

ワサビ (*Eutrema japonicum* (Miq.) Koidz.) における
種子繁殖性品種の育苗体系確立と
遮光栽培技術開発に関する研究

Studies of Establishment of Raising Seedling System of
Seed-propagated Cultivars and Development of Shade Culture
Method in Wasabi (*Eutrema japonicum* (Miq.) Koidz.)

久松 奨

Susumu Hisamatsu

*岐阜大学大学院連合農学研究科博士学位審査論文 2022年(令和4年)

目 次

| | |
|---|----|
| 第1章 緒 言..... | 1 |
| 1 ワサビの歴史..... | 1 |
| 2 ワサビの栽培方法..... | 1 |
| 3 わが国におけるワサビの生産額と主要産地..... | 1 |
| 4 ワサビの成分と利用方法..... | 1 |
| 5 ワサビに関するこれまでの研究..... | 2 |
| 6 水ワサビ産地が抱える問題と課題..... | 6 |
| 7 本研究の目的..... | 7 |
| 第2章 置床前の低温処理が乾燥種子の発芽に及ぼす影響..... | 15 |
| 1 材料および方法..... | 15 |
| 2 結果..... | 15 |
| 3 考察..... | 16 |
| 第3章 置床前の GA ₃ 処理期間および低温処理が乾燥種子の発芽に及ぼす影響..... | 23 |
| 1 材料および方法..... | 23 |
| 2 結果..... | 23 |
| 3 考察..... | 23 |
| 第4章 セルトレーのサイズと育苗期間が実生苗の形質と定植後の生育に及ぼす影響..... | 28 |
| 1 材料および方法..... | 28 |
| 2 結果..... | 28 |
| 3 考察..... | 29 |
| 第5章 着色遮光素材の透過光が根茎の生育と ITC 含有量に及ぼす影響..... | 36 |
| 1 材料および方法..... | 36 |
| 2 結果..... | 38 |
| 3 考察..... | 39 |
| 第6章 総合考察..... | 47 |
| 1 実生苗の周年大量生産・供給体系を構築する育苗管理改善方法..... | 47 |
| 2 新規遮光資材を用いたわさび田での栽培環境改善方法..... | 48 |
| 3 残された課題..... | 48 |
| 4 結言..... | 48 |
| 摘 要..... | 53 |
| 謝 辞..... | 55 |
| 引用文献..... | 56 |
| Summary..... | 62 |

第1章 緒言

1 ワサビの歴史

ワサビ (*Eutrema japonicum* (Miq.) Koidz. (syn. *Wasabia japonica* (Miq.) Matsum.)) は、日本原産のアブラナ科の多年生植物である。半陰性植物で、冷涼な環境を好み、北海道から九州に至る山中の谷沿いに自生している(清水, 1985; 足立 1987)。

ワサビは、栽培化される以前は自生株を採取して食用にしたと考えられている(足立, 1987)。貨幣経済が発達するまで、地域の特産物が租庸調といわれる租税のひとつとして、物納されていたといわれている。ワサビもこのひとつとみられ、飛鳥京跡苑池遺構から発見された7世紀後半の木簡に「委佐俤」の文字があり(桑田, 2014)、養老律令(718年)では調として「山薑」が記されている。日本最初の薬草事典である「本草和名」(918年)には「山葵」あるいは「和佐比」との記載があり、当初は薬草としても利用されていたとみられるが、平安時代から安土桃山時代にかけて、次第に食用として調理に使われるようになった。約400年前の慶長年間(1596~1615)には、安倍川上流の有東木地区(現静岡県静岡市葵区有東木)において日本で初めてワサビ栽培が開始(木苗, 2006)されたとされ、村人が渓谷に自生するワサビを採取して湧水に植えたのが始まりといわれている。さらに谷川の水を引いて小規模な栽培が行われるようになった(足立, 1987)。

ワサビの利用は江戸時代に急激に増加した(山根, 2020)と考えられ、栽培も静岡県内の湧水の豊富な山間地域に広がった。現在で最も生産量が多い伊豆市では、1744年に天城湯ヶ島(現・伊豆市)の山守であった板垣勘太郎が、ワサビ苗を有東木から伊豆に持ち帰り、栽培が始まった(足立, 1987)。静岡県ではこのような歴史的経緯から、わさび田で湧水や溪流の水を掛け流して栽培する根茎生産を主目的とした水ワサビが主体である。

これに対し、加工用の薬柄生産を主目的に土耕栽培する畑ワサビもあるが、いずれも使用する品種・系統は共通している。

2 ワサビの栽培方法

ワサビは、土を使って育苗した苗をわさび田に定植し、水を掛け流して1~2年間栽培後、出荷可能な大きさに成育した根茎を収穫する(図1-1)。株は根茎、葉、根、分けつ茎、花茎から成り(図1-2)、全重は1kg前後か

ら大きいもので2kg近くになるが、主要な収穫物である根茎は約100gである。栽培上の大きな特徴として、一年を通じていつでも収穫でき、収穫直後であっても定植苗があればすぐに定植し、季節を問わずに次作を開始できる。

水ワサビを栽培するわさび田の築田様式には、壘石式、溪流式、地沢式、平地式および北駿式(壘石式の改良型)がある(足立, 1987, 図1-3, 図1-4)。このうち壘石式は静岡県上大見村(現・伊豆市)の平井熊太郎が明治25年頃に開発した。壘石式は水量が豊富な静岡県内の水ワサビ産地に適し、生育ムラが少なく、根茎の肥大に優れ、高品質なワサビが栽培できることが高く評価され、「静岡水わさびの伝統栽培」として2017年に日本農業遺産、2018年に世界農業遺産に登録された。

3 わが国におけるワサビの生産額と主要産地

2018年の全国の水ワサビ栽培面積は210ha、根茎生産量は501t、産出額は66億円で、うち静岡県がそれぞれ116ha(55%)、245t(49%)、53億円(80%) (静岡県経済産業部農業局農芸振興課編集, 2018)を占めており、全国一の産出額を占める。ちなみに、森林や原野から得られる産物のうち一般木材を除いたものを特用林産物と総称する。このうち、食用物はきのこ類、樹実類および山菜類である。ワサビは統計上、特用林産物(<https://www.rinya.maff.go.jp/j/tokuyou/tokusan/>)に含まれる。

静岡県内の主要産地は、南アルプス山系に属する静岡地域(静岡県静岡市)、富士山麓周辺(静岡県富士宮市、御殿場市、小山町)、天城山系に属する伊豆地域(静岡県伊豆市、下田市、東伊豆町、河津町、松崎町、西伊豆町)の山間地に分布しており、重要な特産品となっている。

4 ワサビの成分と利用方法

ワサビは鮮烈な辛味と爽やかな香りに優れた香辛野菜である。独特な風味はアブラナ科植物に特徴的なイソチオシアネート類(ITC類)を主成分とするもので、根茎だけでなく薬柄、葉、根および花茎にも含まれ、全草を食用にできる。すりおろした根茎は刺身、蕎麦、肉料理等の薬味として生食される。他の部位は加工品として多く利用され、薬柄や葉はわさび漬、醤油漬、三杯酢漬、チューブ入りわさび等に加工され、刻んだ根は甘辛く調

味した味噌に混ぜてわさび味噌に加工される。近年はドレッシング、ソース、刻みわさびに加工されるなど、利用の幅が拡大している。

また、花茎は春の訪れを告げる旬の青果物として人気が高く、開花し始めたものを収穫し、束ねて出荷される。このように食材、加工原料として多方面で利用される換金性の高い作物であり、栽培環境条件と収穫物の品質の関係が明らかになれば、商品としての付加価値をさらに高められると考えられる。

5 ワサビに関するこれまでの研究

これまでのワサビに関する研究は、育種、DNA解析、繁殖、栽培、病害虫防除、ITC類についての6つに大別される。

(1) 育種に関する研究

ワサビは日本で栽培化された作物であり、国外に存在するワサビと呼称される植物・作物は、ワサビに近縁の別種か、国内から流出したものと考えられている(山根, 2015)。これまでに種苗法に基づき21品種が登録されており、内訳は公的研究機関育成が5品種、民間(企業、ワサビ生産者)育成が16品種である(表1-1, 2021年10月1日現在)。

しかし、ワサビの遺伝資源のほとんどは国内のワサビ生産者・産地が保有しているため、育種はワサビ生産者自身が生産現場で主体的に取り組んでおり、ワサビ生産者・産地が育成した未登録品種・系統数は、登録品種数を大きく上回るものと推測される。

また、公的研究機関が育成した未登録品種で、各産地に普及した優良品種も少なくない(上野・中川, 1973; 吉田, 1974; 足立ら, 1974)。ワサビの育種方法は交配や集団選抜によるものであり、育成過程や品種特性について公的研究機関による報告(足立ら, 1974; 馬場, 2015; 馬場ら, 2016)はあるが、育種技術についての報告はない。

(2) DNA解析に関する研究

Yamane (2015) が、葉緑体全ゲノム解析により、ワサビが日本固有種であることを報告し、Haga ら (2019) は、栽培ワサビとなった野生ワサビが日本固有種であり、第四紀氷河期時代に大陸から渡ってきて日本海側気候に適応した日本海要素植物であることを報告した。さらに現在の栽培品種の母系は主要3品種に限定されることを解明し、主要3品種を区別するDNAマーカーを構築した。

(3) 繁殖に関する研究

繁殖に関する研究として、主に開花結実・花芽分化の解明、種子成熟条件の解明、種子の休眠条件の解明、種子の保存方法の開発、発芽促進技術の開発、育苗技術の開発について報告されている。ワサビは種子繁殖と分けつ茎による栄養繁殖のどちらも可能な作物だが、実生苗の利用が増えたのは昭和後期から平成にかけてであった。

昭和以前の栽培では栄養繁殖が主であり、収穫時に採取する分根(大きく生育した分けつ茎)を、直ちに次作の苗として定植する分根苗を使用していた。これは、ワサビ種子が採種直後は休眠状態で発芽しにくく、休眠から覚醒するまで定植苗を育苗できないことや、乾燥条件下で発芽力を失う recalcitrant seed (中村, 1985; 中村, 1990b) と考えられ、湿潤状態で保存するために長期保存が困難であり、種苗生産に際して利便性が低かったためと考えられる。しかし、種子を使う実生苗は、親株1株から数本しか採取できない分根苗よりも増殖効率が大きく、定植苗が供給不足である背景から次第に実生苗が定植苗の主流となった。

1) 開花結実・花芽分化、種子成熟に関する研究

開花結実・花芽分化条件の解明について、足立ら (1975) は、静岡県内のわさび田での結実が4月上～中旬がピークとなることを報告した。坂井ら (2002) は、ワサビは15℃程度の低温感応により花芽分化し、日長条件の関与程度は低いこと、株が一定の大きさになるまで低温感応しない幼苗感応型であると報告した。また、奥田ら (2010) は、ワサビの花芽分化の外的要因は15℃程度の低温で、日長は直接影響せず、自然環境下では夜温によって花成が進む量的低温要求性であると報告した。

一方で、Kubo ら (2011) は、シロイヌナズナの開花を誘導する遺伝子である FT (FLOWERING LOCUS T) のオーソログである WjFT をワサビにおいて同定し、WjFT の発現は10月には検出されず、11月にわずかに増加し、2月に大幅に増加したことを報告し、野末と久保 (2015) は、定植後4か月以上育成したワサビを、1か月間4～8℃の低温下で、14時間以上のLED白色光に曝すことで花芽形成を効率的に誘導でき、LEDの光質(赤、青および遠赤色光)は花成誘導に影響しなかったとし、花芽分化に対する光の影響を報告している。日高と重藤 (2018) は、ポットを用いたハウス栽培の花茎発生が、保温開始時期12月で11月よりも多く、5℃以下の低温遭遇の影響があることを報告しており、花芽分化に対する低温の影響については共通している。

種子の成熟については、馬場ら (2018) が種子胚の成熟には開花からの日最低気温の積算が 400~500 °C 必要であることを報告している。

2) 種子の休眠に関する研究

種子の休眠の原因は、種子の胚を取り巻く組織 (胚乳や種皮・果皮等) によるものと、胚自身の成熟度や生理的休眠によるものの二つに大別される。種子の休眠性は種子の発達過程において高まり、種子から含水率が低下して乾燥する成熟過程で一次休眠が獲得され、種子成熟後の時間経過や環境条件による生理状態の変化 (後熟) に伴って低下する。休眠性が低下しても、発芽に不適な環境条件 (低温、高温等) では発芽せず (強制休眠・環境休眠)、二次休眠を獲得する。一般に発芽温度は、休眠性の低下に伴って拡大し、休眠性が高まると狭まる (川上, 2005 ; 川上, 2021)。

アブラナ科作物の種子の多くは、成熟・乾燥してから長角果が裂開して脱粒するが、ワサビの種子は成熟しても緑色を帯び、含水率が高い状態で長角果が裂開して脱粒する特徴がある。したがって、ワサビ種子の一次休眠は、他の作物のように含水率の低下・乾燥の過程を経ることなく獲得される。

ワサビ種子は花茎を伸長させながら花茎基部から順次開花する。花茎基部に着莢する長角果は、開花後の登熟日数約 50 日で成熟し、裂開して成熟種子が脱粒する。大井と有賀 (1994b) は、ワサビ種子の発芽率が登熟日数 30 日で最も高く、登熟日数が進むにつれて漸次低下することを報告した。中村 (1990a) は、ワサビ種子の種皮の一部または全部を除去することで、休眠の深い種子でもほぼ完全に発芽することを報告し、ワサビ種子では休眠の原因は主に種皮であるとした。

馬場ら (2018) はワサビ種子胚の成熟段階を 1:魚雷型胚まで、2:肥大期、3:着色期、4:成熟期の 4 段階に区分し、着色期以降の胚では発芽能力が備わっており、成熟前の種子では種皮の剥皮により胚が発芽するが、成熟種子では剥皮だけでは発芽しないとしている。これらのことから、ワサビ種子の休眠は、胚自身と種皮の両方に原因があるものと考えられるが、生理的な機構は不明である。

一般に種子の休眠性の変動には、複数の植物ホルモンが関わっている。アブシジン酸 (ABA) は種子休眠の形成と維持、発芽抑制に深く関与する植物ホルモンであり、種子の発達とともに内生量が増加し、種子の成熟 (乾燥) 過程で減少する。Yoshioka ら (1998) は、レタス種子では吸水時に ABA が新たに合成され、ABA 含量は発芽適温 (10~22 °C) では低下し、高温 (25~30 °C) で

は含量が維持され、種子吸水時に ABA 合成阻害剤で処理することで発芽の高温阻害が緩和されることを報告した。Tamura ら (2004) は、シロイヌナズナの ABA 欠損突然変異体、ABA 非感受性突然変異体を用いた実験で、通常であれば発芽できない 34 °C の高温でも発芽することを報告した。これらのことは、ABA が高温において種子の発芽阻害に関与していることを示している。

ジベレリン (GA) は、種子の発芽促進や休眠打破の促進に関与している。種子は吸水するとすぐに、発芽のエネルギー供給のために、種子内のデンプンをグルコースに分解するが、GA はアミラーゼの合成を誘導することにより、デンプンの加水分解を促す。また、GA は ABA に対して拮抗的な作用を持ち、種子中の ABA の分解を促して含量を低下させることで種子発芽を促進する。レタス種子では、Toyomasu ら (1994) が、GA により ABA 含量が速やかに減少することを報告し、Gonai ら (2004) は、GA により ABA 代謝産物が増加することを報告した。Toh ら (2004) は、シロイヌナズナ種子における発芽の高温阻害は ABA 合成阻害剤や GA 処理によって緩和することを報告した。また、シロイヌナズナでは、高温下において種子の ABA 含量は吸水後におだやかに増加すること、GA 内生量の増加は抑制されることから、高温が種子の ABA 生合成を促進するとともに GA 内生量の増加を抑制して発芽を阻害している可能性を示した。

このほか、エチレンは、ABA、GA の合成や代謝、情報伝達に影響して発芽を誘導し、ブラシノステロイドは、ABA の作用を抑制することで発芽を誘導することが知られている (川上, 2021)。

植物ホルモンのほか、温度による刺激も種子の休眠覚醒に影響を及ぼす。多くの植物では、種子を低温で保存するか、吸水した種子を播種前に低温処理することで休眠が打破される。この低温処理温度と処理時間は、夏まきキャベツは乾燥種子で 5~10 °C 24 時間 (岩間, 1972)、ツケナ類は 1~5 °C 2~3 日間 (青葉, 1972)、ダイコンは 3~5 °C 2~3 日 (村上・松本, 1983)、カブは 1~5 °C 2~3 日間 (青葉, 1975)、レタスは家庭用冷蔵庫に 2 日間 (三浦, 1998) と、主要な野菜類の多くが 10 °C 以下、1~3 日間である。ただし、種子春化型の作物では、種子の低温処理は花成誘導の効果があるため、栽培中の抽苔を避けたい場合には注意が必要である。低温処理による休眠覚醒の機構は不明な点が多いが、シロイヌナズナ種子を 4 °C の低温で吸水させると、不活性型の GA を水酸化して活性型に変える酵素の遺伝子の発現

が高まり、活性型のレベルが上昇することが示された (Yamauchi ら, 2004). 逆に高温処理によって休眠打破する植物があり、イネでは乾燥種子で乾熱処理 50 °C 付近 4-5 日間 (Jennings ら, 1964), 蒸気処理 40 °C 5 ~7 日間 (白土, 2012), 吸水種子で 40 °C 1~2 日間 (林, 1977), ホウレンソウでは 60 °C 3~5 日間の高温により発芽抑制物質が分解するためと考えられている.

また、スーパーオキシドアニオン (O_2^-), 過酸化水素 (H_2O_2), ヒドロキシラジカル ($\cdot OH$) などの活性酸素種 (ROS : Reactive Oxygen Species) は、ミトコンドリアの電子伝達経路や細胞膜の NADPH 酸化酵素により生成されるが、シロイヌナズナ種子では H_2O_2 (10mM) 処理により GA 生合成遺伝子 (GA20ox, GA3ox) および ABA 異化遺伝子 (CYP707A) の発現が増加し、種子内 ABA の減少を引き起こし、結果休眠打破を促進して発芽を早めることが報告されており (Liu ら, 2010), 種子発芽に大きく関与することが示されている. ワサビにおいても、曾根ら (2019) が乾燥種子を H_2O_2 によりプライミング処理し、発芽率が増加したことを報告しており、同様の機構が働いていたものと思われる.

3) 種子の保存技術、発芽促進技術に関する研究

種子の保存技術、発芽促進技術については、達山ら (1983) は採種後の 5 °C 土壌中貯蔵が種子の休眠打破に有効であることを報告し、中村 (1990a, 1990b) は、種子の発芽適温が 15 °C であり、休眠打破に GA_3 と GA_4 処理が有効であること、風乾貯蔵した種子の発芽力は、5 °C では 2 か月で失うが、液体窒素中であれば 1 年間保たれることを報告した. 中野ら (1990) は、採種後に GA_3 処理しても発芽しないが、1 か月間のわさび田浸漬 GA_3 処理により、70%以上の種子が発芽したこと、種子は乾燥保存が可能であり、含水率 30%以下に乾燥した種子は氷点下の温度で保存が可能であることを報告した.

大井と木村 (1994a) は、5 °C 湿砂中に 1 年間貯蔵した種子を用い、発芽適温は 15 °C であることを報告し、低温処理による休眠覚醒は登熟日数 35~45 日の種子で高く、同 50 日では効果が認められず、登熟日数が短いほど休眠が浅いことを報告した (1994b). 倉谷 (2005) は、種子の冷凍貯蔵に際しては含水率を 20~30%の範囲に調整することで、実用に供することが可能と報告した.

これらにより、ワサビ種子の発芽適温の解明、湿潤種子の GA_3 処理による休眠打破技術の開発や、播種前低温処理による休眠覚醒、乾燥による長期保存の可能性が示唆されてきた.

4) 育苗技術に関する研究

育苗技術の開発については、足立ら (1980) が、採種直後から 3 °C 湿潤状態で 100 日間前後保存した種子を、地床に播種して育苗する方法を報告しており、田中・古江 (2005) は畑ワサビのセル成型育苗法について、実生苗では経済性からセルサイズ 128 穴で播種後 70 日間の育苗が適すると報告している.

また、新田 (1991) は流水面とパネルの間に空間相を設けた薄膜水耕 (NFT) 改良型養液装置を使用し、ワサビ実生苗の養液育苗技術を開発した. 組織培養苗については、市川と戸田 (1992), 春木と山田 (1993), 市川 (1994), 中村と伊奈 (1997) が増殖技術を開発・提案し、民間種苗会社においても独自の技術により商業生産を行っている. Hoang (2017a) は、組織培養技術を用いたワサビの *in vitro* での大量増殖技術を提示した.

(4) わさび田での栽培研究

わさび田での栽培に関する研究は、これまで学術論文としての報告はなかった. これは、研究用わさび田の確保が困難なことから、わさび田は山間部の谷間や沢沿いに様々な形状、面積、水量、方角、傾斜で築かれているため、栽培環境が水田、畑、施設に比べて不均一であり、再現性の高い試験が難しいことが上げられる.

このため、わさび田の構造を模した栽培装置による研究が行われてきた. 伊奈と飯山 (2003) は、ドレンベッドに川砂を充填して養水を掛け流すワサビ栽培装置を開発した. これはわさび田の構造を模したものであり、わさび田と同程度の栽培期間で根茎生産可能であることを報告した. 橋本ら (2013) は、ビニールハウス内でバミスサンドを培地とした栽培ベッドを用い、12 °C 設定の養液を循環させてワサビを約 10 か月間栽培し、溪流での栽培と同程度に成長することを報告した.

(5) 人工気象条件での研究

ワサビの栽培条件の解明は、主に人工環境下において進められてきた. 伊奈 (1998) は、プラスチックハウス内に温度調節可能なワサビ栽培装置を設置し、気温と水温がワサビの生育に及ぼす影響を調査し、主根系の発達は気温 8 °C, 13 °C, 水温 13 °C で最も良好であったことを報告した. さらに伊奈 (2002) は、プラスチックハウス内にメタルハイドランプと高圧ナトリウムランプを光源とした養液栽培装置を設置し、光量がワサビの生育に及ぼす影響を調査し、純同化率 (NAR) は日平均日射量 5.5~6.0MJ m² day⁻¹ で最も高いこと、個体群成長速度 (CGR) は葉面積指数 (LAI) との関連が大きいことを報告した. Hassan ら (2001) は、NFT によりワサ

びを栽培し、生育に及ぼす養液温度の影響を調査し、生長速度・生長量・生育状態は19℃が13℃よりも優れていたと報告した。

また、植物工場等での栽培技術を応用した研究では、Oguniら(2005)は養液栽培システムを用い、培地の日平均温度を13.5~28.1℃に維持し、根茎が栽培後2年以内で約60gに成長したことを報告した。田中ら(2008, 2009, 2015)は3波長域発光型昼白色蛍光灯を光源とした循環式水耕栽培装置を作製し、光強度はPPFD110 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ が効率的であり、明期8~16hの範囲では明期の長さ按比例して生長が促進されること、気温は20℃以下が望ましく、養液温度は20℃よりも13℃が良いこと、養液EC0.1~2.0dS m^{-1} の範囲では、ECが大きいほど生長が促進されることを報告した。長田ら(2016)、定村ら(2016)は、屋台型スピーキング・プラント・アプローチ(speaking plant approach; SPA)システムの全自動型生育管理機能を生かしたワサビの水耕栽培において、PPFD100 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、明期16時間、養液EC1.5~2.0mS cm^{-1} 、15 \pm 1℃の条件下で、わさび田よりも生育が早かったことを報告した。

Hoangら(2017b)は、組織培養したワサビにおいて、10℃~18℃の低温範囲では、正味同化率(NAR)の増加は相対成長率(RGR)の増加によるが、18℃~26℃の高温範囲では、RGRの減少はNARと葉面積比(LAR)の減少に起因することを報告した(Hoangら, 2017b)。

KimとYou(2013)は、ワサビは赤色光(R)の単色光処理では葉面積と乾燥重量が増加し、青色光(B)単色光処理では葉の特定部位が増加し、B+R混色光処理ではR比の増加に伴って葉面積と乾燥重量が増加することを報告した。種五ら(2016)は、ワサビでは赤色光による光阻害が遠赤色光により緩和されることを報告した。下山ら(2019)は人工栽培施設においてワサビをパーライトに詰めたポットに定植し、遠赤色光を有する白色LED用い、PPFD120 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、明期12時間、養液EC3.0dS m^{-1} 、22℃の条件下で育成が可能であることを報告した。筆者ら(2019)は、ワサビの分けつ茎・腋芽発生数は、B+R混色光処理がBまたはR単色光処理よりも多くなり、遠赤色光(FR)を加えることにより減少することを報告した。

このように人工環境における研究により、ワサビの生育における光、温度条件について様々な基礎的知見が得られている。しかし、ワサビの人工栽培は、わさび田に比べてコスト面や生産性、管理方法で解決すべき課題が残されており、産業レベルでの生産事例は少ない。

(6) 農業資材を用いた栽培に関する研究

わさび田において光環境、温度環境を制御する研究は行われておらず、特にわさび田では初夏から初秋にかけての数か月間、遮光資材を展張して夏季高温期の強光を防ぐことが必須であるが(図1-5)、この遮光栽培技術の研究については、遮光資材、遮光方法の違いがワサビの生育や品質にどのような影響を及ぼすかの報告がない。

遮光資材の目的には、日射の透過量を調節することによる昇温抑制、日長処理などがある(内藤・宍戸, 2008)。種類は寒冷紗、ネット、不織布、軟質フィルム等があり、色は黒色、灰色、シルバー、白色、赤色、青色など多彩である。ネットの織り方や糸の太さ、糸の間隙の大小によって遮光率の調整が可能であり、資材メーカーでは、同じ素材・色で遮光率を複数段階に設定した遮光ネットを製造し、農業生産者の多様なニーズに対応している。現在、素材、素材への添加剤、糸の種類、寸法、織り方、メッシュサイズ等の異なる多種多様な遮光ネットがあり、色、遮光率、反射率などの放射特性、通気性などの物理的特性、引張応力、強度、耐久性などの機械特性によって異なる(Castellanoら, 2008)。

近年は施設園芸において多くの機能的被覆資材が開発され、実用化されている(内藤・宍戸, 2008)。夏季高温期の昇温防止対策として、光合成有効放射(光波長400~700nm)を透過し、熱源となる赤外線を遮断する資材(赤外線吸収遮光ネット、赤外線反射フィルム)が開発されている。また、光合成効率の向上や病虫害抑制、作物の形態調節、開花制御、機能的成分の増強等を目的として、散乱光フィルム、紫外線カットフィルム(内藤・宍戸, 2008)、光質調節(光質選択)資材(禿ら, 2003)、光質変換フィルム(濱田ら, 2009; 吉田ら2009; 浜本ら, 2011; 上坂ら, 2019)等の、特定の光波長域の構成割合を変えることのできる各種資材が開発されている。

しかし、同じ作物・用途であっても、生産者によって異なるタイプのネットが使われており、ネットタイプの選択は、科学的な考察によるものではなく、経験的または経済的な基準によることが多い(Castellanoら, 2008)。これはワサビの生産現場においても同様であり、ワサビ生産者は遮光ネットの破損や劣化による張り直しの際に、農協の購買や量販店で大量に安価で入手可能な遮光ネットを購入することが多い。

(7) 病虫害防除に関する研究

ワサビの主要病害としては、軟腐病、墨入病、輪腐病、根こぶ病、うどん粉病、白さび病、べと病等があり、主

要害虫としては、スジグロシロチョウ幼虫、カブラハバチ幼虫、アブラムシ等が上げられる。

わさび田は、湧水や河川から引き込んだ水を常時掛け流し、排水は河川へとそのまま排水する解放水系である。このため、農業使用により周辺水系への環境負荷が大きくなりやすく、同じアブラナ科野菜で登録のある化学農薬はほとんどが使用できない。したがって、わさび田での病害虫防除は、特例による一部の化学農薬を除き、BT剤等の微生物農薬の散布やパイプ栽培、防虫ネット等の耕種的防除法に限られる。

竹内ら(2008)は、東京都奥多摩地域におけるワサビ病害を調査し、新病害として炭疽病と葉腐病を報告した。田中ら(2014)は、水生昆虫による食害防止対策としてパイプ栽培(図1-6、わさび田土壌に直径・高さが約8cmの塩化ビニル製パイプを差し込み、内部に苗を定植する栽培方法)の有効性を報告した。西島(2011, 2014, 2015)は根こぶ病について、パイプ栽培と石灰質資材の併用による発生抑制方法を開発し、さらに定植時の熱水士壌消毒の有効性を確認した。

