥大と収量が優れるため良質な苗を安定的に生産し続けることが求められるが、現状では苗の品質や収量も不安定である。これに対し、人工光利用型植物工場 (PFAL) や養液栽培は気候や土壌などの自然環境の影響を排除でき、病害を回避しやすい等の特長を有するため、オタネニンジンの育苗における諸問題の解決策になりうる。本研究では、安定的な苗生産の手段として PFAL での養液栽培が有効であると考え、環境条件が 1 年生オタネニンジンの生育に及ぼす影響を確認して育苗時の環境条件を選定したうえで、密植を併用した生産効率の向上の可能性を検討し、さらに養液栽培苗の定植後の生育や成分含量を評価した。

第 2 章から第 3 章にかけて、養液栽培における培地の種類、気温、培地温、光強度および培養液濃度の各要因が 1 年生オタネニンジンの生育および根の肥大に及ぼす影響を調査した。文献において PFAL 条件下で使用例のある鹿沼土細粒やピートとパーライトの混合培地に加え、ロックウール細粒綿の 3 種類の培地で 1 年生オタネニンジンの生育を比較したところ、ロックウール細粒綿においてのみ国際規格 (ISO-17217-1) の根長および根重の両方を満たしたため、ロックウール細粒綿が培地として有望であると判断した。次いで、気温 20°C では気温 25°C よりも生育が優れるが、気温 20°C 下では培地温 (20°C または 25°C) による生育差は無いことを確認した。PPFD 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ から 230 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ の間で、0 単位から 1/2 単位の園試処方培養液を施用して栽培し生育を比較した結果、PPFD 130 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ または 230 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、培養液濃度 1/8 単位以上の条件において甲参の重量基準 (0.94 g 以上) を上回る苗を得られ、これらの PPFD および培養液濃度の条件が苗生産に適することを明らかにした。

第 3 章では面積あたりの採苗数の増加に向けた密植の有効性や、密植による競合に対する光強度および養分の影響を明らかにするために、異なる栽植密度 (560, 1130, 1690 または 2260 株 m^{-2}) および光強度 (PPFD 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ または 370 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 下で異なる培養液濃度 (1/8 単位または 1/2 単位) を与えて栽培し、生育を比較した。その結果、慣行よ

りも密植にして 182 日間栽培することで面積あたりの国際規格苗の採苗数を慣行の約 3 倍に増やせることや、周年栽培とすることで慣行の 6 倍以上の生産性が実現できうることを明らかにした。

第 4 章では圃場で育苗した 1 年生苗（圃場苗）と異なる濃度の培養液で養液栽培した苗（養液栽培苗）とを栽培室内で養液栽培し、定植後 5 週目のシュートおよび根の生育やギンセノシド（Rb₁, Rb₂, Rc, Re および Rg₁）の含量を確認した。その結果、生育には育苗法による有意差が認められ、圃場苗で大きく、また 1/8 単位よりも 1/2 単位の培養液で育苗した苗で生育が劣る傾向にあったが、シュートと根の両方で、育苗法によるギンセノシド含量に有意差は認められず、養液栽培苗を野菜利用に利用できうることを示した。また、養液栽培苗を圃場へ移植して約半年後の生育について確認したところ、圃場苗に比べて生育は劣るものの赤さびの発生が少なく、養液栽培苗を圃場へ定植できうることを示した。

本研究では養液栽培を用いて気温、光強度および培養液濃度を適切に制御したうえで密植することで慣行よりも高い面積および時間あたりの苗生産が可能であり、得られる苗は圃場への定植や PFAL での野菜生産に利用できうることを明らかにした。

謝辞

本論文をとりまとめるにあたり，終始暖かい激励とご指導ご鞭撻を賜りました筑波大学生命環境系教授 福田直也先生に心より感謝申し上げます。また，同教授 江面浩先生，同教授 繁森英幸先生，同准教授 有泉亨先生には副査としてご指導を賜り，心より感謝申し上げます。筑波大学蔬菜花卉学研究室の皆様からも貴重なご意見を頂戴しました。感謝申し上げます。

本研究を遂行する機会を与えていただきました，株式会社ツムラ 元生薬三部長 近藤健児博士に感謝申し上げます。また，元生薬二部長 中井洋一郎博士，栽培技術開発部長 神保智一氏ならびに栽培技術開発一課長 巢山等史氏には研究遂行に対するご理解とご助力を賜り，感謝申し上げます。土壌三相測定にあたり測定装置を快く貸与いただきました，筑波大学生命環境系教授 田村憲司先生に感謝申し上げます。圃場での栽培管理にご尽力いただきました，森澤廣喜氏に感謝申し上げます。調査や各種作業にご助力いただきました，株式会社ツムラ 酒井幹雄氏，黒沢輝枝氏，滝昌之氏，植竹昌子氏ならびに荒川和輝氏に感謝申し上げます。実験材料の手配や環境整備にご助力いただき，多くの励ましをくださった株式会社ツムラ 佐野朋子博士，吉田卓弘氏，河下美都里氏ならびに北浦温子氏に感謝申し上げます。成分定量でご指導とご協力をいただいた，株式会社ツムラ 福島杏希氏および飯塚裕司氏に感謝申し上げます。

最後に，本研究を遂行する間，常に支え続けてくれた家族に深い感謝の意を表します。

引用文献

- Afreen, F., Zobayed, S., & Kozai, T. (2005). Spectral quality and UV-B stress stimulate glycyrrhizin concentration of *Glycyrrhiza uralensis* in hydroponic and pot system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 43, 1074-1081
- Agüera, E., & de la Haba, P. (2018). Leaf senescence in response to elevated atmospheric CO₂ concentration and low nitrogen supply. *Biologia Plantarum*, 62(3), 401-408.
<https://doi.org/10.1007/s10535-018-0798-z>
- 秋葉哲生. (2010). 医療用漢方製剤の歴史. *日本東洋医学雑誌*, 61(7), 881-888.
- 新井一郎. (2015). 日本の漢方製剤産業の歴史. *薬史学雑誌*, 50(1), 1-6.
- Baeg, I.-H. (2022). The global ginseng market and Korean ginseng. *Journal of Ginseng Culture*, 4, 1-12. <https://doi.org/10.23076/jgc.2022.4.001>
- Balliu, A., Zheng, Y., Sallaku, G., Fernández, J. A., Gruda, N. S., & Tuzel, Y. (2021). Environmental and cultivation factors affect the morphology, architecture and performance of root systems in soilless grown plants. *Horticulturae*, 7(243). <https://doi.org/10.3390/horticulturae7080243>
- Chang, E. H., Lee, J. H., Choi, J. W., Lim, S., & Shin, I. S. (2020). Effects of storage temperature and film treatment on sprouting and growth of ginseng seedlings. *Korean Journal of Food Preservation*, 27(5), 534-543. <https://doi.org/10.11002/KJFP.2020.27.5.534>
- Cheng, Y., Shen, L. H., & Zhang, J. T. (2005). Anti-amnestic and anti-aging effects of ginsenoside Rg1 and Rb1 and its mechanism of action. *Acta Pharmacologica Sinica*, 26(2), 143-149.
<https://doi.org/1.111/j.1745-7254.2005.00034.x>
- Cho, E. J., Lee, D. J., Wee, C. do, Kim, H. L., Cheong, Y. H., Cho, J. S., & Sohn, B. K. (2009). Effects of AMF inoculation on growth of *Panax ginseng* C.A. Meyer seedlings and on soil structures in mycorrhizosphere. *Scientia Horticulturae*, 122(4), 633-637.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.06.025>
- Choi, J., Kim, J., Yoon, H.-I., & Son, J.-E. (2022). Effect of far-red and UV-B light on the growth and ginsenoside content of ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer) sprouts aeroponically grown in plant factories. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 63, 77-87.
- Choi, J. E., Lee, N. R., Han, J. S., Kim, J. S., Ri, S., Chang, J., Shim, Y., & Choi, J. M. (2011). Influence of various substrates on the growth and yield of organically grown ginseng seedlings in the shaded plastic house. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*, 19(6), 441-445.
- Chu, L. L., & Bae, H. (2022). Bacterial endophytes from ginseng and their biotechnological application. *Journal of Ginseng Research*, 46(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jgr.2021.04.004>
- 伊達修一, 羽野文雄, 那波和志, 寺林敏, & 藤目幸擴. (2005). クロラミンを含む培養液への還元剤の添加がサラダナにおける根部障害の発生および生育に及ぼす影響. *園芸学研*, 4(3), 297-301.