松田ら(2018, 2020, 2021)は、静岡県内におけるワサビクダアザミウマの発生を報告するとともに、わさび田で使用可能な既存の化学農薬(ジノテフラン水溶剤)により防除可能であることを報告した。

このように、病害虫防除の研究は、新規病害虫の発見や特性解明、耕種的防除法の開発、既存化学農薬の適用拡大などが主である。

(8) イソチオシアネート類(ITC類)に関する研究

ITC類の研究としては、成分の同定と機能性について多くの報告がある。辛味の主成分であるアリルイソチオシアネート(AITC)は、セイヨウワサビ(*Armoracia rusticana*)、クロガラシ(*Brassica nigra* L.)の辛味の主成分と同じである。ワサビの風味は辛味に加えてグリーンノートといわれる青葉の香りにより構成されている。Inaら(1989)は、グリーンノートに関与する成分として、3種の ω -メチルチオアルキルイソチオシアネートをワサビ根茎摩砕物から分離し、香味に関する性質を明らかにした。また、Etohら(1990)は、3種の ω -メチルスルフィニルアルキルイソチオシアネートを分離し、ワサビ特有の香りを構成する重要な成分として報告した。これらの成分は、ワサビをすりおろした際に細胞が壊れ、前駆物質のグルコシノレート(GSL)に分解酵素のミロシナーゼが反応することで発生し(Ohtsuru・Kawatani, 1979)、これまでに20種類以上が確認され

ている。

ITC類には、ワサビの風味を構成すること以外にも様々な機能性が認められ、AITCの抗菌性、抗寄生虫活性のほか、6-メチルスルフィニルヘキシルイソチオシアネート(6-MSITC)には肝臓の解毒代謝酵素の活性、活性酸素産生抑制作用、血流改善作用、がん細胞転移抑制作用、花粉症軽減効果、炎症抑制作用等の多くの機能が報告されている(金印わさび機能性研究所、<http://www.wasabi-labo.jp/sulfinyl/function/>)。

ワサビ根茎中の成分含量について、荒川ら(2001)は、ワサビ品種・系統における根茎の辛味成分含量とその部位別分布を調査し、根茎のAITC含量は根茎肥大性の良い品種・系統で低い傾向があること、AITC含量は根茎外層部で高く中心部で低いこと、ミロシナーゼ活性は維管束部で最も高く、髄ではほとんど認められなかったことを報告した。また、山根ら(2019)と羽賀ら(2019)は、ワサビ属植物の遺伝的多様性と辛味関連成分の多様性を調査し、野生種では極めて多様なGSLが存在する一方で、栽培品種においてはGSLの成分組成の多様性が著しく低いことを報告した。成分含量の増強について、石上ら(1981)はAITCが硫黄化合物であることに着目し、ワサビに硫酸塩の葉面散布により硫黄を施用し、吸収され根茎部に移行した硫黄の約70%が可溶性有機態Sとして存在したことを報告している。Sultanaら(2002)はワサビに硫酸アンモニウムを施用し、根茎と葉柄のAITC含量が増加したことを報告した。

6 水ワサビ産地が抱える問題と課題

わさび田には、大量の養水を確保できる夏でも涼しい山間の立地が必要であり、条件に適合する場所は全国的に限られる。また、畳石式わさび田の造成費用は築田工事だけで1,000万円/10a以上(足立, 1987)を要し、さらに重機を投入することが困難な山間の狭隘な傾斜地において、水路や石垣、作業道等の付帯工事が加わるため、初期投資費用が莫大となる。したがって、ワサビの生産量増大を図るには、わさび田の増築ではなく、生産性の向上により単収を増加することが現実的である。

生産性向上には、定植苗の安定供給と、わさび田での生育安定化が必要であるが、水ワサビ生産現場では、これらの要素に大きな不安が生じている。静岡県の水ワサビ定植苗の需要は年間約1,600万本(久松ら, 2020)、不足数は約200万本と推計されている(図1-7)。水ワサビ栽培では主根茎が商品として販売可能な大きさになった時点で収穫され、その後、わさび田の整備と定植苗の準備が整えば周年で定植できるため、栽培が途切れる

ことはない。しかし、静岡県内の水ワサビ産地では慢性的な定植苗の不足により計画生産に支障をきたしており、周年定植可能なワサビの利点を生かしていない。

水ワサビ栽培用品種として、種子から実生苗を育苗して定植苗とする種子繁殖性品種と、分けつ茎を採取して定植苗とする栄養繁殖性品種が利用されている。種子が採種親株1株当たり約200粒採種できるのに対して、分けつ茎は採取親株1株当たり約5株しか採取できず、種苗の増殖効率でみると種子繁殖性品種が圧倒的に優れているため、種苗の安定供給の点から種子繁殖性品種の活用が欠かせない。しかし、ワサビでは種子によって発芽率と発芽勢のばらつきが大きく、育苗現場では育苗計画に支障が生じるため、産地では種子の発芽を安定させる技術開発が求められている。

また、これまで水ワサビ用の実生苗について、乾燥種子とセルトレーを用いた育苗技術を研究した報告はなく、わさび田に定植する実生苗の適切な大きさやこれに要する育苗期間は不明なままである。このため、水ワサビ生産者によって求める苗の大きさ、苗質が異なり、苗生産者との間に大きな齟齬が生じており、実生苗の大量安定生産・供給に資する育苗基準が求められている。

さらに、近年は夏季の猛暑・酷暑日の増加や渇水等により、冷水を掛け流すわさび田においても気温・水温の上昇が憂慮されている。従来通りの遮光管理では生育量の確保や歩留り、秀品率が維持できない恐れがあるが、水ワサビの遮光資材について、光合成有効放射 (PAR) の視点から適切な遮光率を検証した研究はなく、遮光資材の色調についても、透過光の光波長の構成が水ワサビの生育や重要な品質である辛味・香り成分含量に及ぼす影響を調査した研究はない。これらのことから、水ワサビの生育促進と品質の維持・増強に資する透過光量、光質を実現するとともに、昇温防止効果の高い機能性を有した遮光資材の活用が求められる。

7 本研究の目的

このような先行研究や歴史的背景を踏まえ、本研究は、静岡県内の水ワサビ産地で課題となっている定植苗の供給体制構築のための種子の発芽管理および育苗技術の構築に加え、夏季を中心としたわさび田の栽培環境の改善について検討したものである。

(1) ワサビ乾燥種子の発芽促進技術の開発

第2章および第3章ではワサビ種子の安定した発芽技術の構築を試みた。

種子繁殖性品種のワサビでは、種子から育苗した実生苗をわさび田に定植し、1年間以上栽培する (図1-8)。

花芽は秋季の低温遭遇によって分化し、翌春に花茎が抽苔して伸長しながら連続的に開花して、4月に開花盛期を迎える。開花期間は2か月以上で、開花盛期は1か月以上続き、種子は開花後約50日間で成熟して長角果から脱粒する (足立, 1987)。

ワサビの採種は、長角果が裂開し成熟した種子が脱粒する頃に可能となる。静岡県では、施設内では5月上旬に、わさび田では5月下旬～6月上旬に、長角果の裂開が始まり、この時期に長角果ごと網袋に入れてわさび田の流水に1か月以上浸漬する。長角果は浸漬中に腐敗して網袋外に流出し、網袋内に残留した種子を採種する。 (足立, 1987; 馬場ら, 2018)。

種子保存について、かつては湿砂と混合した湿潤状態で種子を保存したが (足立, 1987)、水分含量が多いため不時発芽や腐敗を生じやすく、この方法では1年以上の保存が困難である。長期保存ができないと採種時期が限定され、播種期によっては採種量が確保できず問題が多い。このため、種子は複数年の長期保存が望まれ、近年は保存性を向上させるために採種後に乾燥させて、10月以降の播種まで低温庫で保管される。

ワサビ種子は乾燥により休眠が深くなり、発芽が安定しなくなる。静岡県のワサビ育苗現場では乾燥種子の発芽を安定させるために、一般に播種前に5℃の湿潤条件においてGA₃で3～5日間処理する操作が行われている (久松, 私信) が、種子は同じ産地、品種、採種時期であっても、採種したワサビ生産者によって発芽率が異なる。この理由として、ワサビの現地種子は、生産者間で調製方法 (乾燥方法、乾燥温度、目標とする含水率等)、保存方法 (保存温湿度、保存期間等) が異なるため、種子の休眠程度が異なっている可能性が考えられる (久松, 未発表)。しかし、乾燥種子の安定的な発芽促進技術については、技術的に確立していない。

また、ワサビの実生苗の多くは施設で育苗されているが (図1-9)、施設内の温度は一日のうちでも昼夜や気象状況、さらに季節で大きく変動するため、一定に維持することは困難であり、発芽揃いに影響する。

静岡県内では10月上旬までは日平均気温が20℃以上の日が多いため、実生苗の慣行育苗では発芽適温の15℃となる10月中旬以降に播種するが、発芽率が20℃以上で向上すれば、10月上旬以前からワサビ実生苗の育苗を開始することが可能となり、育苗期間を長期化することにつながる。さらに、これまで高冷地でも困難であった夏季高温期育苗での発芽が安定化し、静岡県内における実生苗の周年生産供給体系の構築にもつながる。

これらのことから、第2章ではGA₃処理後の置床前の低温処理と置床後の温度条件がワサビ乾燥種子の発芽に及ぼす影響を、続く第3章では置床前のGA₃処理期間と低温処理および置床後の温度の組合せがワサビ乾燥種子の発芽に及ぼす影響を明らかにした。

(2) 水ワサビ実生苗の効率的育苗技術の開発

第4章では、ワサビ育苗で利用が増加しているセル成型苗の生産技術を検討した。

静岡県の水ワサビ産地では定植苗生産の分業化が行われ、水ワサビ生産者が自ら採種したワサビ種子を、苗生産を請け負う生産者に渡して委託しており、生産環境が安定した施設園芸生産者への苗生産委託によるセルトレーの利用が増加している(稲葉ら, 2018)。しかし、水ワサビは定植後、流水中で生育させるため、水ワサビ生産者が定植後の苗の流失を恐れるあまり、より大きな苗の生産を要望する(久松, 私信)。このため、水ワサビ向けの慣行育苗におけるセルサイズは72穴、育苗期間は約4か月(稲葉ら, 2018)と、主要なアブラナ科作物であるキャベツ(25日前後(小寺, 1996))やハクサイ(20~25日間(山本・月時, 1996))の育苗期間より長期間である。

慣行よりもセルサイズを小さくし、育苗期間を短縮できれば、育苗効率の向上により慢性的に不足する定植苗を充足できる可能性が高まるが、水ワサビ用実生苗における育苗容器の大きさ、育苗期間、苗形質が定植後の生育に及ぼす影響についての報告は無い。

水ワサビ用実生苗の育苗で余剰となった種子を流用して育苗する畑ワサビでは(久松, 私信)、水ワサビ用苗より小さいセルサイズ128穴で播種後70日間の育苗が適するとの報告もある(田中・古江, 2005)が、水ワサビ栽培での報告事例はなく、定植後の生育に及ぼす影響は検証されていない。

これらのことから、第4章では水ワサビ種子繁殖性品種のセル成型育苗について、セルサイズ(72, 128および200穴)と育苗期間(2, 3および4か月)が、実生苗の生育とわさび田定植後の生育に及ぼす影響を明らかにした。

(3) 水ワサビの生育を促進する遮光管理技術の開発

第5章では、わさび田における遮光による光環境条件

とワサビの生育および辛味成分との関係を検討した。

水ワサビは、一年を通して定植し、季節を問わずに次作を開始できるが、栽培期間が1年以上であるため、必ず栽培期間中に夏季の強い日射と高温の影響を受けて生育することになる。

ワサビの生育に適した水温は8~18℃(最適温12~13℃)であり、18℃以上になると軟腐病の発生が増加する。気温は年平均13~15℃程度の地域が良く、最高気温が28~30℃を超えると日焼けを生じるほか、軟腐病が激発する。夏の強い直射日光は、わさび田の気温と水温を上昇させ、軟腐病の原因となるため、遮光を行う(足立, 1987, 図1-10)。自然林による遮光が望めない場所では人工的に遮光する必要があり、わさび田では古くからヤマハンノキ(*Alnus hirsuta*)が植えられてきた。ヤマハンノキは落葉広葉樹であり、日差しが強い5~10月頃に葉を茂らせてわさび田を遮光する。しかし、落ち葉を拾う作業が必要であり、管理の手間がかかるとの理由から、現在は遮光ネットが普及している(青木, 2009)。

生産者によるわさび田の遮光は、ワサビの茎葉が萎凋しないよう強光を回避することを目的としてきたことから、遮光率が高い遮光資材が使用される傾向があり、慣行では黒色ネットが多用される。しかし、透過日射量や光質がワサビの生育や品質に及ぼす影響については検討されていない。

これらのことから、第5章では、わさび田で色の異なる4種類の遮光ネットを供試して比較栽培試験を行い、ワサビ根茎の生育と辛味成分含有量に及ぼす透過日射量と光質の影響を検討した。

(4) 水ワサビ栽培における新たな実生育苗管理技術およびわさび田における遮光管理技術の提言

第6章では、第2章から第5章の研究結果を踏まえ、水ワサビ実生苗の周年大量生産・供給体系構築に資する新たな種子発芽管理技術、育苗管理技術とともに、新規遮光資材を用いたわさび田での栽培環境改善方法について提言した。

これまで、水ワサビの栽培管理方法について、定植苗の生産供給からわさび田における生育促進に至るまでを一元的かつ体系的に改善した研究は報告されておらず、本研究は、400年以上にわたる水ワサビ栽培に対し、初めて科学的な視点による技術刷新を企図するものである。

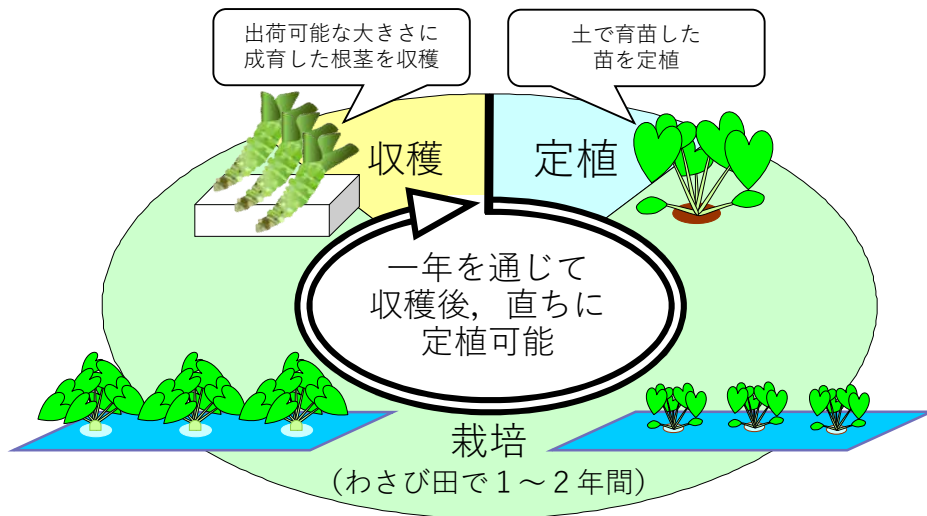


図1-1 水ワサビの栽培サイクル

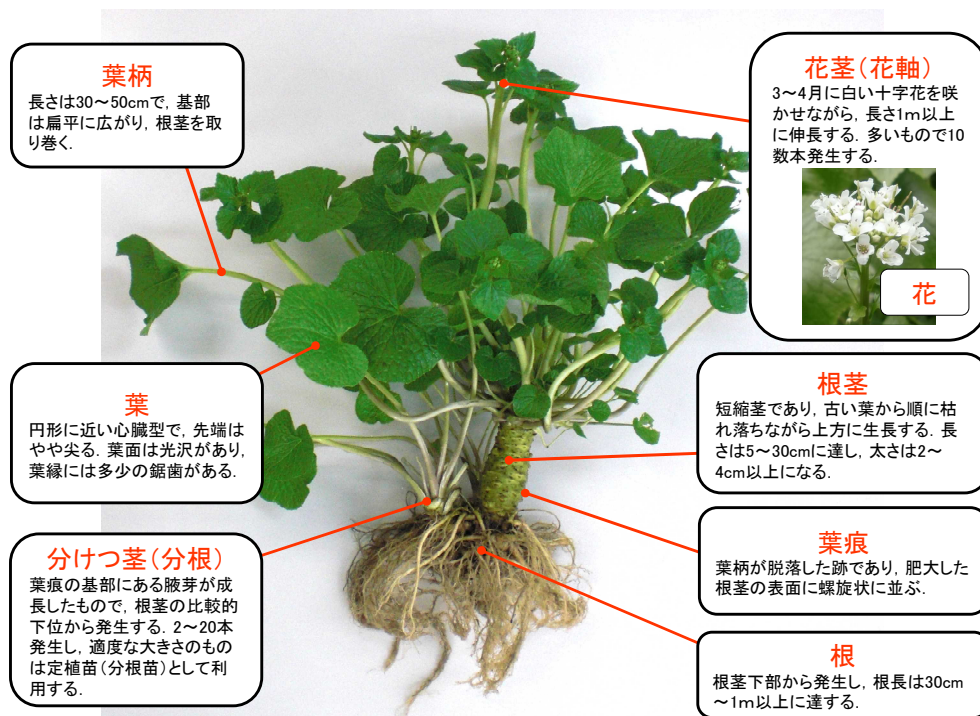


図1-2 水ワサビの草姿

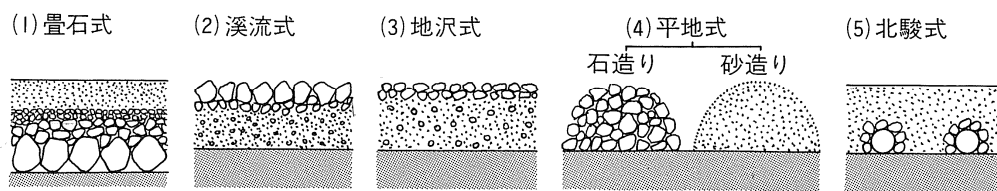


図1-3 わさび田の田床断面図（足立，1987）

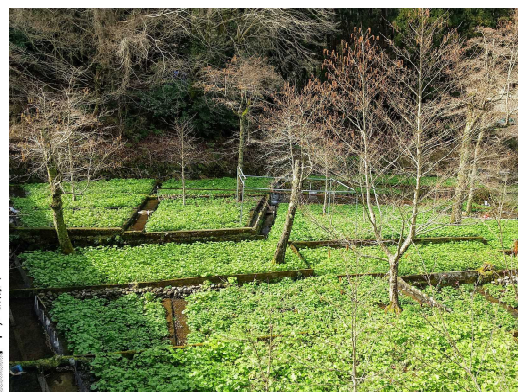
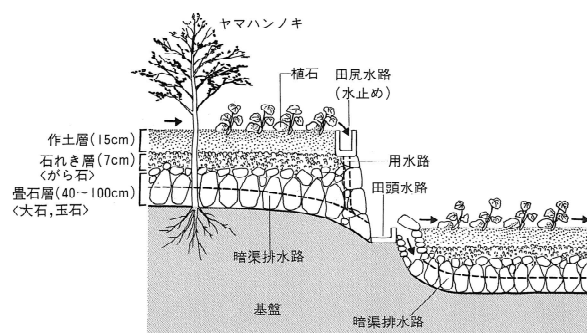


図1-4 畳石式わさび田の構造図（足立，1987）



展張前
(撮影日 2016年4月20日)

展張後
(撮影日 2016年8月26日)

図1-5 わさび田における夏季高温期の遮光ネットの展張



図1-6 ワサビのパイプ栽培

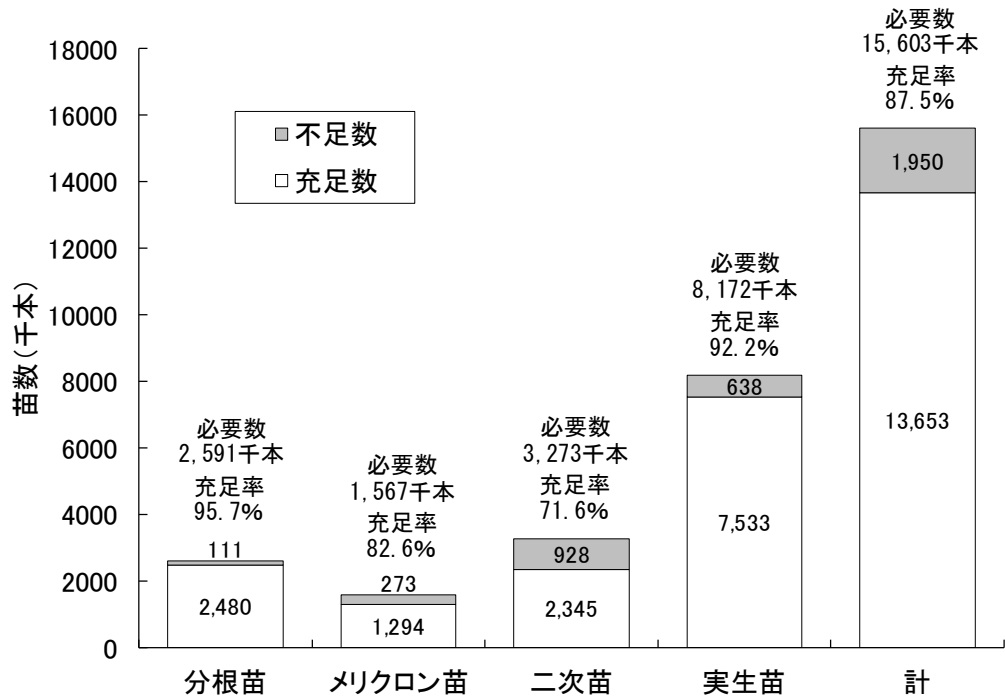


図1-7 静岡県内におけるワサビ定植苗の年間必要数，充足数，不足数，充足率の推計



図1-9 水ワサビ実生苗の施設育苗

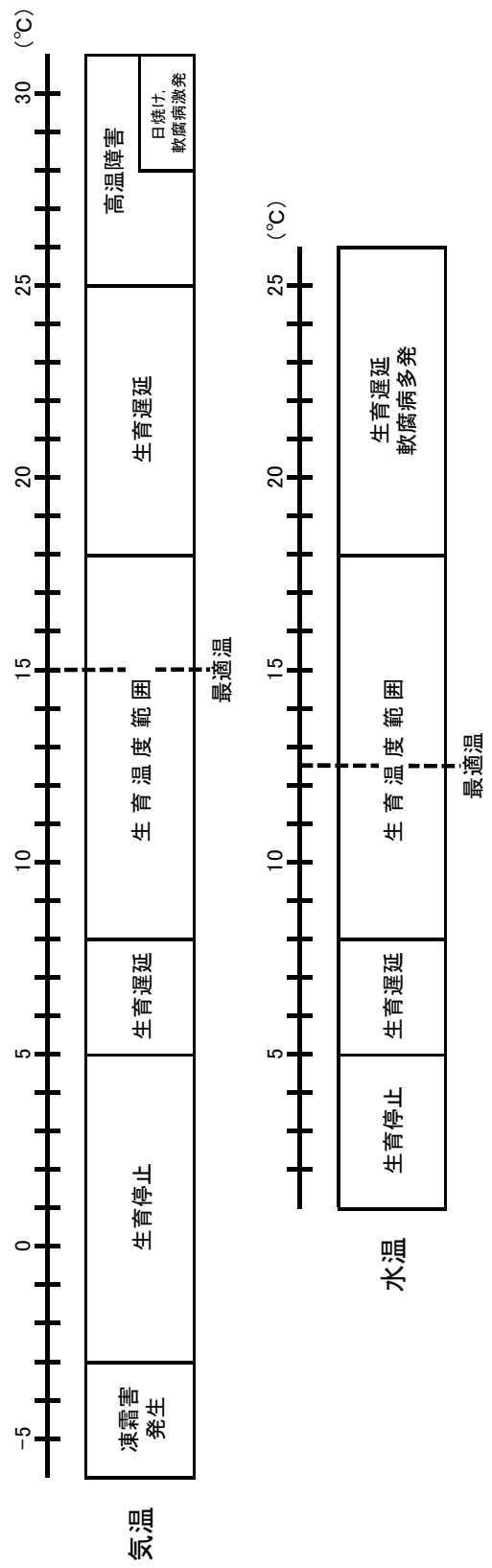


図1-10 ワサビの生育と温度

表1-1 ワサビの国内登録品種一覧^z

| 登録番号 | 品種名称 | 出願者名／育成者権者名 | 登録年月日 | 登録公表日 | 育成者権の 消滅日 |
|-------|-----------|-----------------|------------|------------|--------------|
| 2586 | G系-1 | エスピー食品株式会社 | 1991/2/21 | 1991/2/21 | 2006/2/22 |
| 2587 | G系-4 | エスピー食品株式会社 | 1991/2/21 | 1991/2/21 | 2006/2/22 |
| 2886 | あまぎみどり | 静岡県 | 1991/11/19 | 1991/11/19 | 2000/11/21 |
| 3174 | G系-2 | エスピー食品株式会社，金子元一 | 1992/7/24 | 1992/7/24 | 2007/7/25 |
| 3402 | G系-6 | エスピー食品株式会社 | 1993/3/10 | 1993/3/10 | 2008/3/11 |
| 4005 | 君栃 | 君島鑑一，君島カツ，君島康彦 | 1994/3/23 | 1994/3/23 | 1998/3/24 |
| 4060 | まるいわ-V号 | 安藤敏男 | 1994/8/22 | 1994/8/22 | 2009/8/23 |
| 4179 | まるいわ-III号 | 株式会社ミヨシ，安藤敏男 | 1994/12/26 | 1994/12/26 | 2004/12/28 |
| 4364 | みさわ | 金印わさび株式会社 | 1995/3/15 | 1995/3/15 | 2000/3/16 |
| 4892 | 羅漢2号 | 島根県 | 1996/2/27 | 1996/2/27 | 2006/2/28 |
| 4893 | 大神2号 | 島根県 | 1996/2/27 | 1996/2/27 | 2006/2/28 |
| 5312 | グリーンマジック | 株式会社ミヨシ | 1997/1/30 | 1997/1/30 | 2003/1/31 |
| 6030 | 天城にしき | 株式会社ミヨシ | 1998/1/22 | 1998/1/22 | 2001/1/23 |
| 8845 | 徳育1号 | 山口県 | 2001/3/19 | 2001/3/19 | 2010/3/20 |
| 9658 | みつき | 金印わさび株式会社 | 2002/1/16 | 2002/1/16 | 2022/1/17 |
| 12978 | SB忍野1号 | エスピー食品株式会社 | 2005/3/23 | 2005/3/23 | |
| 15408 | 平成一号 | 鈴木丑三 | 2007/3/23 | 2007/3/23 | 2019/3/26 |
| 15409 | 平成三号 | 鈴木丑三 | 2007/3/23 | 2007/3/23 | 2019/3/26 |
| 15656 | 伊豆かおり | 三枝文彦 | 2007/10/22 | 2007/10/22 | |
| 16753 | 貴宝 | 金印株式会社 | 2008/3/17 | 2008/3/17 | |
| 26271 | 伊づま | 静岡県 | 2017/9/28 | 2017/9/28 | |
| 28705 | 伊豆小金 | 浅田譲治，金印株式会社 | 2021/10/21 | 2021/10/21 | |

z 2022年12月31日現在

第2章 置床前の低温処理が乾燥種子の発芽に及ぼす影響

ワサビ種子の発芽適温は15℃とされており、20℃以上では発芽が不安定となる(中村ら, 1990a)。しかし、ワサビ種子は採種時には休眠しており、15℃湿潤状態においても発芽が困難な場合がある。このため、ワサビ種子では発芽を促進するための種子処理が必要であり、播種前のGA₃処理や低温処理などが休眠打破に有効とされている(中村ら, 1990a; 大井・木村, 1994a; 大井・有賀, 1994b; 達山ら, 1983)。しかし、GA₃処理や低温処理がどのように作用して発芽率が向上し、発芽勢が短縮するのか明らかではない。中村ら(1990a)は湿砂中に5℃で保存した種子を用い、GA₃またはGA₄で休眠打破し、置床温度15℃での発芽率が57~98%の発芽率であったことを報告し、大井と有賀(1994b)は登熟日数50日の種子を湿砂中に3℃で30日間保存し、GA₃無処理で置床温度15℃での発芽率が3.3%であったことを報告し、達山ら(1983)は採種後の種子を土壌中に5℃で約2か月間保存し、GA₃無処理で置床温度15℃での発芽率が84%であったことを報告している。これまでの報告は、当該産地の慣行法である湿潤状態で低温保存した種子に休眠打破した場合に限られ、乾燥種子を用いて発芽性を向上させた報告はない。この理由として、ワサビ種子は乾燥により発芽力が低下する *Recalcitrant crop seeds* に分類されてきた(中村, 1985)ためと考えられる。*Recalcitrant crop seeds* は、乾燥や凍結等により種子の細胞小器官が損傷して発芽能力を失う種子を指し、アボカド、マンゴー、マンゴスチン、ライチ、ココア等が該当する。