- 衛藤英男. (2020). 野菜スプラウトの機能性の最近の進展—発酵ソバスプラウトを中心に—. *科学・技術研究*, 9, 103-107.
- Evans, J. R., & Poorter, H. (2001). Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: The relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain. *Plant, Cell and Environment*, 24(8), 755–767. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00724.x>
- Fadón, E., Fernandez, E., Behn, H., & Luedeling, E. (2020). A Conceptual framework for winter dormancy in deciduous trees. *Agronomy*, 10(241). <https://doi.org/10.3390/agronomy10020241>
- Farh, M. E. A., Kim, Y. J., Kim, Y. J., & Yang, D. C. (2018). *Cylindrocarpon destructans/Ilyonectria radicola*-species complex: Causative agent of ginseng root-rot disease and rusty symptoms. *Journal of Ginseng Research*. 42(1), 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2017.01.004>
- Folta, K. M. (2019). Breeding new varieties for controlled environments. *Plant Biology*, 21, 6–12. <https://doi.org/10.1111/plb.12914>
- Fu, Y., Li, H. Y., Yu, J., Liu, H., Cao, Z. Y., Manukovsky, N. S., & Liu, H. (2017). Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. youmaicai). *Scientia Horticulturae*, 214, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.020>
- 福島県農業総合センター. (2018). 最先端種苗産業確立のための野菜苗生産技術の実証研究マニュアル. <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/272402.pdf>. 2022年11月29日閲覧.
- 古谷茂貴, 山下正隆, 山崎篤. (1988). 暗黒化での低温によるイチゴの花芽分化誘導に及ぼす体内窒素濃度の影響. *野菜・茶業試験場研究報告*. D. 1. 51-57.
- Gruda, N. S. (2019). Increasing sustainability of growing media constituents and stand-alone substrates in soilless culture systems. *Agronomy*, 9(298). <https://doi.org/10.3390/agronomy9060298>
- 国家薬典委員会. (2020). 中华人民共和国药典 第1部.
- Hong, J., & Gruda, N. S. (2020). The potential of introduction of asian vegetables in Europe. *Horticulturae*, 6(3), 1–25. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6030038>
- Hong, C. P., Jang, G. Y., & Ryu, H. (2021). Gibberellins enhance plant growth and ginsenoside content in *Panax ginseng*. *Journal of Plant Biotechnology*, 48, 186-192. <https://doi.org/10.5010/JPB.2021.48.3.186>
- Hou, M., Wang, R., Zhao, S., & Wang, Z. (2021). Ginsenosides in *Panax* genus and their biosynthesis. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, 11(7), 1813-1834. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2020.12.017>

- Hyun, D.-Y., Hwang, J.-K., Choi, S.-Y., & Jo, J.-S. (1993). Photosynthetic characteristics of *Panax ginseng* C. A. Meyer I. Photosynthetic response to changes of light intensity and leaf temperature. *Korean Journal of Ginseng Science*, 17(3), 240-245.
- 市川勉, & 高城誠志. (1999). バラ養液栽培における数種のロックウール代替培地の実用性に関する研究. *茨城県農業総合センター園芸研究所研究報告*, 7, 41-48.
- 稲葉健五. (1984). 遮光がコンニャク葉の形態に及ぼす影響. *日本作物学会紀事*, 53(3), 243-248.
- 稲葉健五. (1992). 種球茎の窒素含量がコンニャクの生育・収量に及ぼす影響. *日本作物学会紀事*, 61(4), 551-554.
- 一般社団法人日本施設園芸協会. (2015). *施設園芸・植物工場ハンドブック (1st ed.)*. 一般社団法人農山漁村文化協会.
- ISO17217-1, Pub. L. No. ISO17217-1, International Organization for Standardization (2014).
- Jang, I. B., Yu, J., Suh, S. J., Jang, I. B., & Kwon, K. B. (2018). Growth and ginsenoside content in different parts of ginseng sprouts depending on harvest time. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*, 26(3), 205-213. <https://doi.org/10.7783/kjmcs.2018.26.3.205>
- 株式会社イルミファーム. (2022). <https://www.illumifarm.com/%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%83%E3%83%97/>. 2022年11月29日閲覧.
- 株式会社トミー精工. (2022). https://bio.tomys.co.jp/products/cultivation_rack/. 2022年11月26日閲覧.
- 亀岡龍太. 朝日新聞デジタル. (2022 Apr 27). 高麗人参、スプラウトでどうぞ 今治の会社、量産へ水耕栽培. 朝日新聞デジタル. <https://www.asahi.com/articles/ASQ4V6X9JQ4LPTLC01K.html>. 2022年11月3日閲覧.
- 川嶋浩樹. (2021). 薬用作物栽培の手引き～薬用作物の国内生産拡大に向けて～オタネニンジン編. https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/Otaneninjin_warc_man2021.3.15.pdf. 2022年11月29日閲覧.
- Kim, J. H. (2018). Pharmacological and medical applications of *Panax ginseng* and ginsenosides: a review for use in cardiovascular diseases. *Journal of Ginseng Research*, 42(3), 264-269. <https://doi.org/10.1016/J.JGR.2017.10.004>
- Kim, J. M., Lee, S. S., & Kim, Y. T. (1981). Effect of seed size on seedling performance in *Panax ginseng*. *Korean J. Ginseng*, 5(2), 85-91.
- Kim, Y.-J., Nguyen, T, and Oh, M.-M. (2020), Growth and ginsenosides content of ginseng sprouts according to LED-based light quality changes. *Agronomy*, 10(1979). <https://doi.org/10.3390/agronomy10121979>
- 厚生労働省. (2020 a). 令和2年-2020-薬事工業生産動態統計年報の概要.
- 厚生労働省. (2020 b). 食薬区分における成分本質(原材料)の取扱いの例示. 薬生監麻発 0331 第9号.

- 厚生労働省. (2021). 第十八改正日本薬局方. pp2018-2020.
- 古在豊樹. (2012). 人工光型植物工場：世界に広がる日本の農業革命 (1st ed.). 株式会社オーム社.
- Kozai, T. (2018). Characteristics of current plant factories and next generation plant factory. In Smart Planrt Factory. The next generation indoor vertical farms. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Kuronuma, T., Wang, Q., Ando, M., & Watanabe, H. (2020). Effects of different light intensities on the growth and accumulation of photosynthetic products in *Panax ginseng* C. A. Meyer. *Environmental Control in Biology*, 58(4), 131–135. <https://doi.org/10.2525/ECB.58.131>
- Lee, B. (2020). Investigation of optimum environmental conditions for ginseng seedling production in plant factories with artificial light [Master thesis]. Seoul national university.
- Lee, B., Pham, M. D., Hwang, H., Jang, I., & Chun, C. (2021). Growth and morphology of ginseng seedlings cultivated in an ebb-and-flow subirrigation system as affected by cell dimension. *Horticultural Science and Technology*, 39(2), 224–231. <https://doi.org/10.7235/HORT.20210020>
- Lee, J., Lee, S., Lee, J., & Ahn, I. (2008). Effect of seed size and cultivars on the ratio of seed coat dehiscence and seedling performance in *Panax ginseng*. *Journal of Ginseng Research*, 32(3), 257–263. <https://doi.org/10.5142/jgr.2008.32.3.257>
- Lee, J. S., Lee, D. Y., Lee, J. H., Ahn, I. O., & In, J. G. (2012). Photosynthetic characteristics of resistance and susceptible lines to high temperature injury in *Panax ginseng* Meyer. *Journal of Ginseng Research*, 36(4), 461–468. <https://doi.org/10.5142/jgr.2012.36.4.461>
- Lee, J. S., Lee, J. H., & Ahn, I. O. (2010). Characteristics of resistant lines to high-temperature injury in ginseng (*Panax ginseng* C. A. Meyer). *Journal of Ginseng Research*, 34(4), 274–281. <https://doi.org/10.5142/jgr.2010.34.4.274>
- Lee, J. Y., Yang, H., Lee, T. K., Lee, C. H., Seo, J. W., Kim, J. E., Kim, S. Y., Park, J. H. Y., & Lee, K. W. (2020). A short-term, hydroponic-culture of ginseng results in a significant increase in the anti-oxidative activity and bioactive components. *Food Science and Biotechnology*, 29(7), 1007–1012. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00735-5>
- Lee, S.-S. (2002). Characteristics of photosynthesis among new cultivars of ginseng (*Panax ginseng* C.A. Meyer). *Journal of Ginseng Research*, 26(2), 85–88. <https://doi.org/10.5142/jgr.2002.26.2.085>
- Li, J., Yuan, Y., Jiang, W., Quan, X., Wu, S., & Wu, W. (2022). Abscisic acid is required for cold-induced accumulation of ginsenosides Rg₁ and Re in *Panax ginseng* adventitious roots. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 149, 325–333. <https://doi.org/10.1007/s11240-021-02222-z>