一般的に多くの園芸作物において、採種後の保存性を向上させるためには種子を乾燥させることが望ましく、近年の生産現場では採種後に乾燥させて低温庫で保管されることが多い。ワサビにおいても乾燥種子の利用が望まれている。しかし、ワサビ種子は含水率が高いまま成熟・脱粒し、含水率の低下・乾燥の過程を経ることなく一次休眠の状態にあり、乾燥することによりさらに二次休眠状態になると考えられ、育苗現場においては深い休眠による発芽の遅延や不揃いが問題となる。

定植苗の安定的な生産供給には、採種量が大きく増殖効率の高い種子繁殖性品種の活用が有効であるが、そのためには保存性向上のために乾燥した種子の発芽促進方法の確立が必要であることから、本実験では乾燥種子の発芽に及ぼす温度の影響を解明するため、播種前後の温度条件を検討した。

1 材料および方法

供試材料として種子繁殖性品種‘伊づま’(伊奈ら, 2017)の種子を用いた。2016年5月11日に充実した長角果を採取し、5月11日~6月14日にわさび田の流水中に長角果ごと浸漬して莢を腐敗させた。6月14~16日に種子を15℃で新鮮重に対し32%まで風乾させた後、6月16日から試験開始時までビニール袋とタッパーに密封し、低温恒温器(IN802, ヤマト科学(株))内で、0℃で8か月間保存した。実験は2017年2~5月に行った。

保存したすべての種子を、GA₃を100 ppm含む水溶液(0.00029 M)に5℃で3日間浸漬してGA₃処理した(図2-1)。GA₃処理終了後、低温無処理区(処理期間0日)は低温処理を行わず、低温処理区では純水で湿らせたろ紙を敷き詰めたタッパー(縦235 mm×横180 mm、深さ30 mm)内に種子を重ならないように広げ、5℃の暗条件下で低温処理した。タッパー内は適宜純水を追加して湿潤状態を維持した。種子処理終了後、純水で湿らせたろ紙(直径90 mm、定性濾紙No.2, ADVANTEC)を敷いたシャーレ(直径90 mm×高さ15 mm、ポリスチレン製, アズワン(株))に種子を50粒ずつ置床し、所定の置床温度に設定した暗黒の小型低温恒温器(SLC-25A, 三菱電機エンジニアリング(株))内に静置した。置床後の試験規模は1区50粒3反復とした。

低温処理区として、処理期間を0日(無処理)、5日、10日および15日とした。処理終了後の置床温度設定10℃、15℃、20℃、25℃および30℃を組み合わせた20区を設定した。さらに、低温処理温度である5℃が直接発芽に及ぼす影響を確認するために、低温処理なしで5℃置床における発芽についても調査した(図2-1)。

種子から発根した幼根が2 mm以上になった状態を発芽(大阪府立大学農学部園芸学教室編, 1986; 張・橋永, 1997)と定義し、調査は低温恒温器内に静置してから40日間、種子の発芽率について実施した(図2-2, 図2-3)。最終発芽率(置床40日後)の50%に達した日数を発芽勢(G50)とした。なお、置床後40日間後も発芽しない最終発芽率0%の処理区の発芽勢については、発芽勢40日とした。

2 結果

置床温度を低温処理と同じ 5℃とした場合の発芽率を図 2-4 に示した。GA₃ 処理後 15 日間は種子の発芽はみられなかったが、置床 20 日後の発芽率が 12.0 %、最終発芽率（置床 40 日後）が 89.3 %となった。

5℃低温処理期間と置床温度の関係について、20 処理区の発芽率を図 2-5 に示した。5℃低温処理期間 0 日区（無処理）の最終発芽率は、10℃置床で 89.3 %、15℃置床で 73.3 %、20℃置床で 30.7 %、25℃置床で 5.3 %、30℃置床で 0 %と置床温度が高くなるほど低下した。

いずれの 5℃低温処理期間においても 10℃置床が最も発芽率が高かった。5℃低温処理期間と発芽率との関係を見ると、いずれの置床温度でも 5℃低温処理期間が長くなるほど最終発芽率は高くなった。10℃置床では、低温処理 10 日区で 90 %以上が発芽した。15℃置床では、低温処理 5 日区で 80.7 %、10 日区で 88.0 %と発芽率が高まり、15 日区では 94.7 %と 10℃置床と同等の発芽率となった。20℃置床では、低温処理 0 日区の 30.7 %が、5 日区で 54.0 %、10 日区で 60.0 %、15 日区で 70.7 %と低温処理が長くなるほど顕著に高まった。25℃置床では、低温処理 5 日区で 17.3 %、10 日区で 19.3 %と高まり、15 日区で 38.7 %となった。30℃置床では、低温処理 10 日区までは 0~5.3 %であったが 15 日区で 22.7 %となった。

5℃低温処理期間が長くなるほど置床後速やかに累積発芽率が増加したため、いずれの 5℃低温処理期間、置床温度においても GA₃ 処理終了後 40 日で発芽率がほぼピークに達した。

最終発芽率と発芽勢を表 2-1 に示した。5℃低温処理期間、置床温度の有意性は、最終発芽率と発芽勢のいずれも検出された。最終発芽率は長い 5℃低温処理期間、低い置床温度で高く、発芽勢は長い 5℃低温処理期間、低い置床温度で短かった。最終発芽率と発芽勢について、5℃低温処理期間と置床温度との交互作用はいずれも検出されなかった。

3 考察

静岡県における種子繁殖性品種の育苗では、春に採取した種子を乾燥させ、低温庫で約 3 か月間以上保管した後、秋以降に播種・育苗が行われる。しかし、乾燥方法は生産者間で異なり、その実態についての調査事例はない。アブラナ科作物の発芽適温は、キャベツ 15~30℃（小寺, 1996）、ハクサイ 18~22℃（幸田, 1996）、ツケナ類 15~35℃（青葉, 1972）とされている。アブラナ科作物の実用的な発芽率は、種苗法第六十一条十九

号第一項の規定に基づく指定種苗の生産等に関する基準に定められており、75~85 %が推奨される。

中村（1990a）はワサビ種子の発芽適温が 15℃であり、10℃では平均発芽日数がきわめて長く、休眠の深い時期には 20℃以上では完全な発芽は望めないことを報告している。大井・木村（1994a）は 15℃で顕著に高い発芽率を示すことを報告している。しかし、いずれも採種後に湿砂中で貯蔵した湿潤種子について調査したものである。ワサビの乾燥種子の発芽率については、乾燥種子の貯蔵試験において、中野ら（1990）が発芽温度 15℃で約 80~90%、中村（1990b）が 0~71%、倉谷（2005）が約 20~80%と報告しているが、発芽温度の影響は調査されていない。

本試験において、低温処理と同一の 5℃置床では、15 日目まで発芽しなかったが、その後発芽が認められ、最終発芽率は 89.3 %と高く（図 2-4）、ワサビの乾燥種子は湿潤条件を与えれば 5℃の低温下でも順調に発芽することが認められた。この最終発芽率は、低温処理 0 日区での 10℃置床の 89.3 %と同等で（図 2-5）、同 0 日区 15℃置床の 73.3 %より高かった。よって、低温処理を行わない場合には、これまで好適とされてきた 15℃より低温域が発芽に適することが示唆された。

本試験において、置床温度 10℃と 15℃を比較すると 5℃低温処理期間に関わらず 10℃置床の発芽率が同等か高く推移した（図 2-5）。5℃低温処理期間 0 日区の 15℃置床の最終発芽率は 80 %に満たなかったが、5℃低温処理期間が長くなるほど 10℃置床の発芽率に近づき、5℃低温処理期間 15 日区でほぼ同等となった。これと同様の傾向が 20℃以上の置床温度で確認され、特に 5℃低温処理期間 15 日区の 20℃置床でほぼ実用レベルに近い 70 %の発芽率が得られた。以上のように、GA₃ 浸漬処理後の 5℃の低温処理により、発芽温度域が 20℃以上の高温域にまで拡大したことが示された。この理由としては以下のことが考えられる。

GA は種子においては発芽を促進する植物ホルモンであり、種子の吸水に伴って種子内で生合成される。GA には多くの種類があるが、植物ホルモンとして機能する活性型 GA は GA₁、GA₃、GA₄ など数種に限られる。シロイヌナズナでは GA₄ のホルモン活性が強く（Yang ら, 1995）、発芽を誘導しない前駆体である GA₉ からジベレリン 3-酸化酵素（GA3ox）によって変換されて生成し、ジベレリン 2-酸化酵素（GA2ox）によって不活性型である GA₃₄ に変換される。このように、活性型 GA の量は、GA3ox と GA2ox が協力的に働いて調節される。GA は種子内の加水分解酵素の合成を促して貯蓄物質を分解

させ、発芽のためのエネルギー供給に寄与するが、GAによる α -アミラーゼの合成促進は、ABAによって抑制される (Cchrispeels & Varner, 1967). ABAは種子の登熟、休眠の獲得と維持に働く植物ホルモンであり、種子の発達過程で胚の形態が完成するころに蓄積量が大きくなり、乾燥を伴った成熟過程で減少する。ワサビ種子は成熟過程に乾燥を伴わず、高い含水率のまま脱粒するため、脱粒時にはABAの蓄積量が減少せずに一時休眠状態となっている可能性がある。さらに脱粒種子を急激に乾燥調整すると、ABA蓄積量が大きいままとなり、二次休眠がさらに深くなり、GA₃処理だけでは発芽率が実用レベルにまで達しない恐れがある。

種子内のABAはカロテノイドを経由して生合成され、水酸化酵素により不活性化することで量が制御される。シロイヌナズナ種子では、吸水後に速やかに水酸化酵素遺伝子の発現が増加し、内生ABA量が減少する (Kushiroら, 2004)。しかし、高温下では吸水後にABA生合成が促進されるとともに、GA内生量の増加が抑制されて発芽が阻害されると考えられている (Tohら, 2004)。また、休眠種子では吸水後の水酸化酵素遺伝子の発現が抑制されており、休眠覚醒した種子では吸水直後に水酸化酵素遺伝子の発現が増加することが示されている (Millarら, 2006)。

ABAは種子の乾燥ストレスに関与し、種子の乾燥状態は休眠の覚醒と維持の双方に作用するが、条件は作物によって異なる。アブラナ属作物種子の休眠覚醒に対する最適な貯蔵湿度は、ミズナ35~50%、カラシナ15~50%、ナタネ0~35%であり、ダイコンには貯蔵湿度の影響が認められないこと、最適な貯蔵湿度の範囲外では休眠覚醒が阻害されることが報告されている (徳増ら, 1975; 徳増ら, 1981a; 徳増ら 1981b)。

種子への低温処理は、これら植物ホルモンの内生量に影響を与えることが分かかってきており、シロイヌナズナ種子を4℃の低温で吸水させると、不活性化型のGA₉から活性化型のGA₄を生成するGA3oxの発現が高まり、GA₄の内生量が増加することが報告されている (Yamauchiら, 2004)。また、低温処理によりGA₄を不活性化するGA2oxの発現が抑制されることも報告されており、低温処理がGA生合成と不活性化の双方に影響することが示唆されている (山内ら, 2005)。ワサビ種子においても、達山ら (1983) は、5℃の低温処理が休眠打破に有効であることを報告している。

発芽温度は休眠覚醒とともに変動することが知られており、ミズナ、カラシナ、ナタネでは、休眠覚醒とともに15℃から25、35、5℃の順に拡大する (徳増ら,

1981a; 徳増ら 1981b)。アブラナ属作物11種類について休眠覚醒した種子を用いた発芽温度試験では、各作物ともに35℃で発芽が早く、次いで25、15、5℃と温度が低下するにつれて発芽は遅くなり、最適発芽温度は休眠覚醒途上の15℃以下から休眠覚醒後に25~35℃に高まることが報告されている (Tokumasuら, 1985)。

これらの知見から、本試験においても5℃低温処理が種子の休眠覚醒に影響を及ぼし、発芽可能温度が高温域まで拡大した可能性が考えられる。

過去の報告 (中村ら, 1990a; 大井・木村, 1994a; 大井・有賀, 1994b; 達山ら, 1983) では、ワサビ種子を当該産地の慣行法に準じ、湿潤した川砂等と混合して保存してから低温処理を行っている。保存方法自体による休眠覚醒や、種子の発芽率に及ぼした影響は考慮されていない。

本県の栽培現場において、乾燥せずに湿潤状態で保存した種子は、保存中に不時発芽しやすいといわれている。これは、湿潤状態では保存中に休眠の浅い種子からゆるやかに休眠覚醒し、順次発芽するためと考えられる。このように休眠種子と休眠覚醒途上の種子が混在した状態では、休眠打破処理としての低温処理の影響が不明瞭になる可能性がある。乾燥種子では保存中の不時発芽はみられず、乾燥処理によって一律に種子の発芽が抑制された状態にある。

本試験は、種子の保存性を向上させるために乾燥させた種子に対する低温処理を行ったものである。低温処理の発芽への影響は、5℃低温処理期間5日区から認められるが、20℃置床の最終発芽率は5日区で54.0%、10日区で60.0%、15日区で70.7%であり、低温処理の効果は明瞭であった。このことから、乾燥種子の発芽率の向上のためには15日間の5℃低温処理が確実であり、高温域での実用的な発芽率を確保するうえで意義があると考えられた。また、乾燥や低温処理が発芽温度や発芽率に影響していることが示唆されたため、種子の発芽温度や発芽率を評価する際には、種子の保存方法を考慮する必要があると思われる。

静岡県のワサビ栽培現場では種子の発芽を安定させるために、一般に播種前に5℃の湿潤条件においてGA₃で3~5日間処理する操作が行われている (久松, 私信)。既往の研究 (静岡県農業試験場わさび分場, 1974) では、15℃においてGA₃処理した場合を低温処理と比較しているが、低温下でのGA₃処理の影響については検討されていない。さらに、低温下でのGA₃処理後に一定の低温期間を組み合わせる処理も検討されてこなかった。ワサビ種子の発芽において、GA₃処理および5℃の低

温処理のいずれも休眠打破のための処理とされ(大井・木村, 1994a; 達山ら, 1983), 本実験の結果から GA₃ の(湿潤)低温処理はワサビ種子の休眠覚醒をより確実にする可能性がある。本実験では置床温度 10 °C で低温処理の期間に関わらず最も高い発芽率が得られた(図 2-5)。これは, GA₃ の 3 日間処理による休眠打破の効果が小さかったが, 10 °C が発芽可能な温度であると同時に, 低温として休眠打破の効果があり, 10 °C 置床中に確実な休眠覚醒に至ったためと考えられる。

今後, ワサビ種子の休眠覚醒についてはさらに詳細な検討が必要と思われるが, 現地でのワサビの種苗増殖にあたっては, 5 °C での GA₃ 処理後, さらに一定期間の低温処理を行うことで, 発芽に好適な温度域が拡大し, 効率的な増殖を可能にするものと考えられる。

なお, 発芽率のピークを, GA₃ 処理終了後の日数で考えると, 5 °C 低温処理期間に関わらず GA₃ 処理終了後 40 日と認められた。これを, 置床後の日数で考えると, 5 °C 低温処理期間 0 日区で置床 40 日後, 5 日区で置床 35 日後, 10 日区で置床 30 日後, 15 日区で置床 25 日後と, 5 °C 低温処理期間が長いほど置床からの日数が少なくなっている。すなわち, 乾燥種子への 5 °C 低温処理は, GA₃ 処理終了後から発芽率のピークまでの期間を

延長せず, 播種から発芽率のピークまでの期間を短縮するため, 播種後の発芽揃いが向上し, 育苗の効率化に寄与できるものと考えられた。

本試験の結果を現地における種子繁殖性品種の育苗に当てはめて考えると, 次のように整理される。ワサビの実生苗育苗では, 当年採種の種子を乾燥させて秋以降に播種する。自然条件では気温が高い時期ほど発芽が不安定といわれており, 10 月上旬までは発芽が困難と考えられる。このため, あらかじめ低温に遭遇させることで, これまで発芽させることが困難であった温度帯での安定的な発芽が可能となり, 高温期から播種期間が長期化することにより, 計画的な育苗体系を構築できる可能性が高い。さらに高温域での発芽率の向上は, 育苗効率を高め, 優良種苗の大量増殖に向けた基礎資料になると考えられる。

以上の結果から, ワサビの乾燥種子に対する GA₃ 処理後の発芽適温は 10 °C と推定された。また, 置床前に 5 °C の湿潤条件下で 15 日間低温処理を行うことで, 20 °C における発芽率が 70% 程度と実用レベルに近くなり, 育苗効率を向上させることが可能となることが示唆された。

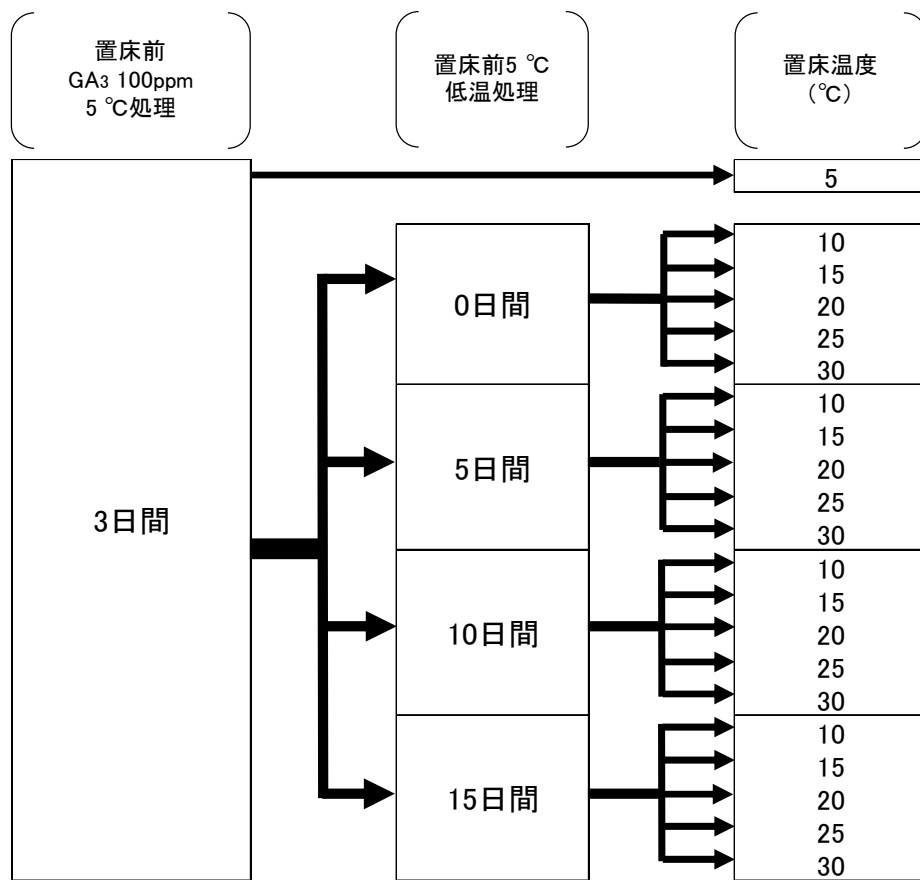


図2-1 試験構成における置床前の種子処理の内容と置床温度



図2-2 ワサビ種子の発芽

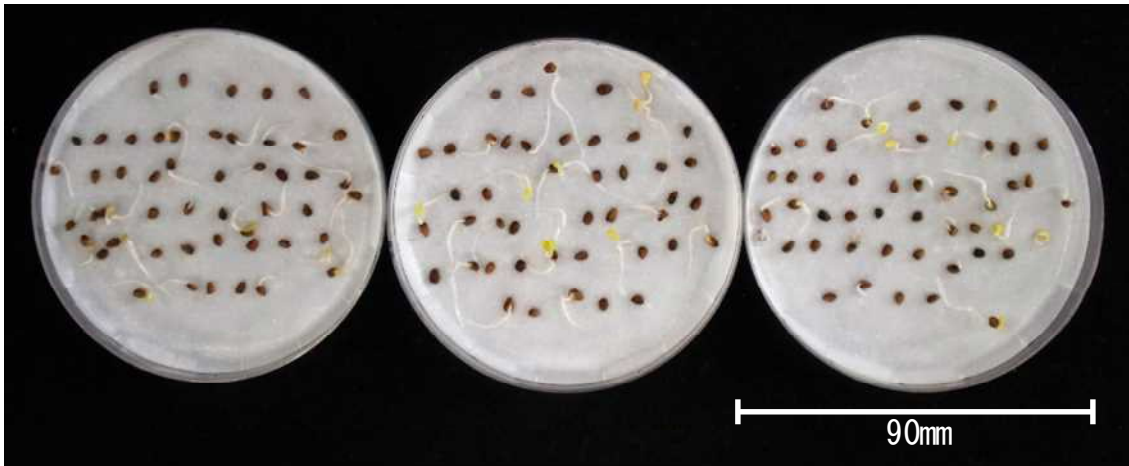


図2-3 GA3処理後にシャーレ置床したワサビ種子の発芽状況

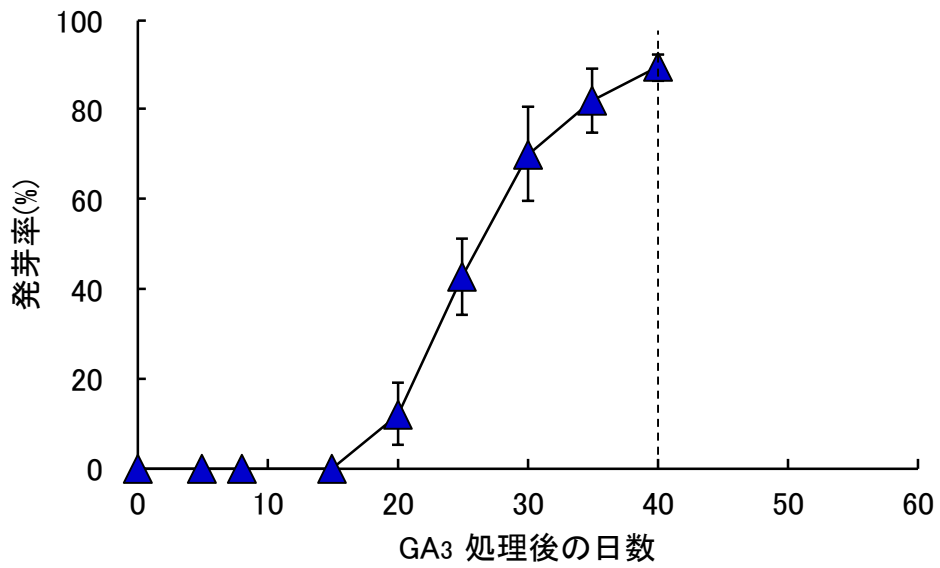


図2-4 GA3処理したワサビ種子の5 °Cにおける発芽率^z

^z エラーバーは3反復での標準偏差を示す

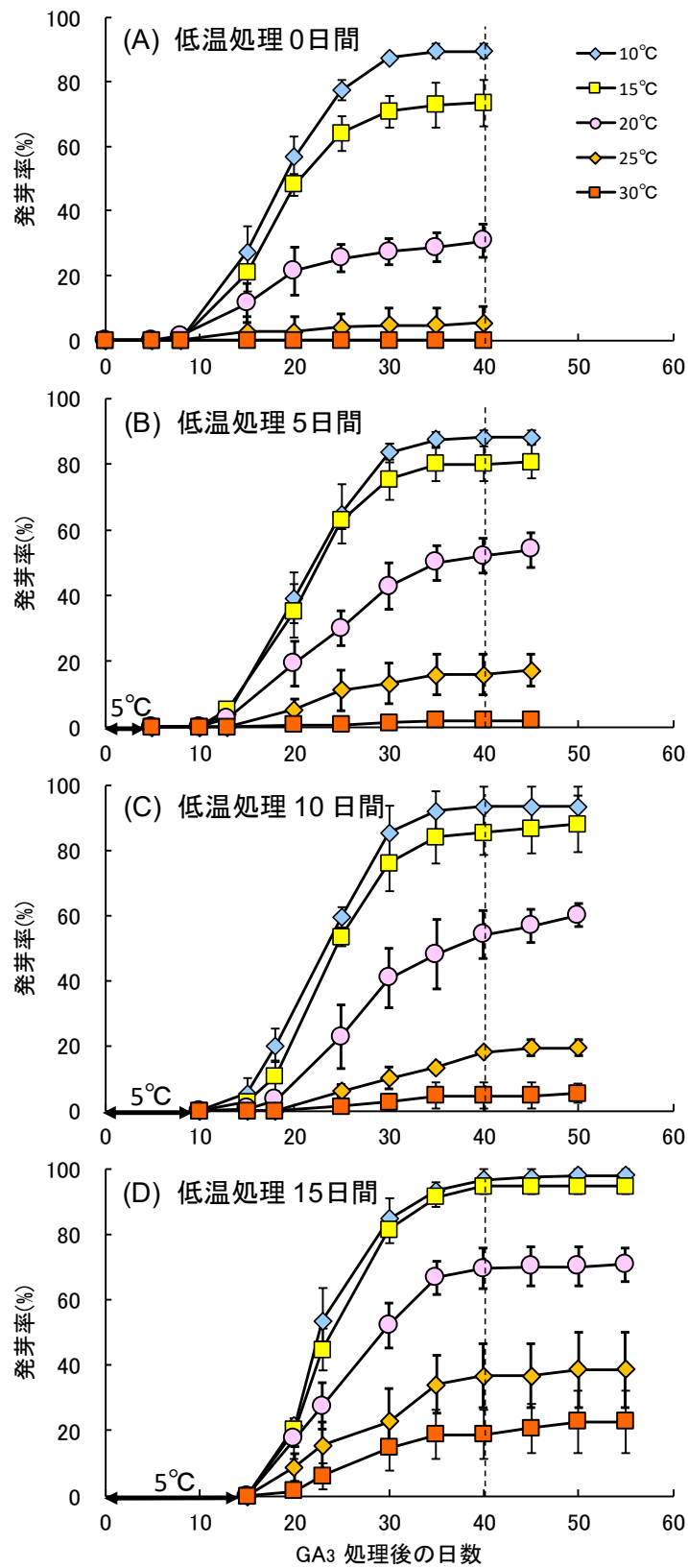


図2-5 GA₃処理後の低温処理期間および置床温度がワサビ種子の発芽率²に及ぼす影響

z エラーバーは3反復での標準偏差を示す

表2-1 置床前の5℃低温処理期間および置床温度がワサビ種子の発芽率に及ぼす影響

| 5℃ 低温処理 (日) | 置床温度 (℃) | 最終発芽率 ^x (%) | G50 (日) | |
|-------------------|------------------|---------------------------|------------|--------|
| 0 | 10 | 89.3 | 20.0 | |
| | 15 | 73.3 | 20.0 | |
| | 20 | 30.7 | 18.3 | |
| | 25 | 5.3 | 25.0 | |
| | 30 | 0 | 40.0 | |
| 5 | 10 | 88.0 | 18.3 | |
| | 15 | 80.7 | 18.3 | |
| | 20 | 54.0 | 21.7 | |
| | 25 | 17.3 | 20.0 | |
| | 30 | 2.0 | 26.7 | |
| 10 | 10 | 93.3 | 15.0 | |
| | 15 | 88.0 | 15.0 | |
| | 20 | 60.0 | 18.3 | |
| | 25 | 19.3 | 23.3 | |
| | 30 | 5.3 | 26.7 | |
| 15 | 10 | 98.0 | 10.3 | |
| | 15 | 94.7 | 12.7 | |
| | 20 | 70.7 | 15.0 | |
| | 25 | 38.7 | 12.7 | |
| | 30 | 22.7 | 16.7 | |
| 要因平均 ^z | 5℃低温処理(日) | 0 | 39.7 c | 24.7 a |
| | | 5 | 48.4 b | 21.0 a |
| | | 10 | 53.2 b | 19.7 a |
| | | 15 | 64.9 a | 13.5 b |
| | | 置床温度(℃) | 10 | 92.2 a |
| | | 15 | 84.2 b | 16.5 b |
| | | 20 | 53.8 c | 18.3 b |
| | | 25 | 20.2 d | 20.3 b |
| | | 30 | 7.5 e | 27.5 a |
| | 有意性 ^y | 5℃低温処理(P) | ** | ** |
| 置床温度(T) | | ** | ** | |
| P×T | | n. s. | n. s. | |