- Liu, H., Lu, X., Hu, Y., & Fan, X. (2020). Chemical constituents of *Panax ginseng* and *Panax notoginseng* explain why they differ in therapeutic efficacy. *Pharmacological Research*, 161(105263). <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.105263>
- Liu, H., & Timko, M. P. (2021). Jasmonic acid signaling and molecular crosstalk with other phytohormones. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(6), 2914. <https://doi.org/10.3390/ijms22062914>
- Liu, Y., Ren, X., & Jeong, B. R. (2019). Manipulating the difference between the day and night temperatures can enhance the quality of *Astragalus membranaceus* and *Codonopsis lanceolata* plug seedlings. *Agronomy*, 9(654). <https://doi.org/10.3390/agronomy9100654>
- Lu, J., Li, J., Wang, S., Yao, L., Liang, W., Wang, J., & Gao, W. (2018). Advances in ginsenoside biosynthesis and metabolic regulation. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 65(4), 514-522. <https://doi.org/10.1002/bab.1649>
- Lu, X. H., Zhang, X. M., Jiao, X. L., Hao, J. J., Zhang, X. S., Luo, Y., & Gao, W. W. (2020). Taxonomy of fungal complex causing red-skin root of *Panax ginseng* in China. *Journal of Ginseng Research*, 44(3), 506–518. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2019.01.006>
- 松本洋俊, 新藤聡, 松原紀嘉, 古在豊樹, 池上文雄, & 渡辺均. (2012). 一年生オタネニンジンの根重増加に及ぼす光強度と二酸化炭素濃度の影響. *園芸学研究別冊 園芸学会大会研究発表要旨*, 11(1), 361.
- 松本洋俊, 新藤聡, 松原紀嘉, & 渡辺均. (2011). 二年生オタネニンジンの休眠打破に及ぼす温度の影響. *園芸学研究別冊 園芸学会大会研究発表要旨*, 10(2), 479.
- Maxwell, K., & Johnson, G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide. *Journal of Experimental Botany*, 51(345), 659–668.
- 三菱ケミカルアクア・ソリューションズ株式会社. (不明). https://www.napperland.net/qanda/naeterrace_qanda/. 2022年11月29日閲覧.
- 宮沢洋一. (1975). 薬用になじんの栽培技術 (特産作物の増益と栽培改善<特集>). *農業および園芸*, 50(1), 117-122.
- 水野時子, & 山田幸二. (2006). スプラウトの一般成分, 脂肪酸組成, 遊離アミノ酸組成について. *日本食生活学会誌*, 16, 369-375.
- 水谷正治, 土反伸和, & 杉山暁史. (2019). 基礎から学ぶ植物代謝生化学 (1st ed.). 株式会社羊土社.
- Muro, J., Díaz, V., Goñi, J. L., & Lamsfus, C. (1997). Comparison of hydroponic culture and culture in a peat/sand mixture and the influence of nutrient solution and plant density on seed potato yields. *Potato Research*, 40(4), 431–438. <https://doi.org/10.1007/BF02358003>
- 苗テラスカタログ. (不明). <https://www.ffsa.jp/wp/wp-content/uploads/2020/12/%E4%B8%89%E8%8F%B1%E3%82%B1%E3%83%9F%E3%82%AB%E3%83%AB%E3%82%A2%E3%82%B0%E3%83%AA%E3%83%89%E3%83%AA%E>