^z Tukeyの多重比較検定により，異符号間では5%水準で有意性あり。

^y 二元配置分散分析により，**は1%水準で有意性あり，n. s. は有意性なし。

^x 下線の太字は実用的な発芽率である75%以上であることを示す。

第3章 置床前の GA₃ 処理期間および低温処理が乾燥種子の発芽に及ぼす影響

前章において、乾燥種子を播種前に GA₃ で3日間処理した後、5℃低温処理を加えたところ、発芽温度10℃、15℃で発芽率が高く、20℃以上の高温域においても発芽率が向上した。実生苗の現地育苗は、10月中旬以降に播種が始まるが、発芽の不安定は秋季の20℃以上の高温の影響も示唆されており、低温10℃から高温20℃での発芽率の向上は、育苗期間全体において温度管理面での発芽揃い向上技術につながり、効率的な増殖を可能にするものと考えられる。しかし、前章では5月中旬に採種して乾燥した種子を、8か月間冷蔵保存後の翌年2月に播種しており、現地育苗が始まる10月播種の発芽率への影響は不明である。また、発芽率の向上は5℃低温処理期間による差が大きく、この理由として乾燥種子への GA₃ 処理は3日間では休眠覚醒への影響が小さかった可能性がある。

そこで、第2章では置床前の5℃低温処理期間について実験を行ったが、本実験では、GA₃ 処理期間について実験を行い、5℃低温処理期間との組み合わせ処理について合わせて検討を行った。

発芽が不安定な10月播種における計画的な育苗体系の構築を目指して、10月播種における乾燥種子の播種前の GA₃ 処理期間と低温処理の組合せ処理が温度別の発芽率に及ぼす影響を検討した。

1 材料および方法

供試材料として種子繁殖性品種‘伊づま’（伊奈ら、2017）の種子を用いた。2017年5月10日に、ガラス温室内で土耕栽培した採種用親株の花茎基部から成熟して自然脱粒の始まった長角果を採取し、5月10日～9月6日にわさび田の流水中に長角果ごと浸漬して莢を腐敗させ、種子だけを取り出した。9月6～13日に種子を15℃で新鮮重に対し32%まで風乾させた後、9月13日から試験開始時までビニール袋とタッパーに密封し、低温恒温器（IN802、ヤマト科学（株））内で、0℃で保存した。試験は2017年10～12月に行った。

処理区は、シャーレ置床前の GA₃ 処理期間を0日（無処理）、1日、3日、5日および10日に設定し、GA₃ 処理後の5℃低温処理期間を前章の結果から0日（無処理）および10日に設定し、置床温度設定10℃、15℃および20℃を組み合わせた30区を設定した（図3-1）。

乾燥種子の GA₃ 処理と5℃低温処理方法、シャーレへの置床方法と試験規模、発芽と発芽勢の定義、発芽調

査方法は第2章と同じである。

2 結果

GA₃ 処理期間、低温処理と最終発芽率との関係を図3-2に示した。最終発芽率は GA₃ の処理期間が長いほど高まり、低温処理によりさらに高まった。

GA₃ 処理期間、置床温度、低温処理の関係について、合計30処理区の発芽率の推移を図3-3に示した。

低温処理無しでの置床温度と発芽率との関係をみると、最終発芽率は、GA₃ 処理0日(A)、1日(B)および3日(C)では、いずれも低く判然としなかった。5日(D)では置床温度15℃、20℃が10℃よりも高いものの、40%程度と低かった。10日(E)では15℃が10℃、20℃よりも高く、80%程度であった。

最終発芽率を低温処理の有無でみると、GA₃ 処理と低温処理の組合せは発芽率が高まる傾向を示した。低温処理有りでの最終発芽率は、GA₃ 処理0日(F)、1日(G)では低温処理無し(A、B)よりも置床温度10℃でわずかに向上した。GA₃ 処理3日(H)と5日(I)では、置床温度10℃、15℃ともに低温処理との組み合わせにより、低温処理無し(C、D)よりも発芽率が高まった。GA₃ 処理10日(J)では置床温度15℃では影響は認められなかったが、10℃、20℃では低温処理との組み合わせにより、低温処理無し(J)よりも発芽率がそれぞれ20、10%程度向上した。

GA₃ 処理期間、低温処理、置床温度の要因解析について、最終発芽率と発芽勢を表3-1に示した。発芽勢は、GA₃ 処理1日、3日、5日、10日が0日より短く、低温処理有りが処理無しより短かった。GA₃ 処理期間、低温処理の有意性は、最終発芽率と発芽勢のいずれも検出された。置床温度の有意性は、最終発芽率でのみ検出された。交互作用をみると、最終発芽率は、置床温度と GA₃ 処理期間または低温処理との組合せで検出されたのに対し、発芽勢は GA₃ 処理期間と低温処理または置床温度との組合せで検出された。

3 考察

本試験は、ワサビの乾燥種子に対し、10月播種における GA₃ 処理と低温処理の組合せをみたものであり、本章における処理の有効性は、前章と同様、発芽率75%以上とした。

まず、GA₃ の処理効果についてみると、低温処理無し

では、5日間処理まではいずれの置床温度においても40%以下であり、10日間処理の15℃置床でのみ実用レベルの78.0%となった(表3-1, 図3-2)。前章では、GA₃3日間処理後の低温処理無しでは70%以上の発芽率であり、本試験の発芽率とは大きく異なっている。前章で供試した種子は、本試験とはほぼ同様の手法で採種し、調製している。本試験と前章の相違点として、本試験が当年採りの種子を供試して10月~12月に実施(種子保存期間1か月)したのに対し、前章は年明けの2月~5月の実施(種子保存期間8か月)であり、種子の乾燥から試験開始までの期間が4か月長く、種子保存期間が7か月長い。一般的に、種子は、採種から一定期間は休眠のため発芽しにくい状態となる。徳増ら(1981a, 1981b)はアブラナ属作物種子の発芽率が、採取後の期間が長くなり、休眠が覚醒するのに伴って上昇することを報告している。このことから、本試験では、種子を採種し乾燥してから試験開始までの期間が前章より短いために、種子の休眠が深かった可能性がある。

ワサビ種子は乾燥により休眠に入り発芽率が低下する(横木・上野, 1983)。中野ら(1990)は、流水中に浸漬した長角果の種子の発芽率が高いことを示し、その種子の含水率は63%であり休眠に入っていないことを考察している。また、中野らは、急激な乾燥をさげ、一定温度のデシケータ内で10℃貯蔵すれば、492日後の種子においても、GA₃5日間処理後15℃条件下での発芽率が高いことを示している。

本研究では、種子の長期保存の観点から、種子を15℃で風乾させた後、試験開始まで0℃で保存している。中野ら(1990)の試験では、急激な乾燥を避けた種子はデシケータ内で10℃で維持され、本試験とは休眠の程度が異なっていたために、結果が異なった可能性がある。

次にGA₃処理後の低温処理の効果についてみると、発芽適温の15℃置床では、GA₃処理を行った区において発芽率は高まった(表3-1, 図3-2)。10℃での発芽率も同様に高まる傾向を示し、20℃ではGA₃10日間処理と低温処理10日間の組合せで、発芽率は最大となった。低温処理無しでの発芽率は、GA₃0, 1および3日間処理ではいずれの置床温度も著しく低かったが、5日間処理、10日間処理では発芽率は向上するものの10℃置床が最も低い。しかし、10℃置床の低温処理有りの発芽率は、低温処理無しに比べ、いずれの処理日数においても高まる傾向を示し、特に、GA₃3, 5日間処理の最終発芽率は発芽適温の15℃置床に近づいている。達山ら(1983)は、5℃の低温処理がワサビ種子の休眠打破に有効であることを報告している。本試験において

も、事前に実施するGA₃処理期間が長いほど、5℃低温処理の休眠覚醒効果がより明確に現れるものと考えられる。また、前章において、3日間のGA₃処理では10℃置床で高い発芽率が得られており、これらのことから、置床温度10℃は、発芽可能な温度であるとともに、種子の休眠覚醒に影響する温度の可能性もある。

GA₃10日間処理と低温処理の組合せにより、発芽適温の15℃最終発芽率が78.0%に対し、10℃63.3%、20℃69.3%と向上し、いずれの温度でも実用レベルに近い発芽率が得られた(表3-1, 図3-2)。徳間ら(1981a; 1985)は、アブラナ属作物の種子の発芽温度域が、休眠覚醒とともに15℃以上の温度域にまで広がり、最適発芽温度が15℃以下から25~35℃になることを報告している。前章において、ワサビ乾燥種子に対する3日間のGA₃処理と15日間の5℃低温処理により、20℃置床ではほぼ実用レベルに近い70%の発芽率が得られている。ワサビ種子の発芽において、GA₃処理および5℃低温処理のいずれも休眠打破のための処理とされる(大井・木村, 1994a; 達山ら, 1983)が、これらの知見から、本試験においてもGA₃処理と5℃低温処理が種子の休眠覚醒に影響を及ぼし、発芽温度域が広がったために、10℃、20℃での発芽率が向上したのと考えられる。本試験では、前章の試験とは播種時期の違いにより種子の休眠状態が異なることが考えられることから、今後、採種から経時的に種子発芽の状況を調査する必要がある。

同じアブラナ科のシロイヌナズナの休眠種子では、吸水してもGAを生成する水酸化酵素遺伝子の発現が抑制されていることが知られている(Millarら, 2006)。本実験のワサビ乾燥種子は深い休眠状態にあると考えられ、吸水しても内生ジベレリンの生合成が抑制されていたため、播種前GA₃処理期間の延長によりワサビ乾燥種子の発芽率が向上した可能性がある。さらに、シロイヌナズナ種子では、低温で吸水させると活性型GAを生成する酵素の遺伝子発現が高まり、活性型GAの内生量が増加する(Yamauchiら, 2004)。乾燥により深い二次休眠状態になったワサビ種子においても、GA₃処理によって休眠覚醒後、低温処理によりGA内生量が増加し、さらに発芽率が向上した可能性がある。

以上の結果から、ワサビの乾燥種子では、播種前のGA₃処理期間を延長することにより発芽が安定し、10日間の低温処理の追加により、これまで発芽が不安定であった温度帯で実用レベルの発芽率が得られ、初秋から晩冬の発芽が安定し、10月播種においても計画的な育苗体系を構築できる可能性が高いと考えられる。

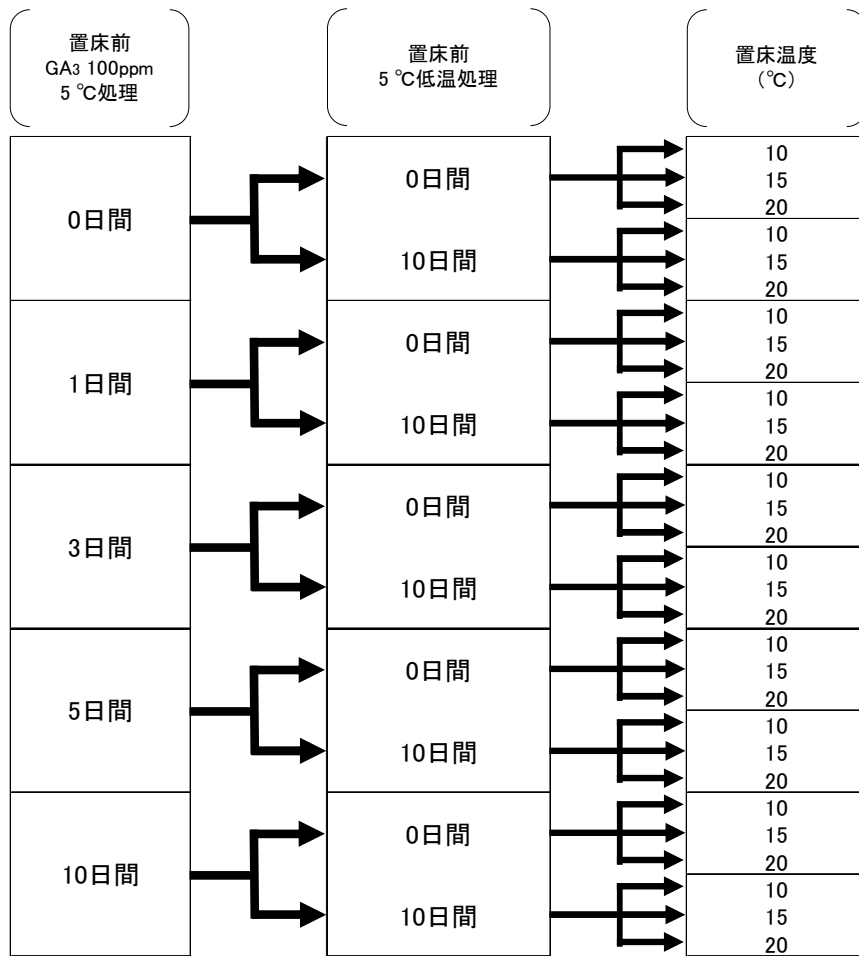


図3-1 試験構成における置床前の種子処理の内容と置床温度

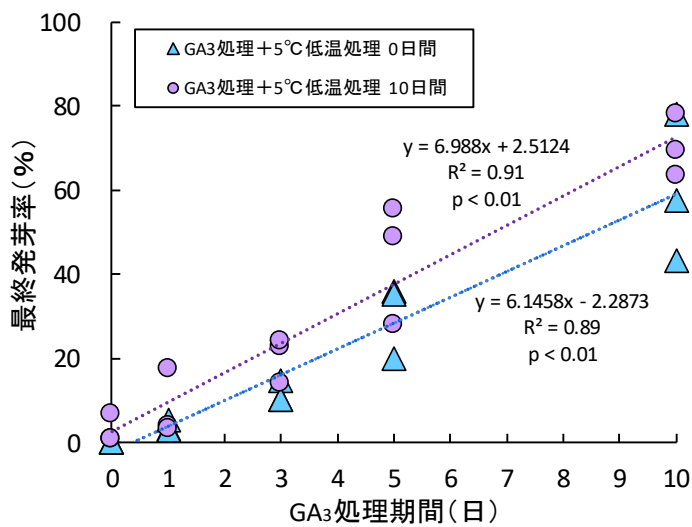


図3-2 GA₃処理および低温処理後のワサビ種子の最終発芽率

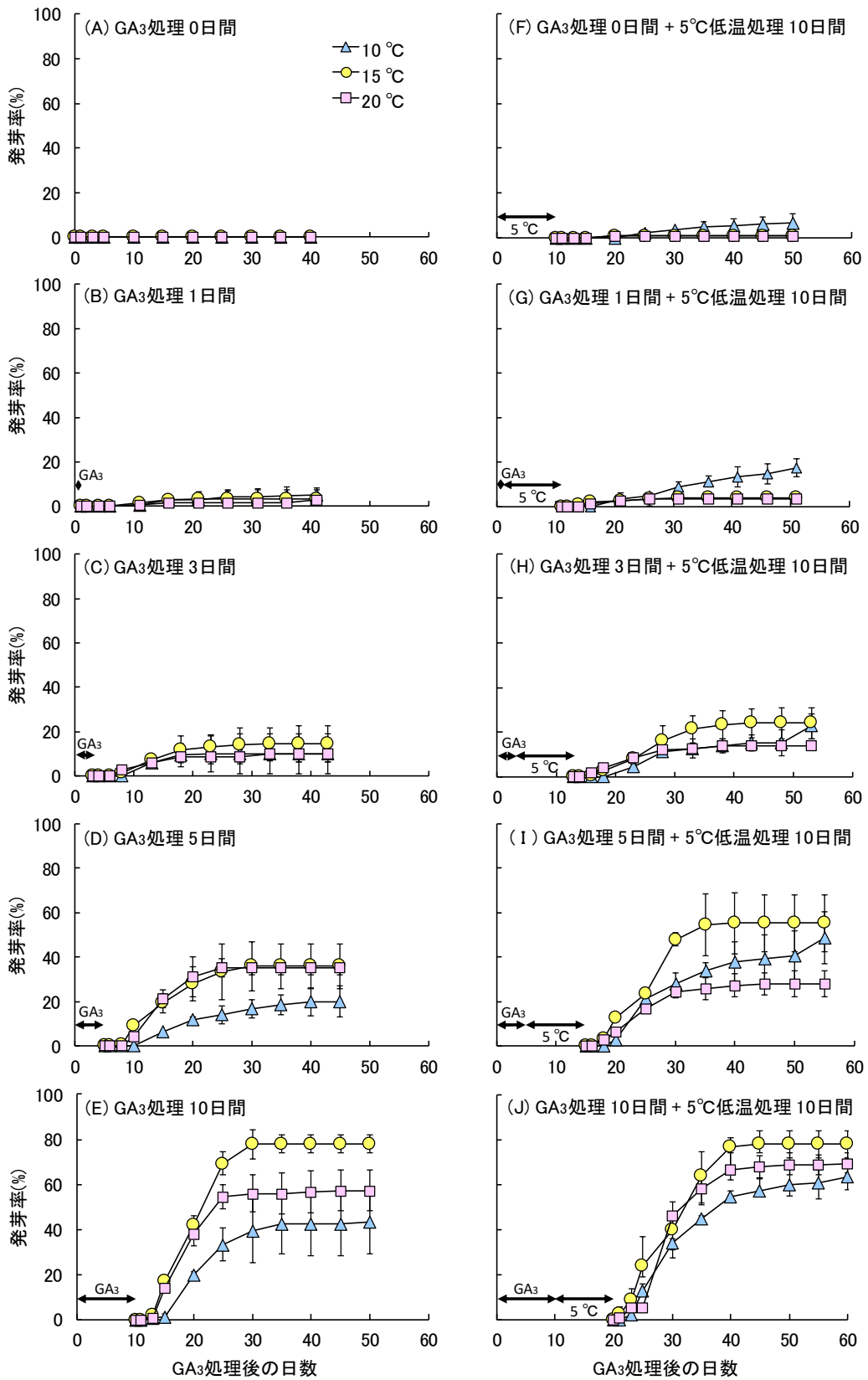


図3-3 GA₃処理および低温処理後のワサビ種子の発芽率²の推移

² エラーバーは3反復での標準偏差を示す

表3-1 置床前のGA₃処理, 5℃低温処理および置床温度がワサビ種子の発芽率に及ぼす影響

| GA ₃ 100ppm 5℃処理 (日) | 5℃ 低温処理 (日) | 置床温度 (℃) | 最終発芽率 ^y (%) | G50 (日) |
|---------------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------|------------|
| 0 | 0 | 10 | 0 | 40.0 |
| | | 15 | 0 | 40.0 |
| | | 20 | 0 | 40.0 |
| | 10 | 10 | 6.7 | 20.0 |
| | | 15 | 0.7 | 30.0 |
| | | 20 | 0.7 | 30.0 |
| 1 | 0 | 10 | 5.3 | 21.7 |
| | | 15 | 3.3 | 12.5 |
| | | 20 | 2.7 | 12.5 |
| | 10 | 10 | 17.3 | 23.3 |
| | | 15 | 4.0 | 10.0 |
| | | 20 | 3.3 | 6.7 |
| 3 | 0 | 10 | 10.0 | 10.0 |
| | | 15 | 14.7 | 11.7 |
| | | 20 | 10.0 | 8.3 |
| | 10 | 10 | 22.7 | 16.7 |
| | | 15 | 24.0 | 13.3 |
| | | 20 | 14.0 | 8.3 |
| 5 | 0 | 10 | 20.0 | 13.3 |
| | | 15 | 36.0 | 11.7 |
| | | 20 | 35.3 | 11.7 |
| | 10 | 10 | 48.7 | 13.3 |
| | | 15 | 55.3 | 15.0 |
| | | 20 | 28.0 | 10.0 |
| 10 | 0 | 10 | 43.3 | 13.3 |
| | | 15 | 78.0 | 11.7 |
| | | 20 | 57.3 | 10.0 |
| | 10 | 10 | 63.3 | 10.0 |
| | | 15 | 78.0 | 11.7 |
| | | 20 | 69.3 | 10.0 |
| 要因平均 | GA ₃ 100ppm 5℃処理(日) | 0 | 1.3 | 33.3 |
| | | 1 | 6.0 | 14.4 |
| | | 3 | 15.9 | 11.4 |
| | | 5 | 37.2 | 12.5 |
| | | 10 | 64.9 | 11.1 |
| | 5℃低温処理(日) | 0 | 21.1 | 17.9 |
| | | 10 | 29.1 | 15.2 |
| | 置床温度(℃) | 10 | 23.7 | 18.2 |
| | | 15 | 29.4 | 16.8 |
| | | 20 | 22.1 | 14.8 |
| 有意性 ^z | GA ₃ 100ppm 5℃処理(G) | | ** | ** |
| | 5℃低温処理(P) | | ** | * |
| | 置床温度(T) | | ** | n. s. |
| | G×P | | n. s. | ** |
| | G×T | | ** | * |
| | P×T | | ** | n. s. |
| | G×P×T | | * | n. s. |

^z 三元配置分散分析により, *は5%水準, **は1%水準で有意性あり, n. s.は有意性なし.

^y 下線の太字は実用的な発芽率である75%以上であることを示す.

第4章 セルトレーのサイズと育苗期間が実生苗の形質と定植後の生育に及ぼす影響

水ワサビ向けの慣行育苗におけるセルトレーのサイズ（セルサイズ）は72穴、育苗期間は約4か月（稲葉ら、2018）と、主要なアブラナ科作物であるキャベツ（25日前後（小寺1996））やハクサイ（20～25日間（山本・月時、1996））のセルサイズより大きめであり、育苗期間は長期間である。慣行よりもセルサイズを小さくし、育苗期間を短縮できれば、育苗効率の向上により定植苗を充足できる可能性が高まる。しかし、水ワサビ用実生苗は育苗適温が13～15℃と示されているものの（足立、1987）、育苗容器、育苗期間、苗形質が定植後の生育に及ぼす影響についての報告は無い。

一方、畑ワサビ栽培では、水ワサビ用実生苗の育苗で余剰となった種子を流用して育苗される（久松、私信）。田中・古江（2005）は、畑ワサビ用実生苗では経済性からセルサイズ128穴で播種後70日間の育苗が適すと報告しているが、セルサイズと育苗期間が定植後の生育に及ぼす影響は検証していない。

そこで本実験では、静岡県における水ワサビ育苗体系を効率化し、実生苗の安定供給技術を開発するため、セル成型育苗におけるセルサイズと育苗期間を検討するとともに定植後の生育特性を確認した。

1 材料および方法

供試品種として種子繁殖性品種‘伊づま’（伊奈ら、2017）を用いた。2015年5月中旬に、ガラス温室内で土耕栽培した採種用親株の花茎基部から成熟して自然脱粒の始まった長角果を採取し、5月中旬～7月中旬にわさび田の流水中に長角果ごと浸漬して莢を腐敗させ、種子だけを取り出した。取り出した種子を15℃で新鮮重に対し約30%まで風乾させた後、7月中旬から試験開始時までビニール袋とタッパーに密封し、低温恒温器（IN802、ヤマト科学（株））内で、0℃で保存した。試験は2016年1～8月に行った。

処理区は、育苗時のセルサイズを72穴（セル容量30ml）、128穴（同23ml）および200穴（同15ml）に設定し、育苗期間2か月間、3か月間および4か月間を組み合わせた9処理区を設定した。

種子を、GA₃を100ppm含む水溶液（0.00029M）に浸漬し、5℃の暗条件下で3～4日間静置した後、水洗した。シャーレ（直径90mm×高さ15mm、ポリスチレン製、アズワン（株））にろ紙（直径90mm、定性濾紙No.2、ADVANTEC）を敷き、純水10mlで湿らせた後、

種子が重ならないように広げ、15℃の暗条件下で1～2日間静置し、発根させた。

発根した種子を、培養土を充填した育苗箱に播種し、15℃12時間蛍光灯照明に設定した育苗室内で発芽させた。本葉第1葉の抽出が始まった苗を、培養土を充填したセルトレーに移植し、フェンロー温室（伊豆市湯ヶ島、標高340m）内で育苗を開始した。セルトレーは縦5穴×横5穴の大きさに切り出して使用し、育苗本数は1処理区25本3反復とした。育苗箱およびセルトレーには市販培養土（タキイたねまき培土、タキイ種苗（株））を使用し、移植50日後に市販化成肥料（IB化成S1号、ジェイカムアグリ（株））を1穴当たり1粒（約1g相当）追肥した。

播種日、セルトレー移植日は、育苗期間4か月区では、それぞれ2016年1月1日、1月20日、3か月区では2月1日、2月18日、2か月区では2月26日、3月14日とし、5月21日に全処理区の育苗を終了した。

育苗終了時点で枯死苗数を調査後、苗の形質について草丈、葉柄長、葉身長、葉柄径、展開葉数、クラウン径、生体重（全重、地上部重、根重）、T-R率、根鉢形成指数を調査した。葉柄長と葉身長は最大葉を測定した。根鉢形成指数は、竹川ら（2004）に従い培養土の全側面中で、外見上白色の根が覆って見える部分の面積割合を20%未満、20%、40%、60%、80%以上に区分し、それぞれ1-5と判定した（図4-1）。調査本数は、各処理区5本3反復とし、セルトレーの外周のセルを除外してサンプリングした。

2016年5月21日に、わさび田（伊豆市吉奈、標高340m）に、株間20cm×条間25cmの間隔で、全処理区の苗を同時に定植した。定植苗数は、1処理区5本3反復とした。栽培方法は、静岡県内最大の生産地である伊豆地域の畝石式わさび田に広く普及するパイプ栽培とし、水ワサビ栽培用パイプ（塩化ビニル製、上端内径86mm×下端内径77mm×高さ75mm）を田面に垂直に埋め込み、内側に苗を定植した。

2016年8月21日（定植92日後）、12月6日（同199日後）に欠株数、草丈および展開葉数を、2017年5月31日（定植375日後）に収穫し、草丈、展開葉数、株全重、根茎重、根茎長、根茎径を調査した。

2 結果

育苗期間中のフェンロー温室内の気温推移を図4-2に

示した。育苗期間別の日最高気温、日平均気温、日最低気温はそれぞれ、育苗期間2か月では $20.9 \pm 4.4^\circ\text{C}$ 、 $14.7 \pm 3.5^\circ\text{C}$ 、 $9.7 \pm 3.6^\circ\text{C}$ 、育苗期間3か月では $20.7 \pm 4.9^\circ\text{C}$ 、 $13.4 \pm 3.9^\circ\text{C}$ 、 $8.1 \pm 4.3^\circ\text{C}$ 、育苗期間4か月では $20.6 \pm 5.5^\circ\text{C}$ 、 $12.0 \pm 4.3^\circ\text{C}$ 、 $6.7 \pm 4.7^\circ\text{C}$ であった。育苗気温が 13°C 未満、 $13 \sim 15^\circ\text{C}$ 、 15°C 超過の時間割合はそれぞれ、育苗期間2か月では37.1%、44.2%、18.7%、育苗期間3か月では46.0%、37.6%、16.4%、育苗期間4か月では53.1%、32.3%、14.6%であり、育苗期間3か月と4か月では、育苗適温未満の時間割合が大きかった。

育苗終了時の苗形質と枯死苗率を表4-1に示した。セルサイズについてみると、草丈、葉柄長、葉身長、展開葉数、クラウン径、苗全重、地上部重および根重は72穴が最も大きかった。72穴と128穴を比較すると、生体重は72穴が128穴よりも重くなったが、展開葉数、クラウン径は差が無かった。生体重は72穴が最も大きく、200穴が最も小さかった。TR率は200穴が最も高く、72穴が最も低かった(表4-1)。

育苗期間についてみると、全ての調査項目で育苗期間が長いほど大きくなるまたは高まる傾向を示した、このうち葉身長と展開葉数では育苗期間3か月と4か月で差がみられなかった。枯死苗率にはセルサイズと育苗期間の影響はみられなかった。

育苗終了時の苗の画像から、育苗期間3か月でセルの側面まで根が伸長する様子が確認された(図4-3)。根鉢形成指数は、育苗期間3か月で平均4.5とセルサイズによる差は見られなかった(表4-2)。

定植後の欠株率を表4-3に示した。セルサイズと育苗期間のいずれについても、定植92日後と定植199日後の欠株率に処理間で差はみられなかった。観察によると、欠株はいずれも、スジグロシロチョウ幼虫の食害によるものであった。

定植後の生育を表4-4に示した。草丈は定植92日後以降に処理間で差はみられなかった。展開葉数は定植92日後の調査でのみ200穴で少なく、育苗期間が短いほど少なかった。栽培終了時(定植後375日)の株全重、根茎重、根茎長、根茎径はいずれも有意差がなかった。

3 考察

育苗終了時における実生苗の生育量は、セルサイズが大きく、育苗期間が長いと増加する傾向がみられ、TR率はセルサイズが小さく、育苗期間が長いと高くなった(表4-1)。根鉢の形成にセルサイズの影響は無く、育苗期間が長いと形成指数が大きくなった(図4-3、表4-2)。

Satoら(2001)は、キャベツ苗において、植物体の

乾物重は根域容量が9 mlから300 mlへと拡大するにつれ増加したことを報告している。また、小田ら(2002)は、レタスではセル容量の減少による生育抑制が莖葉よりも根で大きいことを報告し、NishizawaとSaito(1998)は、トマトでは根域制限によりTR率が高くなることを報告している。

これらのことから、水ワサビの育苗時に72、128および200穴のセルサイズを使用した場合、これまでのセルサイズに関する報告と同様に小さいセルサイズで根域制限の影響が現れることが示唆された。

しかし、本試験では、セルサイズ128穴と慣行の72穴の生育差は小さく、育苗期間3か月は慣行の4か月よりも草丈、葉柄長、葉柄径、クラウン径、生体重が小さいが、それ以外は差がなかったことから、慣行育苗よりもセルサイズを縮小し、育苗期間を短縮できる可能性が示唆された。

田中・古江(2005)は畑ワサビの実生育苗を秋季に行う場合、セルサイズ(72穴、128穴)と育苗期間(播種後50日、70日および90日)を検討し、72穴と128穴の生育の差異は小さいこと、根鉢の形成はセルサイズによる差がなく、どちらも播種70日後で十分に形成されることを報告している。これに対し、本試験では根鉢の形成まで3か月と長期間を要した。これは、静岡県で春季定植用の水ワサビ実生苗が最も大量に育苗される冬季(稲葉ら, 2018)から春季に実施したために、気温が育苗適温の $13 \sim 15^\circ\text{C}$ (足立, 1987)よりも低い時間が長かった影響で田中らより生育が緩慢だったものと考えられる。

わさび田定植後の欠株率は、定植92日後および199日後で処理区間に差がなく、育苗時のセルサイズと育苗期間の影響がみられなかった(表4-3)。藤原ら(1998)は、キャベツセル成型苗の定植後の発根力は、若い葉齢の苗で小さかったことを報告している。一方で、福岡ら(2001)は、キャベツのセル成型苗は苗齢が進むと根の活力が低下し、定植後に発根が抑えられると考察しており、佐藤ら(1997)はセル成型苗では培養土が少量のために根鉢を形成しやすく、定植後の活着遅延を引き起こすと指摘している。しかし、本試験では定植後の欠株率に有意差はないことから、水ワサビの実生苗は、活着における適切な根鉢形成指数はなく、生体重1g、葉数3枚程度の苗齢から、わさび田での活着は可能と考えられる。

定植後の生育をみると、セルサイズ200穴または育苗期間が短いほど、定植92日後の展開葉数が少なかったが、199日後ではセルサイズおよび育苗期間の影響は認

められなかった(表4-4)。収穫時(定植375日後)の生育は、株全重、根茎重、根茎長、根茎径のいずれも育苗時のセルサイズおよび育苗期間の影響は認められなかった(表4-4)。

ワサビの根茎は地上部にあり、形態は節間の短縮した短縮茎である(田淵, 2009)。新葉の抽出と旧葉の脱落を繰り返しながら上方に伸長する。このため、根茎生産を主目的とする水ワサビでは葉数の影響が大きい。水ワサビの定植後の在圃期間は最短でも1年間を要し、全出葉数は50枚以上になる(足立, 1987)。しかし、定植時の葉数は3~5枚であり、全出葉数に対する割合が1割以下と非常に低いことから、苗の大きさが収穫時の根茎生育に及ぼす影響は小さいと考えられる。

以上の結果から、水ワサビ実生苗の生産では、慣行のセルサイズ72穴、育苗期間4か月で育苗した大きな実

生苗は必要なく、セルサイズを200穴まで縮小、育苗期間を2か月に短縮できる可能性がある。

小さな苗は大きな苗よりも病虫害の影響を受けやすく、本試験でもスジグロシロチョウ幼虫の食害による欠株は、慣行よりも小さいセルサイズ、短い育苗期間で発生した。このため、定植後の病虫害防除は慣行よりも徹底して行う必要がある。また、短い育苗期間では根鉢の形成が不十分であり、セルトレーから実生苗を抜き取る際に培土が崩れやすく、定植時に根傷みを生じやすいため、定植作業を慎重に行う必要がある。

本試験の結果を静岡県内で増加している施設園芸での水ワサビ育苗に当てはめると、施設の有効活用と育苗の効率化につながり、今後の水ワサビ実生苗の大量増殖体系の構築につながる基礎的知見になると考えられる。

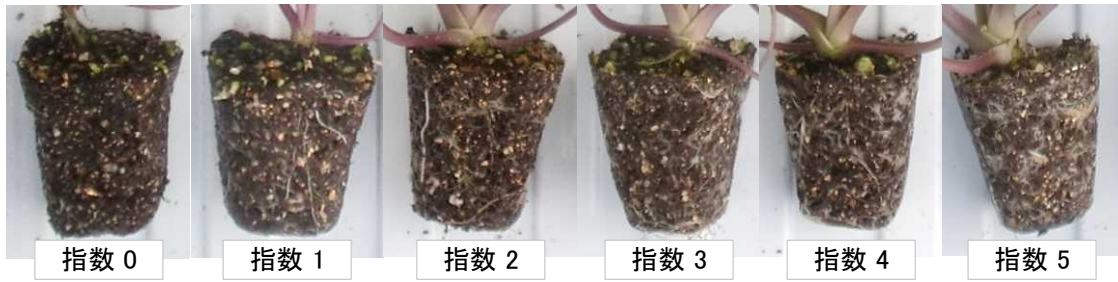


図4-1 ワサビ実生苗の根鉢形成指数

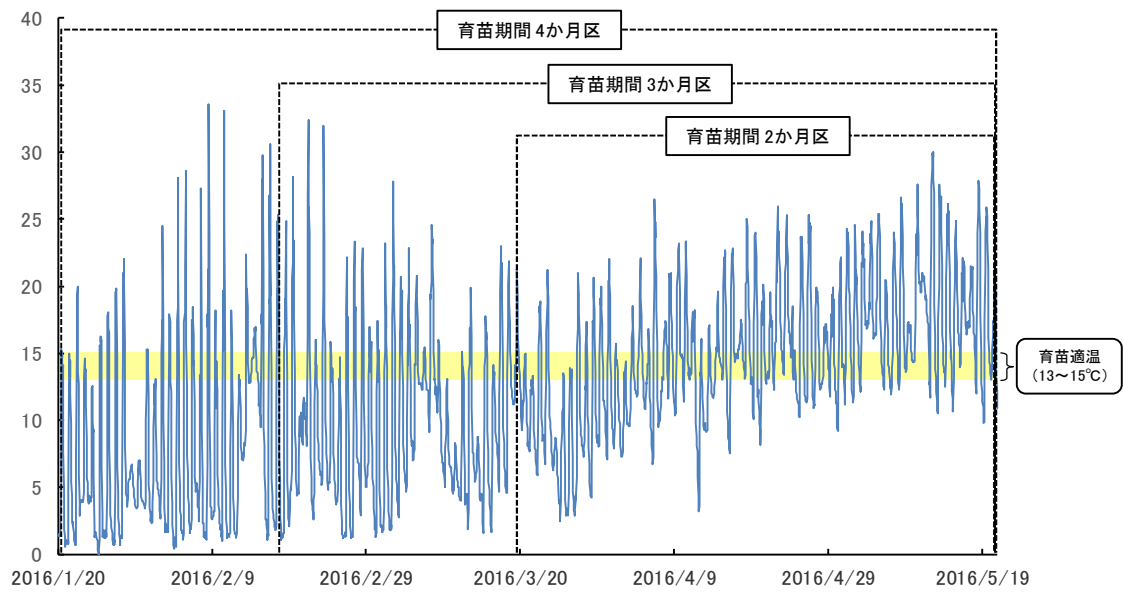


図4-2 フェンロー温室におけるワサビ実生苗の育苗気温の推移



図4-3 異なるセルトレーサイズと育苗期間で育苗したワサビ実生苗

表4-1 育苗時のセルサイズおよび育苗期間が育苗終了時のワサビ実生苗の形質および枯死苗率に及ぼす影響

| セルサイズ | 育苗期間 | 草丈 (cm) | 葉柄長 (cm) | 葉身長 (cm) | 葉柄径 (mm) | 展開葉数 (枚) | クラウン径 (mm) | 全重 | | | 生体重 | | | 枯死苗率 (%) |
|-------------------|----------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|------|-------------|
| | | | | | | | | (g) | (g) | (g) | 地上部重 (g) | 根重 (g) | T-R率 | |
| 72穴 (30 ml/穴) | 2か月 | 10.0 | 6.9 | 3.1 | 1.6 | 3.5 | 3.1 | 1.6 | 1.1 | 0.6 | 2.1 | 2.7 | | |
| | 3か月 | 17.2 | 12.6 | 4.6 | 2.6 | 5.0 | 4.9 | 5.4 | 4.4 | 1.1 | 4.4 | 2.7 | | |
| | 4か月 | 21.1 | 15.8 | 5.3 | 3.1 | 4.9 | 5.5 | 8.9 | 7.4 | 1.5 | 5.7 | 0 | | |
| | 2か月 | 9.7 | 6.7 | 3.0 | 1.6 | 3.5 | 3.0 | 1.3 | 0.9 | 0.4 | 2.4 | 2.7 | | |
| 128穴 (23 ml/穴) | 3か月 | 15.6 | 11.3 | 4.3 | 2.3 | 4.9 | 4.6 | 3.9 | 3.2 | 0.7 | 4.7 | 0 | | |
| | 4か月 | 17.8 | 13.3 | 4.5 | 2.7 | 5.1 | 5.7 | 6.1 | 5.2 | 0.9 | 6.1 | 4.0 | | |
| 200穴 (15 ml/穴) | 2か月 | 8.6 | 5.7 | 2.9 | 1.4 | 3.0 | 2.6 | 0.9 | 0.7 | 0.2 | 2.9 | 1.3 | | |
| | 3か月 | 15.7 | 11.9 | 3.8 | 2.2 | 4.5 | 4.2 | 3.3 | 2.8 | 0.5 | 5.9 | 1.3 | | |
| | 4か月 | 16.7 | 12.4 | 4.3 | 2.5 | 4.7 | 4.6 | 4.6 | 4.0 | 0.6 | 6.3 | 9.3 | | |
| | | 16.1 ^y | 11.8 ^y | 4.3 ^y | 2.4 ^y | 4.5 ^y | 4.5 ^y | 5.3 ^y | 4.3 ^y | 1.0 ^y | 4.1 ^b | 1.8 | | |
| セルサイズ | 72穴 | 14.4 ab | 10.4 ab | 3.9 ab | 2.2 b | 4.5 a | 4.5 a | 3.8 b | 3.1 b | 0.7 b | 4.4 ab | 2.2 | | |
| | 128穴 | 13.7 b | 10.0 b | 3.7 b | 2.0 b | 4.0 b | 3.8 b | 2.9 b | 2.5 b | 0.5 b | 5.0 a | 4.0 | | |
| 要因平均 | 200穴 | 9.4 c | 6.5 c | 3.0 b | 1.5 c | 3.3 b | 2.9 c | 1.3 c | 0.9 c | 0.4 c | 2.4 c | 2.2 | | |
| | 2か月 | 16.1 b | 11.9 b | 4.2 a | 2.3 b | 4.8 a | 4.6 b | 4.2 b | 3.5 b | 0.7 b | 5.0 b | 1.3 | | |
| | 3か月 | 18.5 a | 13.8 a | 4.7 a | 2.8 a | 4.9 a | 5.2 a | 6.5 a | 5.5 a | 1.0 a | 6.0 a | 4.4 | | |
| | 4か月 | ** | ** | * | ** | * | ** | ** | ** | ** | * | n. s. | | |
| 有意性 ^z | セルサイズ(S) | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | n. s. | | |
| | 育苗期間(M) | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | n. s. | | |
| 交互作用(S×M) | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | | |

^z 分散分析により*は5%水準,**は1%水準で有意差あり,n. s.は有意差なし

^y Tukeyの多重比較検定により、数字右側のアルファベットは5%水準で異符号間に有意差あり

表4-2 育苗時のセルサイズおよび育苗期間がワサビ実生苗の根鉢形成に及ぼす影響

| セルサイズ | 育苗期間 | 根鉢形成指数 | |
|-------------------|-----------|--------|--------------------|
| 72穴 (30 ml/穴) | 2か月 | 1.5 | |
| | 3か月 | 4.9 | |
| | 4か月 | 4.5 | |
| 128穴 (23 ml/穴) | 2か月 | 1.3 | |
| | 3か月 | 4.5 | |
| | 4か月 | 4.1 | |
| 200穴 (15 ml/穴) | 2か月 | 1.1 | |
| | 3か月 | 4.3 | |
| | 4か月 | 4.7 | |
| 要因平均 | セルサイズ | 72穴 | 3.6 |
| | | 128穴 | 3.3 |
| | | 200穴 | 3.4 |
| | 育苗期間 | 2か月 | 1.3 b ^y |
| 3か月 | | 4.5 a | |
| | 4か月 | 4.4 a | |
| 有意性 ^z | セルサイズ(S) | n. s. | |
| | 育苗期間(M) | ** | |
| | 交互作用(S×M) | n. s. | |

^z 分散分析により**は1%水準で有意差あり, n. s. は有意差なし

^y Tukeyの多重比較検定により、数字右側のアルファベットは5%水準で異符号間に有意差あり

表4-3 育苗時のセルサイズおよび育苗期間がわさび田定植後の欠株率に及ぼす影響

| セルサイズ | 育苗期間 | 定植後の欠株率(%) | |
|-------------------|-----------|------------|-------|
| | | 92日後 | 199日後 |
| 72穴 (30 ml/穴) | 2か月 | 0 | 0 |
| | 3か月 | 0 | 0 |
| | 4か月 | 0 | 0 |
| 128穴 (23 ml/穴) | 2か月 | 0 | 0 |
| | 3か月 | 0 | 6.7 |
| | 4か月 | 0 | 0 |
| 200穴 (15 ml/穴) | 2か月 | 6.7 | 6.7 |
| | 3か月 | 0 | 0 |
| | 4か月 | 0 | 0 |
| 要因平均 | セルサイズ | 72穴 | 0 |
| | | 128穴 | 0 |
| | | 200穴 | 2.2 |
| | 育苗期間 | 2か月 | 2.2 |
| 3か月 | | 0 | |
| | 4か月 | 0 | |
| 有意性 ^z | セルサイズ(S) | n. s. | |
| | 育苗期間(M) | n. s. | |
| | 交互作用(S×M) | n. s. | |

^z 分散分析によりn. s. は有意差なし

表4-4 育苗時のセルサイズおよび育苗期間がわさび田定植後の生育に及ぼす影響

| セルサイズ | 育苗期間 | 草丈 (cm) | | | 展開葉数 (枚) | | | 株全重 (g) | | | 根長 (cm) | | | 根直径 (mm) | | |
|-------------------|------------|---------|-------|-------|-------------------------------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|----------|-------|--|
| | | 92日後 | 199日後 | 375日後 | 92日後 | 199日後 | 375日後 | 375日後 | 375日後 | 375日後 | 375日後 | 375日後 | 375日後 | 375日後 | 375日後 | |
| 72穴 (30 ml/穴) | 2か月 | 21.9 | 30.7 | 46.4 | 6.2 | 13.7 | 20.6 | 300.3 | 57.1 | 10.0 | 27.6 | | | | | |
| | 3か月 | 21.7 | 31.0 | 47.8 | 6.3 | 16.9 | 21.6 | 321.6 | 58.8 | 10.2 | 28.0 | | | | | |
| | 4か月 | 23.6 | 34.0 | 48.8 | 7.9 | 16.8 | 22.4 | 374.2 | 63.7 | 11.0 | 28.2 | | | | | |
| 128穴 (23 ml/穴) | 2か月 | 19.9 | 30.6 | 45.9 | 4.8 | 12.6 | 19.2 | 282.0 | 56.7 | 9.8 | 27.4 | | | | | |
| | 3か月 | 22.1 | 30.0 | 49.6 | 7.1 | 16.6 | 29.1 | 434.2 | 63.1 | 10.3 | 27.9 | | | | | |
| 200穴 (15 ml/穴) | 4か月 | 24.2 | 32.2 | 48.8 | 8.0 | 16.1 | 16.9 | 279.6 | 60.2 | 10.4 | 27.3 | | | | | |
| | 2か月 | 21.8 | 31.9 | 43.6 | 4.8 | 12.1 | 17.4 | 300.6 | 60.8 | 10.0 | 28.1 | | | | | |
| | 3か月 | 19.3 | 29.5 | 48.3 | 5.4 | 14.4 | 18.4 | 311.1 | 56.4 | 9.7 | 26.3 | | | | | |
| | 4か月 | 20.6 | 31.7 | 49.6 | 6.0 | 15.1 | 19.0 | 314.3 | 61.5 | 10.3 | 27.9 | | | | | |
| 要因平均 | 72穴 | 22.4 | 31.9 | 47.7 | 6.8 ^a _y | 15.8 | 21.5 | 332.0 | 59.9 | 10.4 | 27.9 | | | | | |
| | 128穴 | 22.1 | 30.9 | 48.1 | 6.6 ^a | 15.1 | 21.7 | 331.9 | 60.0 | 10.2 | 27.5 | | | | | |
| | 200穴 | 20.6 | 31.0 | 47.2 | 5.4 ^b | 13.9 | 18.3 | 308.7 | 59.6 | 10.0 | 27.4 | | | | | |
| 育苗期間 | 2か月 | 21.2 | 31.1 | 45.3 | 5.3 ^c | 12.8 | 19.1 | 294.3 | 58.3 | 10.0 | 27.7 | | | | | |
| | 3か月 | 21.1 | 30.2 | 48.6 | 6.3 ^b | 16.0 | 23.0 | 355.6 | 59.4 | 10.1 | 27.4 | | | | | |
| | 4か月 | 22.8 | 32.6 | 49.1 | 7.3 ^a | 16.0 | 19.4 | 322.7 | 61.8 | 10.6 | 27.8 | | | | | |
| 有意性 ^z | セルサイズ (S) | n. s. | n. s. | n. s. | ** | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | | | | | | |
| | 育苗期間 (M) | n. s. | n. s. | n. s. | ** | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | | | | | | |
| | 交互作用 (S×M) | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | n. s. | | | | | | |

^z 分散分析により**は1%水準で有意差あり, n. s. は有意差なし

^y Tukeyの多重比較検定により、数字右側のアルファベットは5%水準で異符号間に有意差あり

第5章 着色遮光素材の透過光が根茎の生育と ITC 含有量に及ぼす影響

ワサビの生育に適した水温は8~18°C（最適温12~13°C）であり、18°C以上になると軟腐病の発生が増加する（足立，1987）。気温は年平均13~15°C程度の地域が良く、最高気温が28~30°Cを超えると日焼けを生じるほか、軟腐病が激発する。夏の強い直射日光は、わさび田の気温と水温を上昇させ、軟腐病の原因となるため、遮光を行う（足立，1987）。自然林による遮光が望めない場所では人工的に遮光する必要があり、わさび田では古くからヤマハンノキ（*Alnus hirsuta*）が植えられてきた。ヤマハンノキは落葉広葉樹であり、日差しの強い5~10月頃に葉を茂らせてわさび田を遮光する。しかし、落ち葉を拾う作業が必要であり、管理の手間がかかるとの理由から、現在は遮光ネットが普及している（青木，2009）。

農業分野における遮光ネットの役割として、日射の低減による作物の昇温抑制以外に、気象災害からの作物の保護や昆虫の物理的侵入防止があげられる（Castellanoら，2008）。最近では、機能性素材を用いることで、近赤外線の透過抑制、可視光の分光分布の制御、波長分布による忌避作用を利用した昆虫の侵入防止、などの作用が付加されているものがある（Murakamiら，2017；Rouphaelら，2018）。

生産者によるわさび田の遮光は、ワサビの茎葉が萎凋しないよう強光を回避することを目的としてきたことから、遮光率の高い遮光資材が使用される傾向がある。また、遮光ネットの破損や劣化による張り直しの際に、農協の購買や量販店で大量に安価で入手可能な遮光ネットを購入することが多く、透過日射量や光質がワサビの生育や品質に及ぼす影響については検討されてこなかった。

そこで本実験では、わさび田で一般的に展張される黒色ネットのほか、黒色と同じ無彩色で対照的に透過光量の大きい白色ネット、光合成に有効な赤色光（R）、青色光（B）のそれぞれが透過光に占める割合が大きく、植物の光形態形成に影響を及ぼす青色光/赤色光比（B/R比）や赤色光/遠赤色光比（R/FR比）が異なると考えられる赤色、青色の着色遮光ネットの4色のネットを用いて比較栽培試験を行い、ワサビ根茎の生育に及ぼす透過日射量と光質の影響を検討した。また、ワサビの商品性に重要な辛味・香りの成分である ITC 類の含有量については、同じアブラナ科のクレソンでは前駆物質のグルコナスターチアンが赤色光で増加し（Engelen-Eiglesら，

2006）、カラシナでは前駆物質の GSL 含量と ITC 生成量が遮光により低下する（澤井・玉城，2020）報告があり、ワサビにおいても含有量が増減する可能性があることから、合わせて検討を行った。

1 材料および方法

(1) 栽培試験

1) 栽培方法

試験は、静岡県農林技術研究所伊豆農業研究センターわさび科の棚場研究圃場（静岡県伊豆市吉奈，標高340m）のわさび田（縦10m×横10m）で実施した。ワサビ品種は種子繁殖性品種「伊づま」を供試した。2015年4月15日にわさび田にワサビ栽培用パイプ（塩化ビニル製、内径85mm×高さ75mm）を埋設し、72穴セルトレーで3か月間育苗した実生苗（本葉5~6枚）をパイプ内に定植した。定植間隔は株間20cm×条間25cmで2条植えとした。遮光資材は、(株)イノベックス製の白色ネット（クールホワイト620SW）、黒色ネット（ダイオラッセル1500）、赤色ネット（ダイオネオシェード涼紅）、および青色ネット（ダイオネオシェード蒼快）の4種類を供試した。白色ネットは白色顔料と温度上昇防止剤を添加混入することで、近赤外線の反射効率を高めている。赤色ネットおよび青色ネットはそれぞれ赤色光および青色光を良く透過するように、それぞれ赤色顔料および青色顔料を添加して設計製作されたものである。

幅2m×長さ9mに裁断した各色遮光ネットを、田面の水流に沿って横一列に並べ、定植日から収穫まで田面から1mの高さに展張した。反復数を増やすため、2区画で同様の試験を実施した。

2) 各色処理区における遮光ネット透過日射量、光質、および温度の比較

各色遮光ネット下および露地に半導体光センサ（S1133，浜松ホトニクス（株））と気温センサ（T型熱電対）を取り付けた三脚を設置し、水中には水温測定用センサ（T型熱電対）を設置した。10台用いた半導体光センサの出力は予め求めた光量子センサ（LI-250A，LI-COR）との関係式を用いて光合成有効光量子束密度（PPFD）へ変換した。両者は比例関係にあり、PPFDを y （ $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）、半導体光センサの出力（mV）を x とすると、比例係数はセンサの機差のため24.6~26.2の範囲の値を取った。各色の遮光ネット透過光のPPFD、気温および水温を、2015年7月6日~8月5日に測定

した。データはデータロガー (MJ-01, 日本環境計測) に1分毎に記録した。また、各色遮光ネットを透過した光の波長分布とPPFDを静岡県立大学および静岡県農林技術研究所伊豆農業研究センターにて測定した。光波長分布の測定には、静岡県立大学ではポータブル分光放射計 (JAZ-ULW-200, Ocean Photonics) を用いて、快晴日 (2015年9月8日, 11時~13時) に食品栄養科学部2号棟屋上にて測定した。伊豆農業研究センターでは携帯型分光放射計 (MS-720, 英弘精機) を用いて、快晴日 (2017年4月25日, 11時) にわさび生産技術科駐車場にて測定した。PPFDは上述の光量子センサを用いて、2015年7月24日および9月11日に食品栄養科学部2号棟屋上にて測定し、PPFDベースの遮光率を求めた。

3) 各色処理区におけるワサビの生育量の比較

2015年7月21日 (栽培期間3か月), 同10月19日 (同6か月), 2016年1月6日 (同9か月) および同4月18日 (同12か月) に欠株調査および収穫調査を実施した。欠株調査では各遮光ネット区で30株について2反復の調査を実施した。収穫調査は各遮光ネット区について、栽培期間3か月で20株2反復, 栽培期間6か月, 9か月, 12か月で10株2反復とし、株全体の生育を示す全重, 草丈, 最長葉の葉柄長 (最大葉柄長), 主根茎の生育を示す主根茎重, 主根茎の長さ (主根茎長), 主根茎の直径 (主根茎径), 主根茎の葉数, 腋芽の発生に対する影響を示す分けつ根茎数 (主根茎を除いた分けつ根茎の本数), および花成に対する影響を示す花茎発生数を測定した。

4) 各遮光ネット区におけるワサビ主根茎の辛味成分含量の比較

溶媒抽出ガスクロマトグラフィー質量分析法 (GCMS) により辛味成分のITC類の含量を測定した。収穫調査で調整した主根茎を収穫5日以内に処理し、分析用試料を調整した。栽培期間3か月の主根茎は丸ごと乳鉢に入れて1分間粉碎した。栽培期間6か月, 9か月, 12か月の主根茎は、葉柄の生え際から下1cmの部分の厚さ2~3mmで切り出し、おろし器を用いてすりおろした後、直ちに乳鉢でより細かく粉碎した。粉碎したワサビの組織1g程度を遠沈管 (容積15mL) に入れ、ワサビ自身のミロシナーゼにより前駆物質のGSL類をITC類に分解させるため5分間静置した。その後、内標準物質として10.0 $\mu\text{L L}^{-1}$ のトルエン-d8を添加したヘキサン10mLを加え、試験管ミキサーを用いて1分間混合した。固相と液相を分離するために、遠心分離機を用いて6000Gで遠心分離した。遠心分離された上清液

をシリンジフィルター (0.2 μm) で濾過し、このヘキサン抽出液を分析用試料とし、分析まで-18°Cの冷凍庫で保存した。分析にはガスクロマトグラフ質量分析計 (QP5000, 島津製作所) を使用し、ヘキサン抽出液2 μL を注入し、定性定量分析した。カラムにはSUPELCOのEquity-5 (長さ60cm, 内径0.25mm, 膜厚1.0 μm) を用い、キャリアガスにはヘリウムを使用した。カラム槽の初期温度は50°Cとし、1分間の保持後5°C/minで230°Cまで昇温し、10分間保持した。主成分のAITCを定量するために、AITCの標品 (和光純薬工業) を用いて検量線を作製し、検出したAITCを定量し、新鮮重に対する含量を求めた。他のITC類については、GCMSクロマトグラム上のピーク面積を用いて相対的な含有量を比較した。

(2) 遮光資材の昇温抑制効果の検証

1) 各遮光資材下における黒色板の温度測定

遮光資材の物理特性を比較するために、各遮光資材下の透過光による黒色板表面温度、波長分布および放射収支を測定した。本測定は、周辺に陰となるものが無い静岡県立大学敷地内の芝生園地にて行った。

直径3cm長さ1.5mの塩化ビニル製パイプ (イレクターパイプ, 矢崎化工) と塩化ビニル製ジョイント (イレクタージョイント, 矢崎化工) を使用して、各辺1.5mの立方体の格子を作成した。上面に遮光資材を展張し、パッカーで固定した。格子を4個作成して、白色ネット, 黒色ネット, 赤色ネットおよび青色ネットの計4種類の遮光資材下で黒色板温度を測定した。本来、栽培現場にてワサビの葉の表面温度を測定することが望ましいが、葉の表面に温度センサを固定するのは困難である。また、現地では遮光ネットがあるのでサーマルカメラで上部から撮影することができない。ネット下の狭い栽培空間から撮影することも考えられるが、ネットごと時間がずれるため刻々と変化するワサビの表面温度を一律に評価できない。そのため、芝生園地にて短波放射の吸収率が植物と同程度である真鍮製の黒色板 (縦4cm, 横4cm, 厚さ3mm) を模擬の葉として用いた。各遮光資材下で黒色板を4枚使用した。栽培現場では高さ1mの位置に遮光ネットを展張していることから三脚を用いて黒色板の位置を高さ50cmに調節し、遮光ネットと黒色板の間隔を1mとした。黒色板の下面にT型熱電対センサ部を両面テープで固定し、塩化ビニル板 (縦20cm×横60cm) の上に設置した。センサ部の厚みによって、黒色板と塩化ビニル板の間に隙間ができるため、熱伝導グリスを充填し、熱電対センサ部全域が黒色板の温度とほぼ等