3%83%BC%E3%83%A0%E6%A0%AA%E8%8B%97%E3%83%86%E3%83%A9%E3%82%B9%E4%BA%BA%E5%B7%A5%E5%85%89%EF%BD%A5%E9%96%89%E9%8E%96%E5%9E%8B%E8%8B%97%E7%94%9F%E7%94%A3%E8%A3%85%E7%BD%AE.pdf. 2022年11月28日閲覧.

National Center for Complementary and Integrative Health. (2020). Asian Ginseng.

<https://www.nccih.nih.gov/health/asian-ginseng>. 2022年11月3日閲覧.

日本漢方生薬製剤協会. (2021). <https://www.nikkankyo.org/seihin/yougo/list-menu02.htm>. 2022年11月3日閲覧.

農林水産省. (2015). 農林水産物輸出入概況平成27年.

小川雄一. (2012). 養液栽培のすべて：植物工場を支える基本技術 (1st ed.). 株式会社誠文堂新光社.

奥幸一郎, 水上宏二, 井上恵子. (2013). イチゴ「あまおう」の苗質が低温暗黒処理の有効性に及ぼす影響. *福岡県農業総合試験場研究報告*. 32. 37-41.

大隅敏夫. (1979). 薬用ニンジン：一つくり方と売り方 (2nd ed.). 社団法人農山漁村文化協会. pp47, 69-72.

大隅敏夫, & 宮沢洋一. (1956). 薬用人参種子の催芽並びに発芽. *農業および園芸*, 31(8), 1129-1130.

おねだんノート. (2022). <https://onedannote.com/>. 2022年11月29日 閲覧.

Park, H., Lee, M.K., & Lee, C.H. (1986). Effect of nitrogen phosphorous and potassium on ginsenoside composition of *Panax ginseng* root grown with nutrient solution. *J. Korean Agricultural Chemical Society*. 29. 78-82.

Park, H. B., Park, S. Y., Park, I. S., Jang, I. B., Hyun, D. Y., Lee, C. W., & Choi, J. M. (2020). Influence of nutrient solution concentration on growth and tissue mineral content of *Panax ginseng* seedlings cultured in a root medium containing peat and perlite. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 61(4), 715–724. <https://doi.org/10.1007/s13580-020-00262-6>

Park, H. W., Song, J. H., Kwon, K. B., Lee, U. H., & Son, H. J. (2017). Growth characteristics of ginseng seedling transplanting by self soil nursery, nursery or hydroponic culture on main field. *Korean Journal of Medicinal Crop Science*, 25(4), 238–243.

Postma, J. A., Hecht, V. L., Hikosaka, K., Nord, E. A., Pons, T. L., Poorter, H., Johannes Postma, C. A., & Sciences, P. (2021). Dividing the pie: A quantitative review on plant density responses. *Plant Cell Environ*, 44, 1072–1094. <https://doi.org/10.1111/pce.13968>

Qin, F. F., Du, F. L., Yue, S. S., Xu, H. L., Zhao, A. H., Xu, Q. C., & Tian, C. M. (2011). Photosynthetic responses to PPF, temperature and humidity in panax ginseng plants. *Acta Horticulturae*, 907, 349–354. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.57>