しくなるようにした。比較対象として、直達光下での黒色板温度と気温を測定した。それぞれの熱電対はデータロガー (GL820, GRAPHTEC) に接続し、1分毎に黒色板の表面温度と気温を記録した。測定は2018年10月31日および2019年3月5日の12時から14時に行った。いずれも天気は晴れであった。

2) 各遮光資材を透過する光の短波放射と長波放射の測定

上記と同様に格子を1つ組み立て、遮光資材下に水平に設置した放射収支計 (DHF-NR01/RA01, クリマテック) を用いて、下向きの短波放射を測定した。遮光資材は20分毎に張り換え、日中に4種のネットを透過した放射量およびネットがない場合の天空からの放射量を順に測定し、データロガー (CR1000, Campbell Scientific) に1分毎に記録した。測定は快晴日を選んで、2019年3月12日および3月13日の午前10時～午後3時に行った。断続的に測定したネットがない場合の天空からの放射量 (短波と長波) を時刻の2次関数で近似し、遮光資材下で透過放射量と測定した時刻に推定される天空からの放射量との比を用いて、各遮光資材の短波放射の遮光率を計算した。

2 結果

(1) 各ネット区における遮光ネット透過日射量、光質および温度の比較

遮光ネットの透過光の波長分布を図5-1、図5-2に示した。白色ネット区および黒色ネット区の透過光の波長分布は、無遮光で測定した太陽光のそれに類似していた。赤色ネット区では、青色光 (波長400～500nm) および緑色光 (波長500～600nm) の光子束密度 (PPFD) の比率が直達光よりも低く、赤色光 (波長600～700nm) および遠赤色光 (700～800nm) のPPFDの比率が高かった。青色ネット区では青色光のPPFDの比率が太陽光よりも高く、赤色光 (波長600～700nm) および遠赤色光 (700～800nm) の比率が低かった。赤色光/遠赤色比 (R/FR比) は、白色ネット区、黒色ネット区、赤色ネット区では1前後であり太陽光に近い値であったが、青色ネット区は0.70と低かった。

大学屋上で測定した遮光ネットの可視光遮光率 (光子束ベース) を図5-3に示した。白色ネット区で36%、黒色ネット区で78%、赤色ネット区および青色ネット区とともに58%であった。

わさび田における7月6日～8月5日の遮光ネット下の積算PPFDを図5-4に示した。無遮光下で測定した太陽光に対し白色ネット区が54%で最も大きく、次いで青

色ネット区および赤色ネット区がそれぞれ44%、39%と同程度であり、黒色ネット区が21%で最も小さかった。

わさび田における7月6日～8月5日の遮光ネット下における気温および水温の時間変動を図5-5に示した。

気温、水温ともに各処理区はネットを展開していない対照区よりも低い傾向にあったが、9時～15時の時間帯では気温差は1.2℃以内、水温で0.4℃以内と小さかった。

(2) 各色処理区におけるワサビ株の欠株率および生育量の比較

各処理区の累積欠株率は、栽培期間12か月で5%以下であり、処理区間に有意差はなかった (データは示していない)。

各処理区におけるワサビの生育量を図5-6に示し、栽培期間12か月の主根系写真を図5-7に示した。ワサビ株の全重は栽培期間6か月以後において白色ネット区で大きく、黒色ネット区との間に6か月目および9か月目で有意差が認められた ($p < 0.05$)。白色ネット区の全重は、青色ネット区に対しても9か月目および12か月目で有意に大きくなった ($p < 0.05$)。最大葉柄長は栽培期間9か月までは青色ネット区で小さい傾向にあった。主根茎重は栽培期間6か月以後において白色ネット区で青色ネット区、黒色ネット区より有意に大きく ($p < 0.05$)、赤色ネット区は白色ネット区、青色ネット区、黒色ネット区と有意差がなかった。主根茎長は栽培期間9か月以後において白色ネット区で大きく、青色ネット区、黒色ネット区で小さかった。主根茎径は栽培期間を通して白色ネット区で大きかった。分けつ根茎数は栽培期間6か月以後において白色ネット区で多く、最も少なかった黒色ネット区との間には有意差が認められた ($p < 0.05$)。花茎発生数は、平均値では青色ネット区で少ない傾向にあったが、各処理区に有意差がなかった。

(3) 各色処理区におけるワサビ主根茎のITC類含量の比較

各色処理区におけるワサビ主根茎のITC類含量を図5-8に示した。ワサビ主根茎の新鮮重当たりのAITC含量は、栽培期間3か月では白色ネット区および黒色ネット区でそれぞれ1.21 mg g⁻¹と1.18 mg g⁻¹であり、赤色ネット区の1.01 mg g⁻¹、青色ネット区の0.99 mg g⁻¹に比べて有意に高かった ($p < 0.05$)。栽培期間6か月では黒色ネット区、白色ネット区、赤色ネット区でそれぞれ2.32 mg g⁻¹、2.14 mg g⁻¹、2.18 mg g⁻¹であり、青色ネット区の1.90 mg g⁻¹に比べて有意に高かった ($p < 0.05$)。栽培期間9か月および12か月では、各色処理区間に有

意差はなかった。

AITC 以外の ITC 類は、栽培期間 3 か月ではほとんど検出されなかった。栽培期間 6 か月以後ではイソプロピルイソチオシアネート、イソブチルイソチオシアネート、ブタン 1-イソチオシアネートおよび 3-ブテンイルイソチオシアネートを検出した。栽培期間 6 か月ではイソプロピルイソチオシアネートとブタン 1-イソチオシアネートの含量（相対値）は、黒色ネット区で赤色ネット区、青色ネット区よりも有意に高かった ($p < 0.05$) が、栽培期間 9 か月および 12 か月では処理区間に有意差はなかった（データは示していない）。

(4) 各遮光資材下における黒色板の温度

各遮光資材下における黒色板の表面温度を表 5-1 に示した。秋季および春季の測定において、黒色板の表面温度は、黒色ネットでは他の 3 種類のネットより低く推移した。1 時間ごとの黒色板表面温度の平均値を比べると、黒色ネット下で他の資材下と比べ有意に低くなった。白色ネット、赤色ネットおよび青色ネットの 3 種類において黒色板表面温度の差異は小さかったが、春季の測定では表面温度が青色ネット下で白色ネットと比べて有意に高かった。

(5) 各遮光資材を短波放射透過率

春季に 2 日間測定した各遮光ネットの短波放射透過率を図 5-9 に示した。短波放射の透過率は黒色ネットが最も低く、白色ネット、赤色ネットおよび青色ネットの下では同程度であった。

3 考察

可視光遮光率は白色ネットが最も小さかったが、測定結果から導き出される計算では、わさび田では 46% (図 5-4 ; 積算透過日射量の直達光比 54% から逆算) と大学屋上の 36% (図 5-3) よりも高かった。供試したわさび田は周囲を山林に囲まれており、大学屋上に比べて入射光が弱かったために、遮光率が相対的に高くなった可能性がある。

白色ネット区および黒色ネット区は直達光に類似した光波長分布であったが (図 5-1, 図 5-2), 透過日射量がそれぞれ大きく異なることから、両処理区の比較により透過日射量がワサビの生育に及ぼす影響を検討できる。また、赤色ネット区および青色ネット区は透過日射量が同程度であるが、光波長分布が大きく異なることから、両処理区の比較により光波長分布の影響を検討できる。栽培期間中の全重、主根茎重、分けつ根茎数は白色

ネット区でもっとも大きく推移し、次いで赤色ネット区で大きく、青色ネット区、黒色ネット区では小さい傾向にあった (図 5-6)。伊奈 (2002) は黒色ネットの遮光率を 30%、50% および 70% に設定してワサビの栽培試験を行い、株重と主根茎重は遮光率 50% で最大で、次いで 30%、70% の順となること、ワサビの乾物重に占める分けつ根茎数の割合は遮光率が低くなると高まることを報告した。我々の圃場実験では、PPFD の遮光率が約 40% と低い白色ネット区で主根茎重および主根茎長がもっとも大きく推移した。PPFD の遮光率が約 60% である赤色ネット区と青色ネット区では、主根茎重が白色ネット区の約 80% であった。このことから、白色ネット区の透過日射量は主根茎の成長にとって、4 種類のネットの中で最適であり、これは、伊奈 (2002) が遮光率 50% でワサビの生育が良好であったという報告と類似している。

赤色ネット区と青色ネット区の透過 PPFD 量はほぼ同じであるが、栽培期間 9 か月および 12 か月における全重、主根茎重、主根茎長および分けつ根茎数は赤色ネット区で青色ネット区より大きい傾向が一貫して認められた。赤色 LED と青色 LED を用いて赤色光に対する青色光の比率 (B/R 比) を変えてレタスを育てた実験では、赤色単独で成長量が最大で、青色光が増え B/R 比が上昇するにつれて成長量が低下した (Son と Oh, 2013)。本研究でも、赤色ネット区の B/R 比は 0.38 と、青色ネット区の B/R 比 (2.37) と比べ小さい値であった。赤色光の割合が大きい光環境は、青色光の割合が大きい光環境より、ワサビの成長を促進させる可能性があることが示唆された。なお、本実験で用いたこれらネットは、Shahak ら (2004) が果樹の栽培で用いた赤色ネットおよび青色ネットの透過光の B/R 比 (それぞれ 0.63 および 1.26) と比べ、波長選択性が高い。

R/FR 比が高い光環境では、草丈の伸長が抑制されることが多くの植物で報告されている (Alokam ら, 2002)。本研究で用いたネットの透過光の R/FR 比は、白色ネットで 1.06、黒色ネットで 1.16、赤色ネットで 0.99、および青色ネットで 0.7 であった。また、太陽光自体の R/FR 比は 1.04 であった。本試験では、R/FR 比が低い青色ネット区で草丈が低く、一般概念とは逆の結果となった。しかし、通常茎の伸長が抑制される R/FR 比は 2 程度であり (Murakami ら, 1991 ; Kubota ら, 2000)、本実験の範囲での R/FR 比 (0.7~1.1) は、茎の伸長に大きな影響を及ぼさないと考えてよい。青色ネット下での葉柄の伸長量の低下は、全重や根茎重の低下とともに起こっていることから、青色ネット下での成長抑制が原

因であると考えられる。

ワサビを含むアブラナ科野菜の強い刺激臭は ITC 類であるが、ワサビの生体に常在するものではない。ITC 類は細胞内の液胞に存在する GSL 類の一種のシニグリンが、ワサビの植物組織がすりおろされる過程で細胞の原形質膜、液胞膜、小胞体膜などの膜近傍にある酵素ミロシナーゼと反応することにより生成される(原ら, 2003)。ITC 類の主要物質は AITC であるが、その他にも、メソイソチオシアネート、3-ブテニルイソチオシアネート、イソプロピルイソチオシアネートが本実験で用いたワサビに含まれていた。主要成分の AITC は抗がん性(川岸, 1995)、抗菌性(Inoue ら, 1983; Goi ら, 1985)、抗酸化性(越智ら, 1995)、抗変異原性、および抗アレルギー性などの様々な有益な作用を持つことが報告されている。

本研究では、主根茎の AITC 含量は、栽培期間 3 か月では赤色ネット区と青色ネット区で、白色ネット区と黒色ネット区よりも有意に低く、栽培期間 6 か月では青色ネット区で他の 3 処理区よりも有意に低かった(図 5-8)。黒色ネット区の全重と主根茎重は青色ネット区と同等であるが、黒色ネット区の AITC 含量は青色ネット区に比べて有意に高く、白色ネット区、赤色ネット区と差がなかった。Abe ら(2015)は北海道における野生の *Cardamine fauriei* (エゾワサビ) に異なる波長分布の LED 光を照射し、青色光と赤色光の比率を 1 にすることで AITC の基質である GSL 類含量の最も高い値を得たが、赤色光だけを照射した場合の GSL 類含量は低い値であった。この結果は、我々の実験での青色ネット下で栽培したワサビの AITC 含量が低かったことと反対である。植物種間による光質への反応の差異か、あるいは赤色光、青色光とは異なる波長の光が原因なのかもしれないが、今後の検討が必要である。

PPFD 透過率は白色ネットで 60%以上と最も高く、青色ネットおよび赤色ネットの約 40%の 1.5 倍であった(図 5-9)。しかし、白色ネットの短波放射透過率は約 60%と青色ネットおよび赤色ネットとほぼ同様であった。ネット下に設置した黒色板の表面温度は、黒色板に吸収された短波放射エネルギーを反映することから、黒色板表面温度がネット間で差はなかった(表 5-1)ことは、短波放射測定の結果から説明できる。このことから、ワサビ田で栽培されるワサビの葉の表面温度も、白色ネット、青色ネットおよび赤色ネットの 3 種ネット間で差がないことが推察される。

地球上に到達する太陽放射中には、UV-A を主とする紫外線が数%、可視光線が 40~45%、近赤外線が 50~55%含まれ、季節や地域によってその割合は若干異なる(Tsangrassoulis, 2001)。このうち、植物の光合成に使用されず割合の大きい近赤外線は昇温効果のみを持つ。植物の栽培に適切な遮光ネットは、光合成に利用できる 400~700nm の波長の光合成有効放射(PAR)域の光をより多く透過する一方で、近赤外線を多く遮断する特性が望まれる(Castellano ら, 2008)。本実験で用いた黒色ネット、赤色ネット、青色ネットは、PAR 領域以外の太陽放射、つまり近赤外線をより高い割合で透過していた。他方、白色ネットは PAR と近赤外線領域を同じ割合で透過していた。このように、白色ネットは昇温抑制効果を持ちつつ、他のネットと比べ PAR 域の光を高率で透過し光合成を促進できることが明らかになった。これにより、収穫時のワサビの全重や根茎重を高め、ワサビの成長を促進したと考えられる(図 5-2, 図 5-3)。本研究で用いた白色ネットは、今後の気候変動による温暖化においてもワサビの昇温を抑制しつつ、光合成速度を高く維持できる可能性を示す。

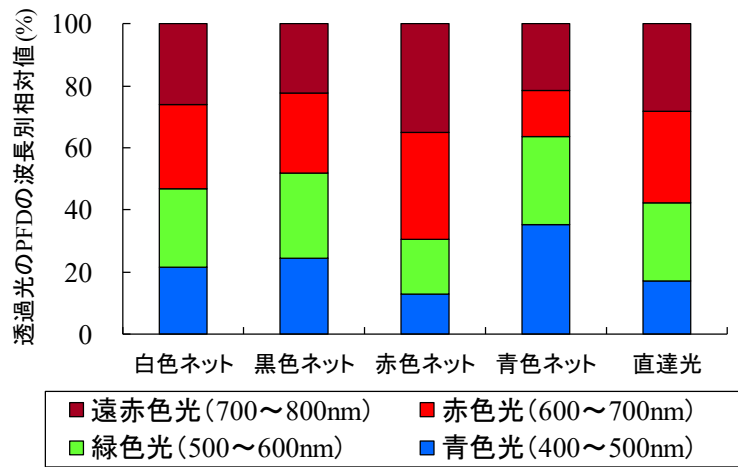


図5-1 遮光資材の透過光における波長別の光の構成
1) 測定日時 2015年9月8日12時 (快晴)

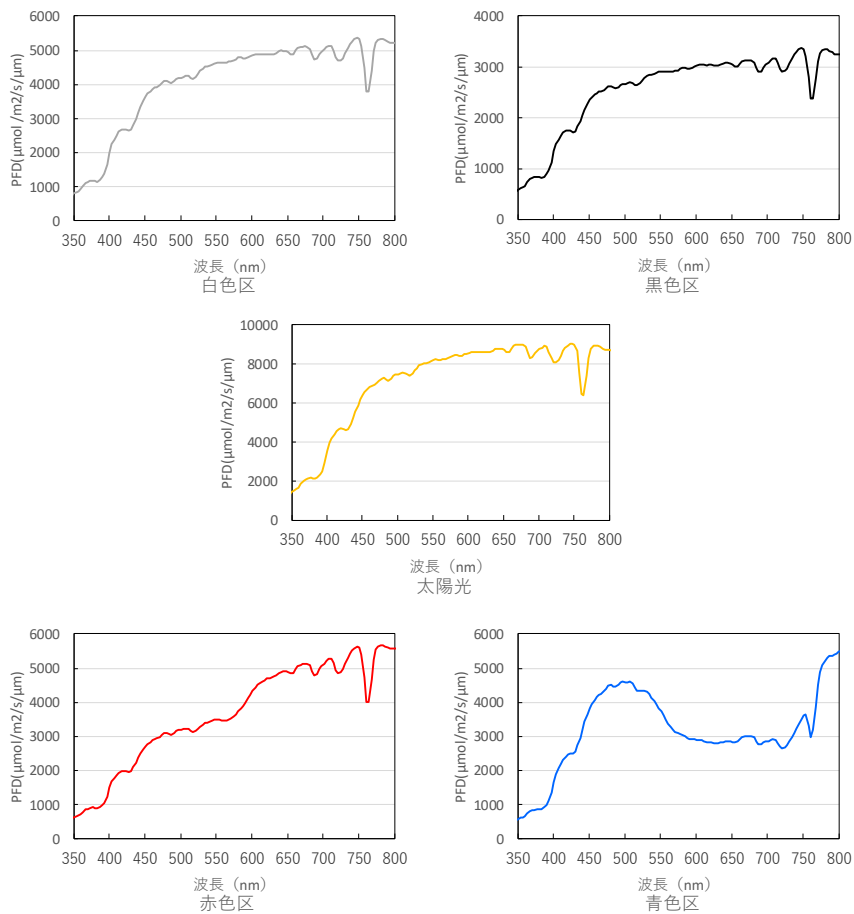


図5-2 各色処理区で遮光ネットを透過した太陽光の波長分布
1) 測定日時 2017年4月25日11時 (快晴)

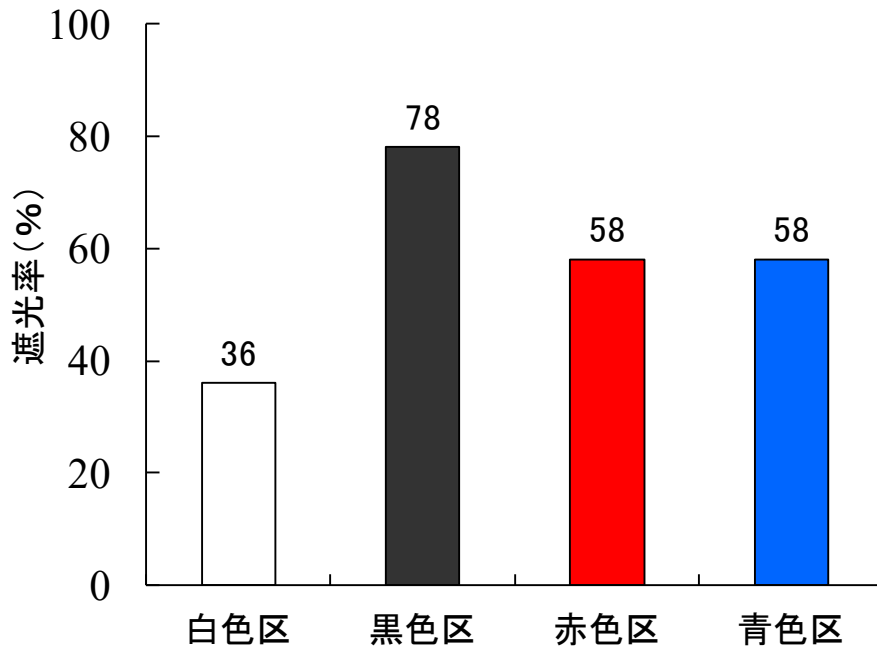


図5-3 遮光ネット透過光の可視光域全体の遮光率
 1) 測定日時 2015年7月24日, 9月11日の平均

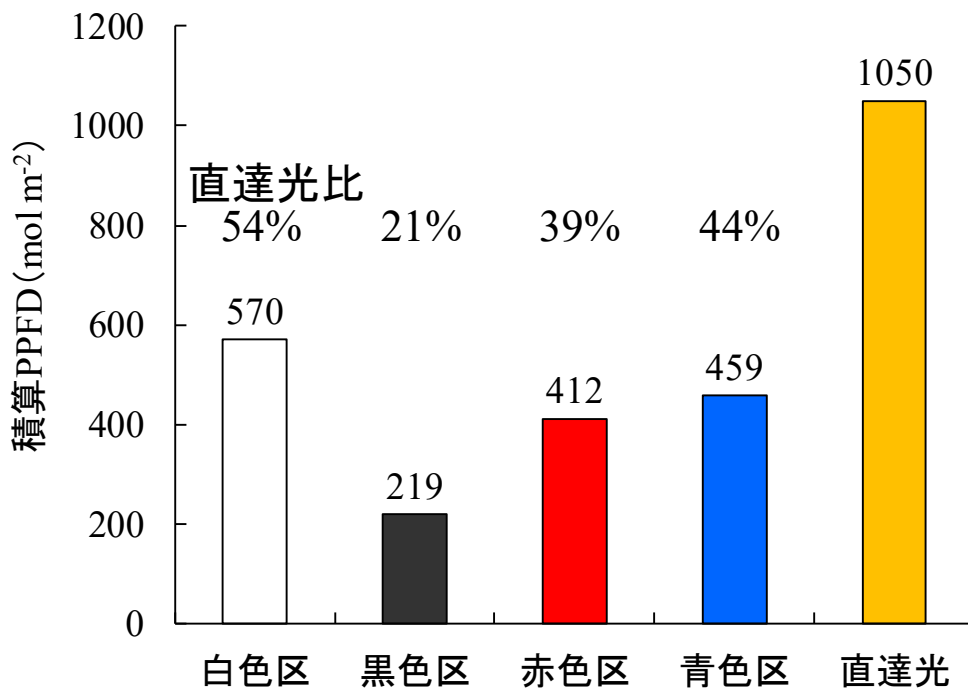


図5-4 遮光ネットの1か月間の積算透過日射量
 1) 測定期間 2015年7月6日～8月5日

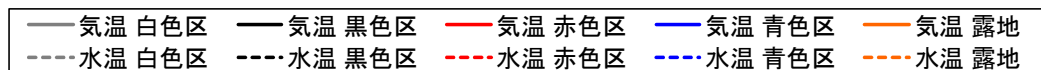
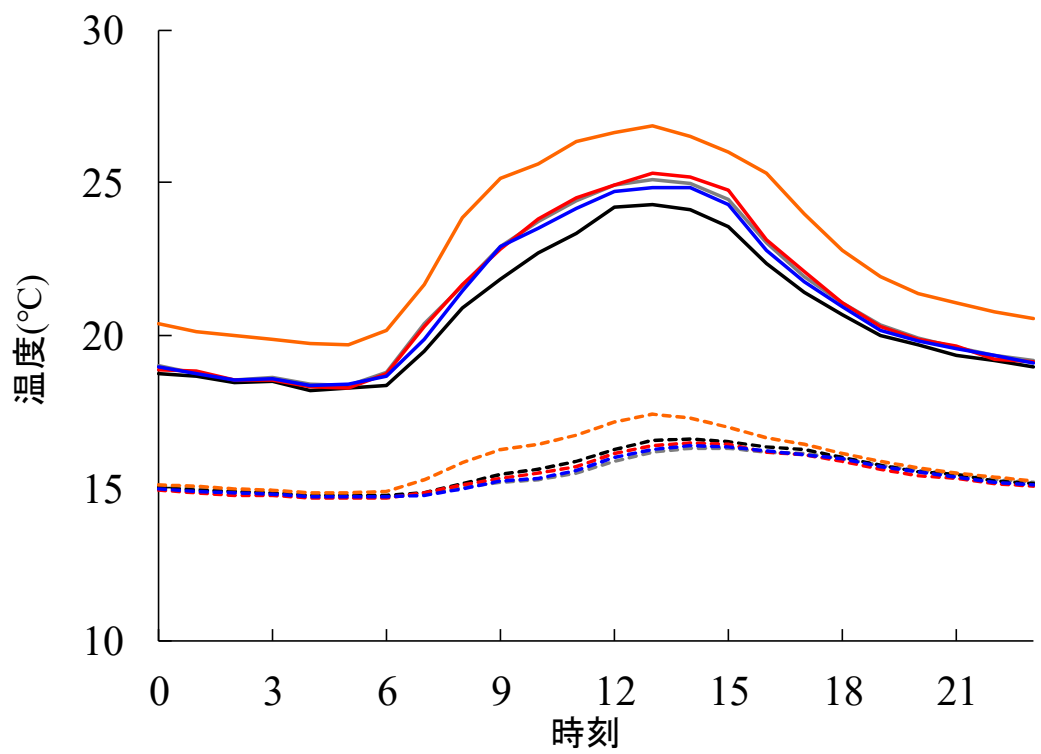


図5-5 遮光ネット下における気温および水温の時間変動

1) 測定日時 2015年7月6日～8月5日の平均

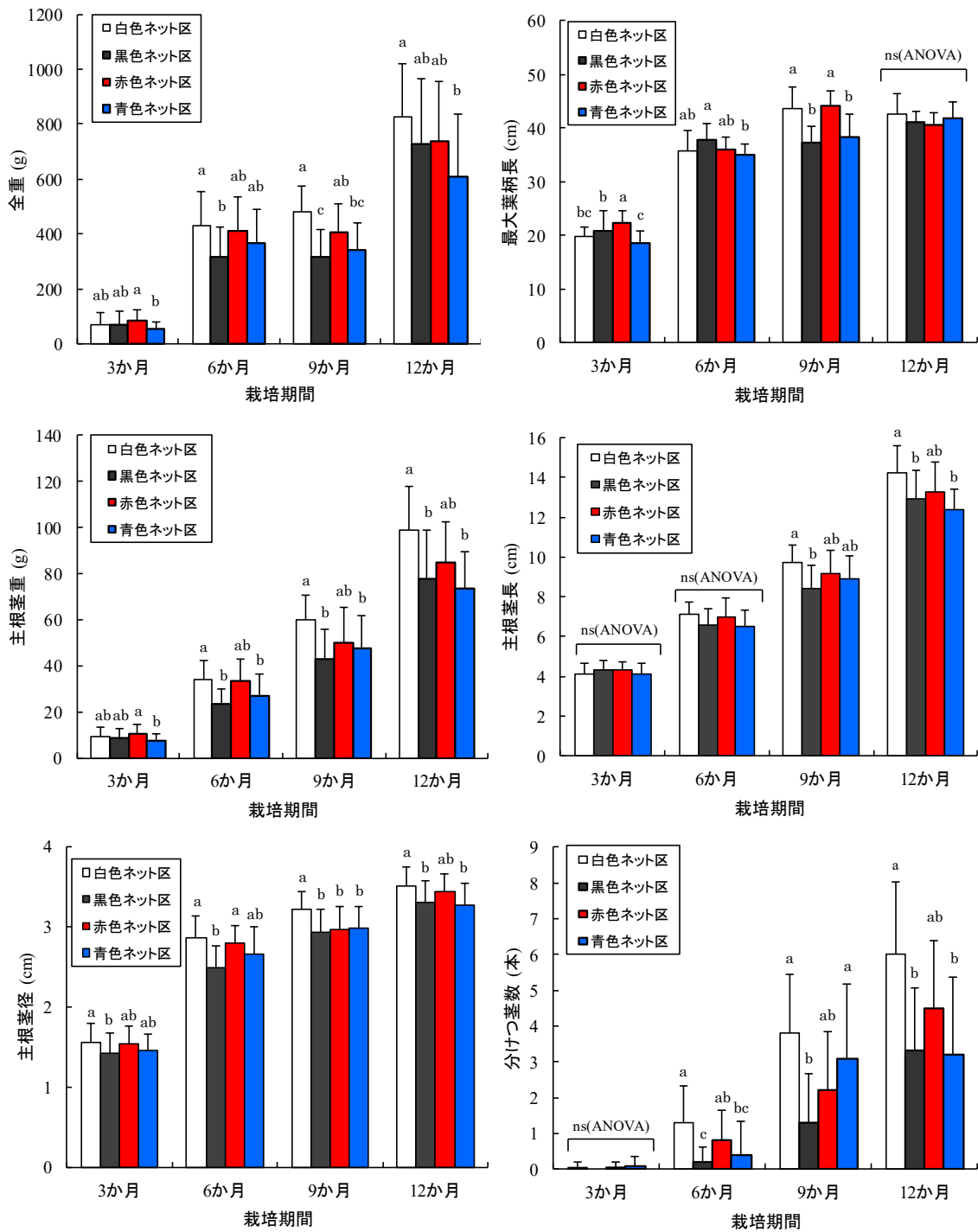


図5-6 各色処理区におけるワサビの生育量

- 1) 同じ栽培期間内において異なるアルファベット間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差あり
- 2) エラーバーは標準偏差を示す