- Ratan, Z. A., Haidere, M. F., Hong, Y. H., Park, S. H., Lee, J. O., Lee, J., & Cho, J. Y. (2021). Pharmacological potential of ginseng and its major component ginsenosides. *Journal of Ginseng Research*, 45(2), 199–210. <https://doi.org/10.1016/J.JGR.2020.02.004>
- Royal Society of Chemistry. (2023). ChemSpider. <http://www.chemspider.com/>. 2023 年 1 月 26 日 閲覽.
- Rural Development Administration, Republic of Korea. (2009). 인삼 GAP 표준재배지침서 (우수농산물관리제도) (1st ed.).
- Rural Development Administration, Republic of Korea. (2018). 인삼-농업기술길잡이 103(개정판). (4th ed.). 농촌진흥청.
- Rural Development Administration, Republic of Korea. (2019). 표준인삼경작방법. Korean Law Information Center. <https://law.go.kr/LSW/admRulLsInfoP.do?admRulSeq=2100000181398>. 2022 年 11 月 3 日 閲覽.
- Shi, W., Wang, Y., Li, J., Zhang, H., & Ding, L. (2007). Investigation of ginsenosides in different parts and ages of *Panax ginseng*. *Food Chemistry*, 102(3), 664–668. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.05.053>
- 柴田敏郎. (2021). 養命薬の代表、朝鮮人參—絶滅危惧種オタネニンジンの栽培化の歴史と利用、そして日本の現状. *FFI ジャーナル*, 226(4), 333–341.
- Shimomura, M., Yoshida, H., Fujiuchi, N., Ariizumi, T., Ezura, H., & Fukuda, N. (2020). Continuous blue lighting and elevated carbon dioxide concentration rapidly increase chlorogenic acid content in young lettuce plants. *Scientia Horticulturae*, 272, 109550.
- 新藤聡, 前田浩志, 金谷健至, & 渡辺均. (2016). 貯蔵条件の違いがオタネニンジン種子の発芽に及ぼす影響. *園芸学研究別冊 園芸学会大会研究発表要旨*, 15(1), 396.
- 新藤聡, 金谷健至, & 渡辺均. (2014). 一年生オタネニンジン苗の光合成効率の日変化. *園芸学研究別冊 園芸学会大会研究発表要旨*, 13(2), 483.
- Shishtar, E., Sievenpiper, J. L., Djedovic, V., Cozma, A. I., Ha, V., Jayalath, V. H., Jenkins, D. J. A., Meija, S. B., de Souza, R. J., Jovanovski, E., & Vuksan, V. (2014). The effect of ginseng (The Genus *Panax*) on glycemic control: A systematic review and meta-analysis of randomized controlled clinical trials. *PLoS ONE*, 9(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107391>
- 消費者庁. (2022). 機能性表示食品の届出情報検索. 届出番号 F462. <https://www.fld.caa.go.jp/caaks/cssc01/>. 2022 年 11 月 3 日 閲覽.
- Sievenpiper, J. L., Arnason, J. T., Leiter, L. A., & Vuksan, V. (2003). Variable effects of American ginseng: a batch of American ginseng (*Panax quinquefolius* L.) with a depressed ginsenoside profile does not affect postprandial glycemia. *European Journal of Clinical Nutrition*, 57, 243–248. <https://doi.org/10.1038/ejcn.1601550>
- Sung-Woo, L., & Kwang-Soo, K. (1979). Study on CA storage of fresh ginseng. *Korean Journal of Food Science and Technology*, 11(2), 131–137.