図5-7 各色処理区における栽培期間12か月の主根茎

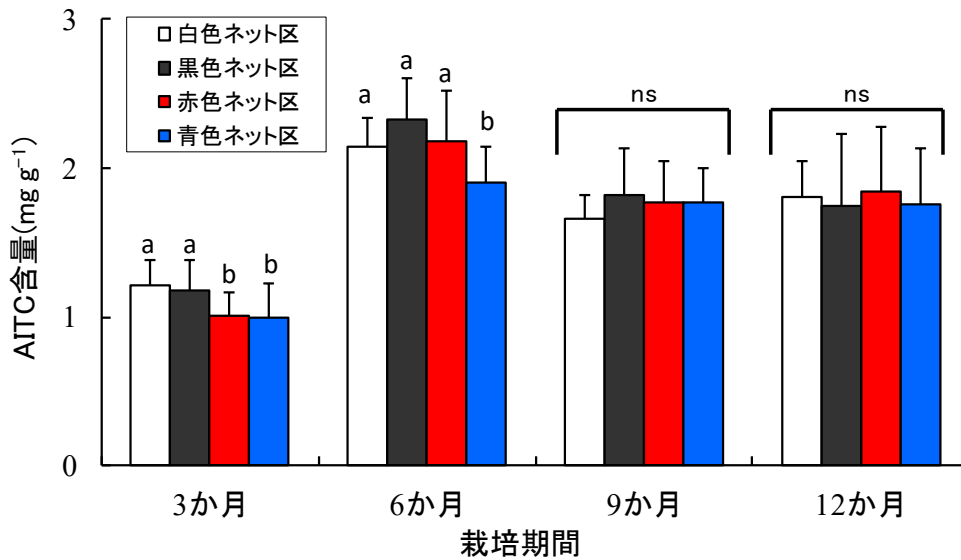


図5-8 各色処理区におけるワサビ主根茎のAITC含量

- 1) 同じ栽培期間内において異なるアルファベット間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差あり
- 2) エラーバーは標準偏差を示す

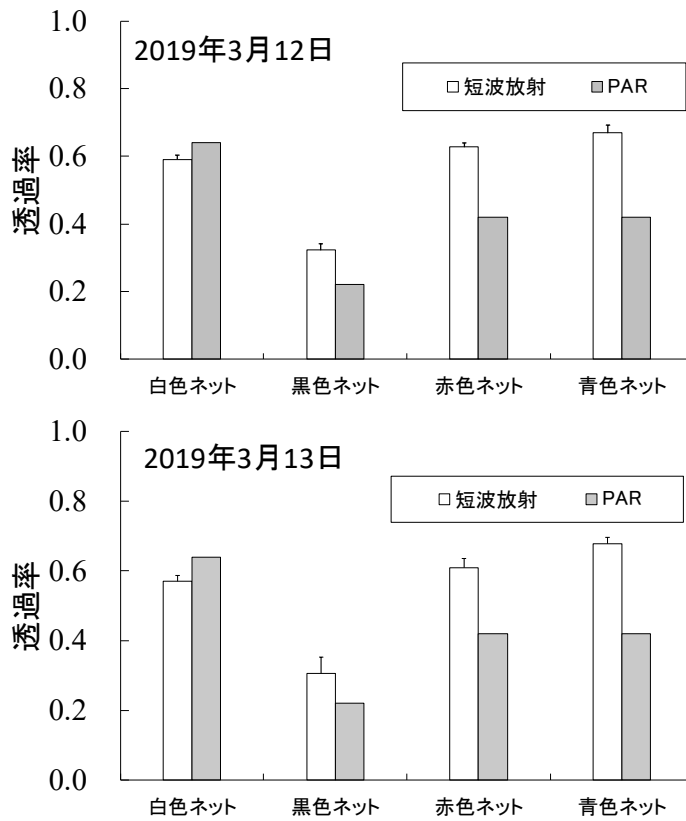


図5-9 各遮光資材の短波放射およびPARの透過率

1) エラーバーは標準偏差を示す

表5-1 各遮光資材下における黒色板の表面温度

| 処理区 | PARの遮光率 (%) | 2018年10月31日 | |
|----------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 11:01~12:00 | 12:01~13:00 |
| 白色ネット | 36 | 24.5±0.2 b ^z | 24.0±0.1 b ^z |
| 黒色ネット | 78 | 22.4±0.2 d | 21.9±0.2 c |
| 赤色ネット | 58 | 24.5±0.1 b | 23.9±0.3 b |
| 青色ネット | 58 | 24.0±0.1 c | 23.6±0.2 b |
| 対照 (太陽光) | 0 | 30.1±0.3 a | 29.1±0.3 a |
| 気温 | | 21.8±0.3 e | 21.4±0.4 d |

| 処理区 | PARの遮光率 (%) | 2019年3月5日 | |
|----------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| | | 12:01~13:00 | 13:01~14:00 |
| 白色ネット | 36 | 26.3±0.3 c ^z | 25.8±0.3 c ^z |
| 黒色ネット | 78 | 22.8±0.4 d | 21.8±0.3 d |
| 赤色ネット | 58 | 26.7±0.5 c | 26.4±0.5 bc |
| 青色ネット | 58 | 27.8±0.3 b | 27.0±0.3 b |
| 対照 (太陽光) | 0 | 33.6±0.5 a | 33.5±0.5 a |
| 気温 | | 19.6±0.3 e | 20.2±0.3 e |

^z 同じ列内において異なるアルファベット間にはTukeyの多重検定により5%水準で有意差あり

第6章 総合考察

1 実生苗の周年大量生産・供給体系を構築する育苗管理改善方法

(1) 新たな種子発芽管理技術

緒言で述べたとおり、ワサビ種子の発芽には、これまで、1) 種子によって発芽率の差が大きく、計画的な育苗が困難である、2) 種子は長期保存のための乾燥処理によって発芽が不安定となるが、乾燥種子の発芽促進方法は不明である、3) 種子の発芽は20℃以上では不安定であり、静岡県内では10月上旬以前の播種が困難であるという問題点があった。

これらの発芽が不安定な要因として、1) 種子によって休眠程度が異なること、2) 種子の乾燥処理によって休眠が深まっていること、3) 播種前処理の不足により休眠覚醒が不十分であることが考えられていた。

本研究の第2章および第3章において、1) 播種前のGA₃処理期間を、慣行の3~5日から10日間に延長することにより、休眠覚醒の程度が高まり、発芽率が増加すること、2) 播種前のGA₃処理後に5℃10~15日間の湿潤低温処理を加えることにより、さらに休眠覚醒が進んで発芽温度域が拡大し、10、20℃の発芽率は発芽適温の15℃とほぼ同程度に安定することが明らかとなった。

以上の発芽促進技術を育苗現場に取り入れることで、乾燥種子を十分に休眠から覚醒させることが可能となる。したがって、高い発芽率を実現するためには、ワサビ種子の播種前種子処理を、GA₃処理10日間+5℃湿潤低温処理10~15日間とし、発芽時の育苗施設温度を10~20℃の範囲内で管理することで可能になることが示された。

(2) 新たな育苗管理技術

静岡県内における定植苗の年間不足数200万本を充足するには、1) 増殖効率の高い実生苗の大量生産、2) 育苗施設の占有面積における育苗の効率化、3) 育苗施設の占有期間における育苗の効率化という課題がある。

本研究の第4章において、上記の課題の解決のため、慣行育苗(セルサイズ72穴・セルトレー移植後の育苗期間4か月)の実生苗と、セルサイズを128~200穴に縮小し、セルトレー移植後の育苗期間を2~3か月に短縮して育苗した実生苗を比較した。その結果、1) わさび田定植後の活着率には差がないこと、2) 定植1年後の根茎の大きさには差がないことが明らかとなり、育苗

時のセルサイズを縮小し、育苗期間を短縮しても、ワサビの生産性は低下しないことが示された。

以上のセルサイズ縮小技術、育苗期間短縮技術を育苗現場に取り入れることで、育苗効率は慣行と比較して、施設占有面積では最大で2.8倍(図6-1)、施設占有期間では最大で1.7倍(図6-2)、両者の組合せにより最大で4.8倍となり、低コストで安定的な実生苗の大量生産が可能になると考えられる。

(3) 実生苗の新たな周年大量生産・供給体系

静岡県内における育苗地域は、慣行では平地に限定され、育苗時期は播種開始が10月中旬、育苗終期が翌年6月下旬であり、1年間に同一育苗施設において可能な育苗回数は1回であり、実生苗の供給時期が限定される問題がある。実生苗の周年大量生産・供給のためには、1) 高温下での種子の発芽を安定させ、夏季高温期育苗を実現することで、秋季苗を供給するとともに、2) 年間育苗回数を増加するという課題を解決する必要がある。

本研究では、育苗管理技術として、1) 播種前種子処理方法の改善により発芽率が向上し、発芽温度域が拡大すること、2) セルトレー移植後の育苗期間の短縮により実生苗の大量生産が可能であることが明らかになった。

発芽温度域の拡大により、静岡県内の育苗地域は慣行の平地から新たに高冷地まで拡大する。御殿場市(気象庁御殿場観測所の標高472m)は静岡県内において高冷地に該当するが、6~9月の半月ごとの平均気温は17.6~23.9℃(図6-3)と、慣行法では種子の発芽が困難である。しかし、新たな発芽管理技術では20℃での発芽が可能であり、高冷地での夏季高温期育苗を実現できる。

また、10℃の低温でも安定して発芽することから、高冷地(御殿場市)での育苗開始時期は、日中最高気温が10℃まで上昇する3月上旬から可能と考えられる。

これらのことを踏まえると、平地において、セルトレー移植後の育苗期間3か月の体系では、育苗時期は播種開始が10月上旬、育苗終期が翌年6月下旬であり、1年間に同一育苗施設において可能な育苗回数は2回に増加する(図6-4、表6-1)。さらに移植後の育苗期間2か月の体系では、播種開始と育苗終期は3か月の場合と変わらないが、年間育苗回数は最大で3回に増加する。

高冷地における育苗時期は、移植後の育苗期間2か月と3か月の体系で変わらず、播種開始が3月上旬、育苗

終期が10月下旬と夏季高温期を過ぎ、秋季定植苗の安定供給が実現するとともに、年間育苗回数はいずれも2回に増加する。

よって、ワサビ育苗管理体系に、夏季高温期の発芽率を増加する新たな種子発芽管理技術と、年間育苗回数を増加する新たな育苗管理技術を導入することで、実生苗の新たな周年大量生産・供給体系を構築し、不足する定植苗200万本を充足するとともに、より安定的・計画的な水ワサビ生産を実現することが可能となると考えられる。

2 新規遮光資材を用いたわさび田での栽培環境改善方法

ワサビの生育適温は気温13~15℃、水温8~18℃であり、夏季高温期は昇温防止のため、わさび田に遮光ネットを展張して直射日光を遮光する。しかし、ワサビの生育に対し、1) 適正な透過日射量が不明、2) 透過光の光質の影響が不明という問題点があり、適切な遮光率、色調の遮光資材の選定により、生産性を向上するという課題があった。

本研究の第5章において、慣行の黒色ネット(PAR透過率22%)、白色顔料と温度上昇防止剤を添加混入し近赤外線の反射効率を高めた白色ネット(同64%、近赤外線遮光機能あり)、赤色ネット(同42%)、青色ネット(同42%)の4種類の遮光ネットを比較し、1) 白色ネットは透過光量が最も大きく、透過光の光波長構成が太陽光に類似し、根茎重が最も大きいこと、2) 透過光の光質は根茎のITC類含有量に影響しないこと、3) 白色ネットは、近赤外線を遮光して昇温抑制効果を持ちつつ、多くのPARを透過すること、4) 赤色ネットでは根茎の生育量が白色ネットと同程度だが、昇温防止性能が劣ること、5) 青色ネットでは光質の影響により根茎の生育量が小さいことが明らかとなった。

白色ネットの根茎重は、栽培期間6か月以上では、黒色ネットよりも約30~40%大きかった(図6-5)。市場の引き合いが強い根茎の大きさは100g/本前後であり、白色ネットの根茎重は栽培期間1年で99.2g/本と良好な生育を示しており、慣行と比較して根茎の生育を促進し、生産量を増大する効果があると考えられる。

以上のことから、白色ネットの使用はワサビの植物体温度の上昇を抑制しながら、慣行使用されている黒色ネットよりも豊富なPARを植物体に到達させ、ワサビの生育を促進することとなり、ワサビの生産性向上のため

には、夏季高温期のわさび田において、慣行の黒色ネットに替えて近赤外線遮光機能を有する白色ネットを展張することにより、可能になることが示された。

よって、水ワサビ栽培における夏季高温期の新たな遮光資材として、白色顔料と温度上昇防止剤を添加混入したポリエチレン製白色ネットを導入することにより(表6-2)、夏季高温期の遮光条件下においても、効率的に近赤外線を遮光して植物体の温度上昇を防止しつつ、慣行よりも植物体へのPARの到達量を増やすことで光合成を促進し、ワサビの生育を増大させることが可能となると考えられる。

3 残された課題

本研究では播種前種子処理、育苗資材、育苗期間、夏季を中心としたわさび田での遮光管理について研究を行ったが、育苗における光、温度、肥培管理等の育苗条件、わさび田における天候、日照量、気温等の栽培環境の変動に即応した遮光管理や、冬期の厳寒期でのわさび田での最適な栽培管理は今後の課題である。

本研究で提言した新規技術を生産現場に導入し、最大限の効果を発揮させるためには、これら残された課題の早急な解決が望まれる。

4 結言

以上、‘伊づま’等の品種を用い、本研究で得られた播種前種子処理による発芽促進技術、セルトレー育苗におけるセルサイズ縮小・育苗期間短縮技術や、これまでの研究から得られた種子乾燥調製技術、種子長期保存技術、夏季高温期育苗技術を組み合わせることで、ワサビにおける種子繁殖性品種の周年育苗体系が確立できる。

さらに、これまですでに導入されている畝石式わさび田、北駿式わさび田の水管理技術による水量・水温制御に加えて、夏季高温期にわさび田に展張する遮光ネットに、本研究でPARの透過性が高く近赤外線を遮光することが明らかとなった白色ネットを用いることにより、遮光技術としての効果は高まり、ワサビにおける夏季高温強日射下における栽培の安定化を図ることができる。

本研究で提言した新規育苗体系と新規遮光管理技術は、慣行の管理方法に簡易な変更を加えるだけで、水ワサビ栽培管理体系の抜本的な改善と大幅な生産性向上を実現するものであり、生産現場への導入効果が高く、ワサビの周年定植・安定生産が可能となると考えられる。

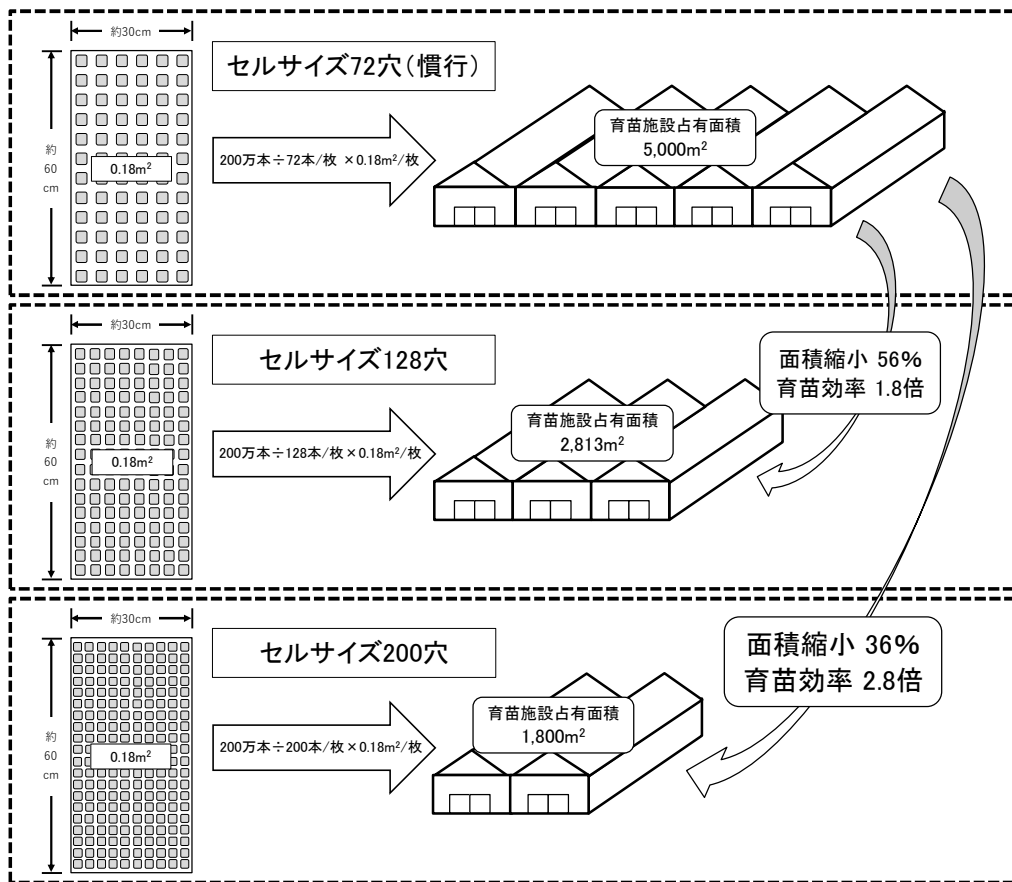


図6-1 セルトレーのセルサイズとワサビ実生苗200万本の育苗に必要な育苗施設面積

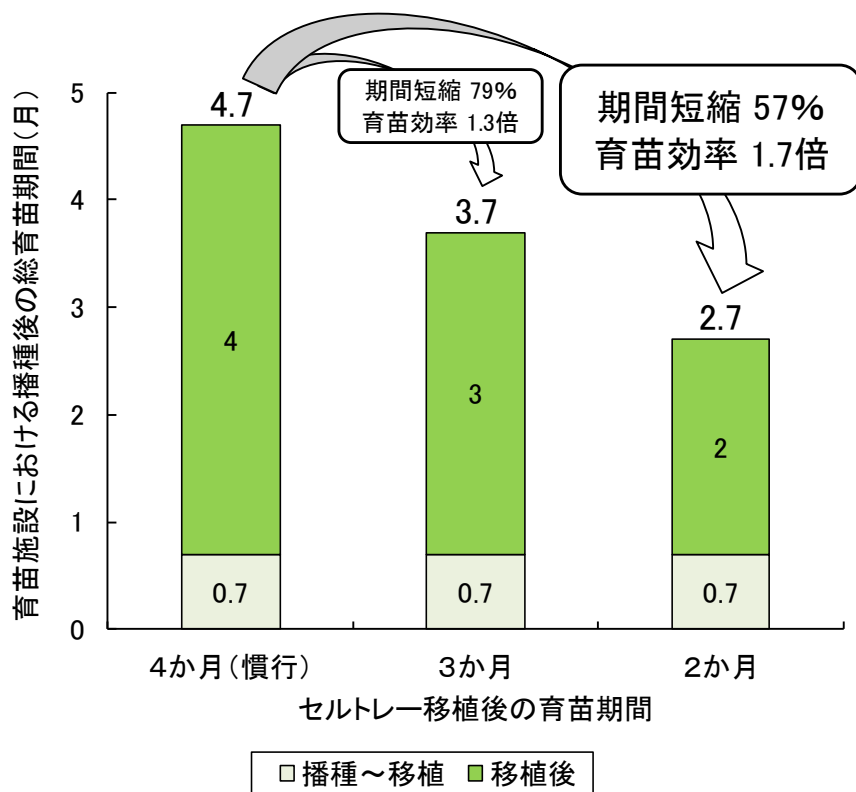


図6-2 育苗施設における総育苗期間

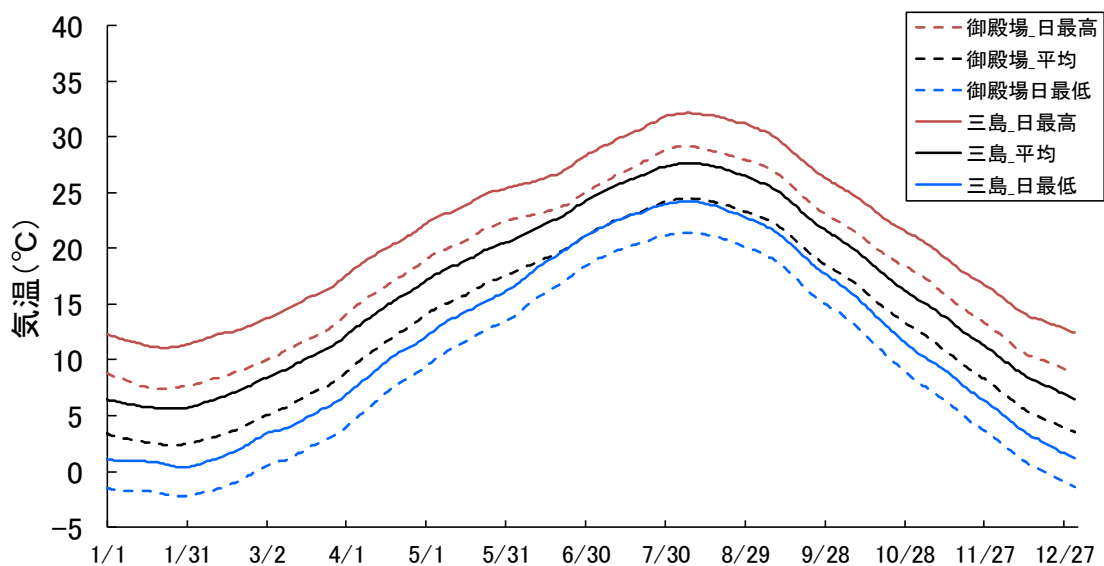


図6-3 静岡県内における平地^zと高冷地^yの気温推移
 z 三島市(気象庁三島観測所, 標高21m) y 御殿場市(気象庁御殿場観測所, 標高472m)

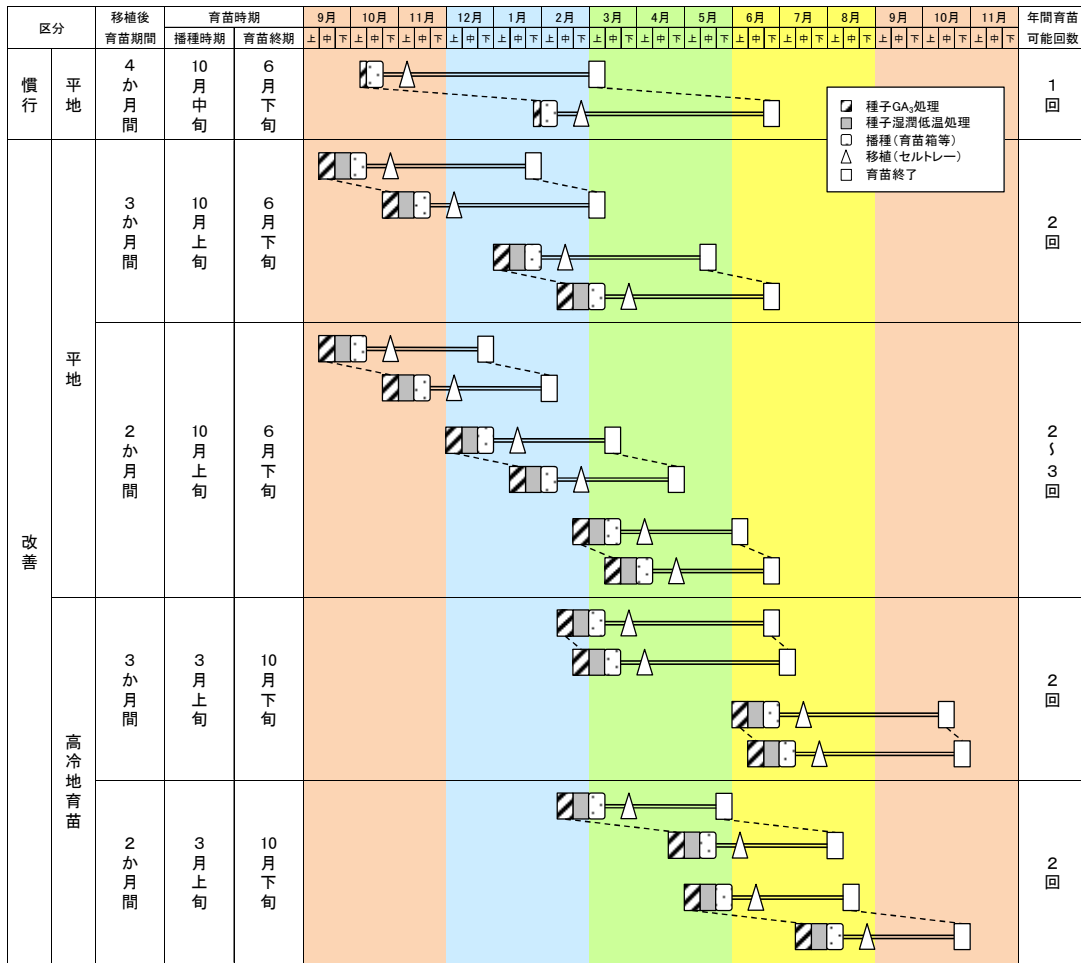


図6-4 ワサビ種子繁殖性品種における実生育苗時期

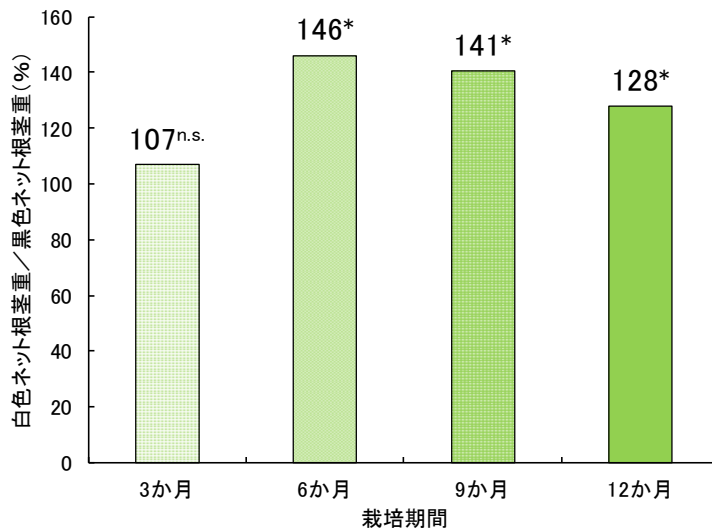


図6-5 白色ネットと黒色ネットにおける根茎重の比率

1) *は白色ネットと黒色ネットの根茎重の間に5%水準で有意性あり, n. s.は有意性なし

表6-1 水ワサビにおける乾燥種子を使用した実生育苗技術の改善方法

| 項目 | 慣行 | 改善 |
|---------|-------------------------------|--------------|
| 播種前種子処理 | GA ₃ 100ppm水溶液浸漬処理 | 5℃ 3～5日間浸漬処理 |
| | 湿潤低温処理（GA ₃ 処理後） | なし |
| 育苗時期 | 平地育苗（プラスチックハウス） | 10月中旬～翌年6月下旬 |
| | 高冷地育苗（屋根掛け） | なし |
| セルトレー | セルサイズ | 72穴 |
| | 移植後の育苗期間 | 4か月間 |

表6-2 わさび田での水ワサビ栽培における夏季高温期の遮光資材の改善方法

| 遮光資材の内容 | 慣行ネット | 改善ネット |
|--------------------|-------------|-------------------------------|
| 商品名 | ダイオラッセル1500 | クールホワイト620SW |
| 色調 | 黒色 | 白色 |
| 素材 | ポリエチレン | ポリエチレン （白色顔料と温度上昇防止剤を添加混入） |
| 可視光遮光率 （光量子ベース） | 78% | 36% |
| 透過光の波長分布 | 太陽光に準ずる | 太陽光に準ずる |