- 寺林敏, 原田直美, 伊達修一, & 藤目幸擴. (2008). 水耕ニンジン (*Daucus carota* L.) の根の肥大に及ぼす通気および培養液水位の影響. *園芸学研究*, 7(3), 439-444.
- 牛田均, & 松崎朝浩. (1990). キュウリの循環式ロックウールにおける栽培技術. *香川県農業試験場研究報告*, 41, 13-20.
- Vargas, P., Bosmans, L., van Kerckhove, S., van Calenberge, B., Raaijmakers, J. M., Lievens, B., & Rediers, H. (2021). Optimizing biocontrol activity of *Paenibacillus xylanexedens* for management of hairy root disease in tomato grown in hydroponic greenhouses. *Agronomy*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/agronomy11050817>
- Vendan, R. T., Yu, Y. J., Lee, S. H., & Rhee, Y. H. (2010). Diversity of endophytic bacteria in ginseng and their potential for plant growth promotion. *Journal of Microbiology*, 48(5), 559–565. <https://doi.org/10.1007/s12275-010-0082-1>
- Wang, Y. (2019). 中国吉林省における朝鮮人参の栽培体系に関する調査研究 [博士論文]. 新潟大学.
- 渡辺均, 新藤聡, 松原紀嘉, & 松本洋俊. (2015). オタネニンジンの生産方法 (Patent No. P2015-181369A). 日本国特許庁.
- Woo, S. Y., Lee, D. S., & Kim, P. G. (2004). Growth and eco-physiological characteristics of *Panax ginseng* grown under three different forest types. *Journal of Plant Biology*, 47(3), 230–235. <https://doi.org/10.1007/BF03030513>
- Wood, C. W., Reeves, D. W., & Himelrick, D. G. (1993). Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: A review 1. *Proceedings Agronomy Society of N.Z.*, 23, 1–9.
- Yabiku, T., & Ueno, O. (2019). Structural and photosynthetic re-acclimation to low light in C4 maize leaves that developed under high light. *Annals of Botany*, 124(3), 437–445. <https://doi.org/10.1093/aob/mcz092>
- 山岡傳一郎, 伊藤隆, 浅間宏志, 佐橋佳郎, 三谷和男, 姜東孝, 安井廣迪, & 渡辺均. (2017). 生薬国内生産の現状と課題. *日本東洋医学雑誌*, 68(3), 270-280.
- 山本豊, 黄秀文, 佐々木博, 武田修己, 樋口剛央, 向田有希, 森祐悟, 山口能宏, & 白鳥誠. (2019). 日本における原料生薬の使用量に関する調査報告. *生薬学雑誌*, 73(1), 16-35.
- Yong, E. C., Yong, S. K., Myong, J. Y., Wan, G. P., Jae, S. Y., Seong, R. C., Sang, S. H., & Sung, J. L. (2007). Physiological and chemical characteristics of field- and mountain-cultivated ginseng roots. *Journal of Plant Biology*, 50(2), 198–205. <https://doi.org/10.1007/BF03030630>
- You, J., Liu, X., Zhang, B., Xie, Z., Hou, Z., & Yang, Z. (2015). Seasonal changes in soil acidity and related properties in ginseng artificial bed soils under a plastic shade. *Journal of Ginseng Research*, 39(1), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2014.08.002>
- Zeuske, D., & Christian Weber, H. (2000). Growth Stimulation of *Panax ginseng* C.A. Meyer (Araliaceae) Arising from AMF-Isolate Inoculation. *Symbiosis*, 29, 213–230.

- Zhang, H., Xu, S., Piao, C., Zhao, X., Tian, Y., Cui, D., Sun, G., & Wang, Y. (2018). Post-planting performance, yield, and ginsenoside content of *Panax ginseng* in relation to initial seedling size. *Industrial Crops and Products*, 125, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.091>
- Zhang, J.-Y., Chun, Z., Wu, H.-M., & Chen, J.-W. (2020). Integrated analysis on biochemical profiling and transcriptome revealed nitrogen-driven difference in accumulation of saponins in a medicinal plant *Panax notoginseng*. *Plant Physiol. Biochem.* 154. 564-580. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.06.049>
- Zhang, Y.-X., Niu, Y.-Q., Wang, X.-F., Wang, Z.-H., Wang, M.-L., Yang, J., Wang, Y.-G., Zhang, W.-J., Song, Z.-P., & Li, L.-F. (2022). Phenotypic and transcriptomic responses of the shade-grown species *Panax ginseng* to variable light conditions. *Annals of Botany*. <https://doi.org/10.1093/aob/mcac105>
- Zhou, Y., Yang, Z., Gao, L., Liu, W., Liu, R., Zhao, J., & You, J. (2017). Changes in element accumulation, phenolic metabolism, and antioxidative enzyme activities in the red-skin roots of *Panax ginseng*. *Journal of Ginseng Research*, 41(3), 307–315. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2016.06.001>