摘要

本研究は、静岡県における水ワサビ (*Eutrema japonicum* (Miq.) Koidz. (syn. *Wasabia japonica* (Miq.) Matsum.)) の種子繁殖性品種について、1. 新たな種子発芽管理技術、育苗管理技術を用いた実生苗の周年大量生産・供給体系の構築と、2. 新規遮光資材を用いたわさび田での栽培環境改善方法の確立を目的に実施した。

1 実生苗の周年大量生産・供給体系を構築する育苗管理改善方法

ワサビ種子の発芽には、1) 種子によって発芽率の差が大きい、2) 乾燥種子は発芽が不安定である、3) 種子の発芽は 20 °C 以上では不安定であるという問題点があった。発芽が不安定な要因として、1) 種子によって休眠程度が異なること、2) 乾燥種子では休眠が深いこと、3) 播種前処理の不足により休眠覚醒が不十分であることが考えられていた。

本研究において、1) 播種前の GA₃ 処理期間を、慣行の 3~5 日から 10 日間に延長することにより、発芽率が增加すること、2) 播種前の GA₃ 処理後に 5 °C 10~15 日間の湿潤低温処理を加えることにより、発芽温度域が拡大し、20 °C においても発芽適温の 15 °C とほぼ同程度と発芽率を示すことが明らかとなった。

静岡県内における定植苗の年間不足数 200 万本を充足するには、1) 増殖効率の高い実生苗の大量生産、2) 育苗施設の占有面積における育苗の効率化、3) 育苗施設の占有期間における育苗の効率化という課題がある。

本研究において、上記の課題の解決のため、慣行育苗 (セルサイズ 72 穴・セルトレー移植後の育苗期間 4 か月) の実生苗と、セルサイズを 128~200 穴に縮小し、セルトレー移植後の育苗期間を 2~3 か月に短縮して育苗した実生苗を比較した結果、1) わさび田定植後の活着率には差がないこと、2) 定植 1 年後の根茎の大きさには差がないことが明らかとなり、育苗時のセルサイズを縮小し、育苗期間を短縮しても、ワサビの生産性は低下しないことが示された。

静岡県内における育苗地域は、慣行では平地に限定され、育苗時期は 10 月中旬~翌年 6 月下旬である。年間育苗回数は 1 回であり、実生苗の供給時期が限定される問題がある。実生苗の周年大量生産・供給のためには、1) 夏季高温期育苗における種子の発芽を安定させ、2) 年間育苗回数を増加し、秋季定植苗の供給を実現する必要がある。

本研究では、育苗管理技術として、1) 播種前種子処理方法の改善による発芽率の向上と発芽温度域の拡大すること、2) セルトレー移植後の育苗期間の短縮により実生苗の大量生産が可能であることが明らかになった。

発芽温度域の拡大により静岡県内の育苗地域は慣行の平地から新たに高冷地まで拡大し、育苗期間の短縮により年間の育苗回転率が向上する。平地における育苗時期は 10 月中旬~翌年 6 月下旬であり、年間育苗回数は 2~3 回に増加し、高冷地における育苗時期は 3 月上旬~10 月下旬と夏季高温期を跨ぎ、秋季定植苗の安定供給が実現するとともに、年間育苗回数は 2 回に増加する。

以上のことから、実生苗の新たな周年大量生産・供給体系を構築し、不足する定植苗 200 万本を充足するとともに、より安定的・計画的なワサビ生産を実現することが可能となると考えられる。

2 新規遮光資材を用いたわさび田での栽培環境改善方法

ワサビ栽培では、夏季高温期は昇温防止のため、わさび田に遮光ネットを展張して直射日光を遮光する。しかし、ワサビの生育に対し、1) 適正な透過日射量が不明、2) 透過光の光質の影響が不明という問題点があり、適切な遮光率、色調の遮光資材の選定により、生産性を向上するという課題があった。

本研究において、慣行の黒色ネット (PAR 透過率 22%)、白色ネット (同 64%、近赤外線遮光機能あり)、赤色ネット (同 42%)、青色ネット (同 42%) の 4 種類の遮光ネットを比較し、1) 白色ネットは透過光量が最も大きく、透過光の光波長構成が太陽光に類似し、根茎重が最も大きいこと、2) 透過光の光質は根茎の ITC 類含量に影響しないこと、3) 白色ネットは、近赤外線を遮光して昇温抑制効果を持ちつつ、多くの PAR を透過することが明らかとなった。

以上のことから、白色ネットの使用はワサビの植物体温度の上昇を抑制しながら、慣行よりも豊富な PAR を植物体に到達させ、ワサビの生育を促進し、生産量を増大する効果があると考えられた。

ワサビ栽培における夏季高温期の新たな遮光資材として、白色顔料と温度上昇防止剤を添加混入したポリエチレン製白色ネットを導入することにより、夏季高温期の遮光条件下においても、効率的に近赤外線を遮光して植物体の温度上昇を防止しつつ、慣行よりも植物体へ

の PAR の到達量を増やすことで光合成を促進し、ワサビの生育を増大させることが可能となると考えられた。

3 結言

本研究で提言した新規育苗体系と新規遮光管理技術

は、慣行の管理方法に簡易な変更を加えるだけで、水ワサビ栽培管理体系の抜本的な改善と大幅な生産性向上を実現するものであり、生産現場への導入効果が高く、ワサビの周年定植・安定生産が可能となると考えられる。

謝 辞

本論文の取りまとめに際し、終始懇切な御指導、御校閲および審査を賜りました静岡大学農学部教授 鈴木克己博士に心より厚く深謝の意を表します。本論文の御校閲と審査を賜りました静岡大学農学部教授 切岩祥和博士並びに岐阜大学応用生物科学部教授 嶋津光鑑博士に、心より厚く感謝申し上げます。

共同研究者である静岡県立農林環境専門職大学短期大学部教授 稲葉善太郎博士、静岡県立大学食品栄養科学部教授 谷晃博士、静岡県農林技術研究所伊豆農業研究センター生育・加工技術科長 馬場富二夫博士には、本研究の遂行と本論文の取りまとめに際し、多大なる御協力、懇切な御指導および有益な御助言を賜りました。ここに心より深く感謝申し上げます。

共同研究者であり、本研究の遂行に際し御協力をいただいた元静岡県立大学食品栄養科学部助教 望月智貴博士、静岡県立大学大学院薬食生命科学総合学府環境科学専攻修士 菅敬氏、奥岡佳純氏、静岡県立大学食品栄養科学部環境生命科学科卒業生 中川夏実氏並びに静岡県立大学食品栄養科学部環境生命科学科植物環境研究室の皆様、深く感謝の意を表します。

本研究の遂行と本論文の取りまとめに際し、元静岡県農林技術研究所長 新田明彦氏、元静岡県農林技術研究所伊豆農業研究センター長 佐々木俊之氏、元静岡県農林技術研究所伊豆農業研究センターわさび生産技術科長 西島卓也氏、静岡県農林技術研究所伊豆農業研究センター長 種石始弘氏、生育・加工技術科長 加藤智恵美氏、上席研究員 片井祐介氏、上席研究員 浜部直哉博士、主任研究員 勝岡弘幸氏、主任研究員 小高宏樹氏、静岡県中遠農林事務所主査 松田健太郎博士、静岡県経済産業部農業局農芸振興課主任 前田未野里氏、農芸振興課浜名湖花博20周年記念事業推進室技師 曾根良輔氏並びに静岡県庁関係職員各位には、貴重な御助言と御協力をいただきました。本研究の実験施設と試験ほ場の管理に際し、伊豆農業研究センター 蟹沢雄二氏には多大なる労力を御提供いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

本研究の遂行に当たり、多くの最新遮光資材と資材の製造、開発に関する貴重な情報を御提供いただいた株式会社イノベックス 内田剛人氏並びに金子大介氏に、心より感謝の意を表します。

生産現場で抱える問題点や栽培管理方法について御教示いただき、研究に対する現場からの意見を率直に御提示いただいた富士伊豆農業協同組合修善寺営農経済センター課長補佐 日吉新氏、中伊豆山葵組合 故飯田哲司博士、太田園芸 太田宏氏、静岡県山葵組合連合会の皆様、静岡県東部花き流通センター農業協同組合わさび苗部会の皆様に厚く御礼申し上げます。

なお、本研究の一部は、農林水産省革新的技術開発・緊急展開事業「和食ブームを支えるワサビの施設化による超促成・高付加価値生産技術の実証」並びに静岡県新成長戦略研究「世界農業遺産『静岡水わさびの伝統栽培』を発展させる種苗産業と新栽培体系の確立」の一環として取り組みました。記して関係各位に謝意を表します。

引用文献

- Abe, K., Kido, S., Maeda, T., Kami, D., Matsuura, H., Shimura, H. and Suzuki, T. 2015. Glucosinolate profiles in *Cardamine fauriei* and effect of light quality on glucosinolate concentration. *Scientia Horticulturae*. 189: 12-16.
- 足立昭三, 山下勇, 丸山助, 鈴木春夫. 1974. ワサビ新品種「ふじだるま」について. 静岡県農業試験場研究報告. 19: 64-69.
- 足立昭三, 中村新一, 鈴木春夫. 1975. ワサビの開花結実について. 静岡県農業試験場研究報告. 20: 76-83.
- 足立昭三, 1980, 実生ワサビの栽培法. あたらしい農業技術. 51: 1-17.
- 足立昭三. 1987. ワサビ栽培. 第1版. 1-199. 秀潤社, 東京.
- Alokam, S., Chinnappa, C. C., Reid and D. M. 2002. Red/far-red light mediated stem elongation and anthocyanin accumulation in *Stellaria longipes*: differential response of alpine and prairie ecotypes. *Can. J. Bot.*. 80: 72-81.
- 青葉高. 1972. 発芽期の生理, 生態. 農業技術体系野菜編7, ツケナ類, 基礎編. 21-22. 農山漁村文化協会, 東京.
- 青葉高. 1975. 発芽期の生理, 生態. 農業技術体系野菜編9, カブ, 基礎編. 21. 農山漁村文化協会, 東京.
- 青木幸代. 2009. 伊豆天城地方におけるワサビ栽培の地域的展開. 地理空間. 2: 17-31.
- 荒川博, 伊奈健宏, 松浦英之, 大場聖司, 種石始弘, 中根健. 2001. ワサビ品種・系統における辛味成分含量とその部位別分布. 静岡県農業試験場報告. 46: 35-43.
- 馬場富二夫. 2015. ワサビ新品種「静系18号」の育成. 特産種苗. 20: 53-55.
- 馬場富二夫, 伊奈健宏, 杉山泰昭. ワサビ新品種「伊づま」の育成. 2016. あたらしい農業技術. 612: 1-10.
- 馬場富二夫, 久松奨, 稲葉善太郎. 2018. 開花からの温度条件がワサビ胚の成熟に及ぼす影響. 園芸学研究. 17(別2): 488.
- Castellano, S., Scarascia Mugnozza, G. S., Russo, G., Briassoulis, D., Mistriotis, A., Hemming, S. and Waaijberg, D. 2008. Plastic nets in agriculture: A general review of types and applications. *Appl. Eng. Agric.*. 24: 799-808.
- 張菡, 橋永文男. 1997. 野菜種子の発芽および初期生長に対する高圧電場処理の影響. 園芸学会雑誌. 66: 347-352.
- Engelen-Eigles, G., Holden, G., Cohen, J. D. and Gardner, G. 2006. The Effect of Temperature, Photoperiod, and Light Quality on Glucosinolate Concentration in Watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54(2): 328-334.
- ETOH, H., NISHIMURA, A., TAKASAWA, R., YAGI, A. SAITO, K., SAKATA, K., KISHIMA, I. and INA, K. 1990. ω -Methylsulfinylalkyl Isothiocyanates in Wasabi, *Wasabia japonica* Matsum. *Agricultural and Biological Chemistry*. 54(6): 1587-1589.
- 藤原隆宏, 吉岡宏, 四方久, 佐藤文生. 1998. 全自動機械定植におけるキャベツセル成型苗の定植適期の総合評価. 農作業研究. 33: 73-79.
- 福岡信之, 吉岡宏, 清水恵美子, 藤原隆宏. 2001. キャベツセル成型苗の苗齢の進行に伴う根の生理的变化. 石川県農業総合研究センター研究報告. 23: 15-20.
- Goi, H., Inoue, S. and Iwanami, Y. 1985. Antifungal activity of powdery black mustard, powdery wasabi (Japanese Horseradish) and allyl isothiocyanate by gaseous contact. *J. Antibact. Antifung. Agents*. 13: 199-204.
- Gonai, T., Kawahara, S., Tougou, M., Satoh, S., Hashiba, T., Hirai, N., Kawaide, H., Kamiya, Y. and Yoshioka, T. 2004. Abscisic acid in the thermoinhibition of lettuce seed germination and enhancement of its catabolism by gibberellin. *J. Exp. Bot.*. 55: 111-118.
- Haga, N., Kobayashi, M., Michiki, N., Takano, T., Baba, F., Kobayashi, K., Ohyanagi, H., Ohgane, J., Yano, K. and Yamane, K. 2019. Complete chloroplast genome sequence and phylogenetic analysis of wasabi (*Eutrema japonicum*) and its relatives. *Scientific Reports*. 9: 14377.
- 羽賀夏子, 馬場富二夫, 久松奨, 高島茂雄, 山根京子. 2019. 日本のワサビ属植物における葉緑体DNAの種内変異と辛味成分前駆体グルコシノレート組成の多様性. 育種学研究. 21 別1: 93.
- 原正和, 久保井徹, 衛藤英男. 2003. アブラナ科作物における二次代謝の制御. *FFI JOURNAL*. 208: 594-600.
- 春木和久, 山田員人. 1993. 不定胚培養系によるワサビ

- のクローン増殖. 島根県農業試験場研究報告. 27: 19-40.
- 橋本敏一, 松野裕, 八丁信正, 河内香織. 2013. 養液栽培法と自然栽培法ワサビの生育の比較. 近畿大学農学部紀要. 46: 73-80.
- 濱田和俊, 島崎一彦, 西村安代, 江川晴香, 吉田勝平. 2009. 赤色波長変換フィルムが着生シンビジウム (*Cymbidium finlaysonianum* Lindl.) のプロトコーム様球体(PLB)の増殖および器官形成に及ぼす影響. 農業生産技術管理学会誌. 16(2-3): 69-75.
- 浜本浩, 山崎敬亮, 吉田祐子, 安部順一郎. 2011. 紫外線・赤色光質変換フィルムと紫外線カットフィルムの光学的特性および葉菜類の生育に及ぼす影響の経年変化. 近畿中国四国農業研究センター研究報告. 10: 1-12.
- Hassan, M., 藤目幸廣, 奥田延幸, 松井年行, 鈴木晴雄. NFT によるワサビの生育に及ぼす養液温度の影響. 2001. 香川大学農学部学術報告. 53: 13-18.
- 林満. 1977. 稲種子の休眠性および発芽性に関する研究. 熱帯農業. 20(3): 164-171.
- 久松奨, 稲葉善太郎, 馬場富二夫. 2019. LED 光源におけるワサビの生育反応. 日本生物環境工学会 2019 年千葉大会講演要旨. 178-179.
- 久松奨, 稲葉善太郎, 馬場富二夫. 2020. 静岡水わさびの伝統栽培における定植苗の需給状況. 園芸学研究. 19 別 1: 313.
- 日高輝雄, 重藤祐司. 2018. ワサビ超促成栽培における保温開始時期が生育および収量に及ぼす影響(第3報). 園芸学研究. 17(別 2): 490.
- Hoang, N. N., 2017a. Development of a stable and low-cost system for wasabi nursery plants production with photoautotrophic micropropagation. 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科学学位論文.
- Hoang, N. N., Shibuya, T., Endo, R. and Kiyaya, Y. 2017b. Growth Responses of Wasabi Plants under Different Temperature Regimes During Photoautotrophic Micropropagation. *Eco-Engineering*. 29(4). 125-129.
- 市川健, 戸田幹彦. 1992. ワサビ発根培養における植物の支持体. 静岡県農業試験場研究報告. 37: 85-93.
- 市川健. 1994. ワサビ組織培養苗の増殖における分割継代方法と作業能率. 静岡県農業試験場研究報告. 39: 57-64.
- Ina, K., Ina, H., Ueda, M., Yagi, A. and Kishima, I. 1989. ω -Methylthioalkyl Isothiocyanates in Wasabi. *Agricultural and Biological Chemistry*. 56(2): 537-538.
- 伊奈健宏. 1998. 水温および気温がワサビの生育に与える影響. 静岡県農業試験場研究報告. 43: 33-45.
- 伊奈健宏. 2002. 光条件とワサビの生育. 静岡県農業試験場研究報告. 47: 25-33.
- 伊奈健宏, 杉山泰昭, 馬場富二夫. 2017. 伊づま. 品種登録 26271.
- 伊奈健宏, 飯山俊男. 2003. 隔離ベッドを用いたワサビの新しい栽培法. 静岡県農業試験場研究報告. 48: 35-46.
- 稲葉善太郎, 久松奨, 馬場富二夫, 西島卓也. 2018. 静岡県の施設園芸生産者における実生系ワサビ苗の生産実態. 園芸学研究. 17 別 1: 138.
- Inoue, S., Goi, H., Miyauchi, K., Muraki, S., Ogihara, M. and Iwanami, Y. 1983. Inhibitory effect of volatile constituents of plants on the proliferation of bacteria. *J. Antibact. Antifung. Agents*. 11: 609-615.
- 石上清, 高橋和彦, 山田金一, 小西茂毅. 1981. 園芸作物の品質と土壌環境に関する研究(第4報) ワサビによるイオウの吸収・移行および同化について. 静岡県農業試験場研究報告. 26: 67-76.
- 岩間誠造. 1972. 発芽生理. キャベツ基礎編. 農業技術体系野菜編 7. 13-17. 農山漁村文化協会, 東京.
- Jennings, P. R., Jesus Jr, J. De. 1964. Effect of Heat on Breaking Seed Dormancy in Rice. *Crop Science*. 4: 530-533.
- 禿泰雄, 遠山隆文, 岡部勝美. 2003. 新機能の光質選択性被覆資材. 植物の生長調節. 38(1). 132-138.
- 川岸舜朗. 1995. イソチオシアネートとそのガン予防効果. 大澤俊彦編, がん予防食品の開発第1版. 110-117. シーエムシー, 東京.
- 川上直人. 2005. 種子の休眠・発芽と温度—発芽調節メカニズムの解明を目指して. 日本緑化工学会誌. 30(3): 514-517
- 川上直人. 2021. 種子休眠・発芽の生理とメカニズム. 牧草と園芸. 69(4): 1-6.
- Kim, H. and You, Y. 2013. Effects of Red, Blue, White, and Far-red LED Source on Growth Responses of *Wasabia japonica* Seedlings in Plant Factory. *Horticultural Science and Technology*. 31(4): 415-422.
- 木苗直秀, 小嶋操, 古郡三千代. 2006. ワサビのすべて. 1-203. 学会出版センター, 東京.
- 幸田浩俊. 1996. 種子の発芽. ハクサイ基礎編. 農業技

- 術体系野菜編 7. 13. 農山漁村文化協会, 東京.
- 小寺孝治. 1996. セル成型苗移植栽培. キャベツ基礎編. 農業技術体系野菜編 7. 117-134. 農山漁村文化協会, 東京.
- Kubota, S., Yamato, T., Hisamatsu, T., Esaki, S., Oi, R., Roh, M. and Koshioka, M. 2000. Effects of red- and far red-rich spectral treatments and diurnal temperature alternation on the growth and development of *Petunia*. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 69: 403-409.
- KUBO, H., YOSHIDA, K. and NOZUE, M. 2011. Cloning of a FLOWERING LOCUS T Ortholog in *Wasabia japonica* (Matsum). *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. 75 (9): 1823-1825.
- 倉谷幸作. 2005. ワサビの種子貯蔵試験. 奈良県森林技術センター研究報告. 34:29-31.
- 桑田訓也. 2014. 木簡に見える香辛料. 平成 25 年度山崎香辛料財団研究助成成果報告. 香辛料利用からみた古代日本の食文化の生成に関する研究. 独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所. 31-35.
- Liu, Yinggao., Nenghui, Ye., Rui, Liu., Moxian, Chen. and Jianhua, Zhang. 2010. H₂O₂ mediates the regulation of ABA catabolism and GA biosynthesis in *Arabidopsis* seed dormancy and germination. *J. Exp. Bot.* 61: 2979-2990.
- 松田健太郎, 西島卓也, 杉山泰昭, 古木孝典, 佐々木大介, 西東力. 2018. ワサビクダアザミウマ *Liothrips wasabiae* Haga & Okajima の中部地方からの新分布記録. 昆虫 (ニューシリーズ). 21(1): 103-105.
- Matsuda, K., Sasaki, D., Haga, H., Nishijima, T., Hagiwara, Y. and Kasai, A. 2020. Evaluation of host plant suitability and efficacy of chemical and biological insecticides and insect nets for controlling *Liothrips wasabiae* (Thysanoptera:Phlaeothripidae). *Applied Entomology and Zoology*. 55: 309-317.
- 松田健太郎, 佐々木大介, 芳賀一, 萩原優花, 笠井敦. 2021. ワサビクダアザミウマの寄主適合性と水ワサビ圃場における防除法. 植物防疫. 75(2): 87-90.
- Millar, A. A., Jacobsen, J. V., Ross, J. J., Helliwell, C. A., Poole, A. T., Scofield, G., Reid, J. B. and Guble, F. 2006. Seed dormancy and ABA metabolism in *Arabidopsis* and barley. *The Plant Journal*. 45: 942-954.
- 三浦周行. 1998. 種子の発芽と処理. レタス・サラダナ基礎編. 農業技術体系野菜編 6. 135-142. 農山漁村文化協会, 東京.
- 村上睦朗. 松本正雄. 1983. 発芽の生理. ダイコン基礎編. 農業技術体系野菜編 9. 17-20. 農山漁村文化協会, 東京.
- Murakami, K., Horaguchi, K., Morita, M. and Aiga, I. 1991. Growth control of the sunflower (*Helianthus annuus* L. cv. Russian Mammoth) seedling by additional far-red irradiation. *Environ. Control Biol.* 29: 73-79.
- Murakami, K., Fukuoka, N. and Noto, S. 2017. Improvement of greenhouse microenvironment and sweetness of melon (*Cucumis melo* L.) fruits by greenhouse shading with a new kind of near-infrared ray-cutting net in mid-summer. *Scientia Horticulturae*. 218: 1-7.
- 長田昂己, オグントインボ・ボラジ, 柳橋秀幸, 定村健太, 田坂洋司, 坂實, 平間淳司. 2016. 屋台型 SPA システムによるワサビ水耕栽培の生育状況. 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会講演要旨. 86-87.
- 内藤文男, 宍戸良洋. 2008. 被覆資材の特性と利用・取扱い. 農業技術体系第 12 巻. 共通技術・先端技術. 施設・資材. 13-36 の 2. 農山漁村文化協会, 東京.
- 中村新一, 伊奈健宏. 1997. ワサビ組織培養苗の効率的な増殖方法. 静岡県農業試験場研究報告. 42: 31-37.
- 中村俊一郎. 1985. 農林種子学総論. 1-280. 養賢堂, 東京.
- 中村俊一郎. 1990a. ワサビ種子の発芽に関する研究. 園芸学会雑誌. 59: 573-577.
- 中村俊一郎. 1990b. ワサビ種子の貯蔵に関する研究. 園芸学会雑誌. 59: 579-587.
- 中野敬之, 太田光輝, 本間義之, 戸田幹彦. 1990. ワサビ種子の登熟特性と乾燥種子の保存. 静岡県農業試験場研究報告. 35: 1-8.
- Nishizawa T, Saito K. 1998. Effect of rooting volume restriction on the growth and carbohydrate concentration in tomato plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 123: 581-585.
- 西島卓也. 2011. パイプ栽培ワサビにおける石灰質資材施用による根こぶ病の発生軽減. 静岡県農林技術研究所 成果写真集. <http://www.agri-exp.pref.shizuoka.jp/photo00018.html>.
- 西島卓也. 2014. 沢ワサビ根こぶ病の発生生態の解明と防除方法の開発. 静岡県農林技術研究所ニュース. 25. <https://www.agri-exp.pref.shizuoka.jp/news00019.html>

- tml.
- 西島卓也. 2015. ワサビ栽培における病害虫対策. 特産種苗. 20: 59-63.
- 新田明彦. 養液栽培によるワサビ苗の周年生産. 1991. あたらしい農業技術. 206: 1-17.
- 野末雅之, 久保浩義. 2015. 植物工場におけるワサビ種子周年生産のための効率的な成誘導法の確立. 科学研究費助成事業研究成果報告書. <https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT/24580367/>.
- 越智宏倫, ナラシマン・ラマラツナム, 竹内征夫, 杉山裕之. 1995. ワサビの葉, 茎, 根の抗酸化活性. 日本栄養・食糧学会誌. 48: 236-238.
- 小田雅行, 高戸淳二, 池田英男, 古川一. 2002. レタス育苗時のセル容量が定植前後における生育, 糖濃度および根の呼吸に及ぼす影響. 園芸学研究. 1(1): 27-30.
- Oguni, S., Kakibuchi, K., and Katayama, Y. 2005. Effects of Environmental Controls on the Growth of Wasabi (*Eutrema japonica* (Miq.) Koidz.) in a Nutrient Solution Cultivation System. *Environmental Control in Biology*. 43(3): 181-191.
- 大井美知男, 木村彰宏. 1994a. 休眠打破処理したワサビ種子の異なる温度条件下での発芽. 信州大学農学部紀要. 31: 63-66.
- 大井美知男, 有賀均. 1994b. ワサビ種子の登熟度と発芽の関係. 信州大学農学部紀要. 31: 67-71.
- Ohtsuru, M. and Kawatani, H. 1979. Studies on the Myrosinase from *Wasabia japonica*. *Agricultural and Biological Chemistry*. 43: 2249-2255.
- 奥田瑠梨子, 嶋津光鑑, 田中逸夫. 2010. ワサビの花芽形成に及ぼす環境要因の解明. 日本農業気象学会2009年全国大会講演要旨. 14-15.
- 大阪府立大学農学部園芸学教室編. 1986. 園芸学実験・実習. 106. 養賢堂, 東京.
- Rouphael, Y., Kyriacou, M. C., Petropoulos, S. A., De Pascale, S. and Colla, G. 2018. Improving vegetable quality in controlled environments. *Scientia Horticulturae*. 234: 275-289.
- 定村健太, オグントインボ・ボラジ, 柳橋秀幸, 田坂洋司, 長田昂己, 坂實, 平間淳司. 2016. 屋台型SPAシステムによるワサビ水耕栽培—環境変化と葉面電位の関係—. 日本生物環境工学会2016年金沢大会講演要旨. 88-89.
- 坂井崇人, 刀祢茂弘, 河村和成, 陶山紀江. 2002. 畑栽培におけるワサビの花芽発育過程と花芽分化に影響を及ぼす要因. 山口県農業試験場研究報告. 53: 41-49.
- 佐藤文生. 1997. 葉菜類セル成型苗の生理生態特性. 農業および園芸. 72: 585-592.
- Sato F, Yoshioka H, Fujiwara T. 2001. Effect of root volume restriction on growth and carbohydrate status of cabbage seedling. *Environ. Control. Biol.* 39(4): 235-243.
- 澤井祐典, 玉城盛俊. 2020. アブラナ科カラシナに含まれる遊離アミノ酸, シニグリン, アリルイソチオシアネートの遮光栽培による影響. 日本食品科学工学会誌. 67(6): 203-208.
- Shahak, Y., Gussakovsky, E. E., Gal, E. and Ganelevin, R. 2004. ColorNets: crop protection and light-quality manipulation in one technology. *Acta Hort.* 659: 143-151.
- 清水茂監修. 1985. ワサビ. 野菜園芸大事典 19 巻直根類. 訂正追補第3版. 野菜園芸大事典編集委員会編. 1110-1113. 養賢堂, 東京.
- 下山真人, 溝田洋子, 高橋真一, 野末雅之, 野末はつみ, 岡本千晶. 2019. 人工栽培施設におけるワサビ常溫栽培. 日本生物環境工学会 2019 年千葉大会講演要旨. 96-97.
- 白土宏之. 2012. 育苗器を利用した水稻種子の休眠打破法. 東北農業研究センターたより. 38: 5.
- 静岡県農業試験場わさび分場. 1974. 種子の休眠性に関する試験. 昭和 48 年度ワサビに関する試験成績書. 29-35.
- 静岡県経済産業部農業局農芸振興課編集. 2018. 静岡県野菜園芸の生産と流通, 野菜白書・わさび白書. 85. 静岡.
- Son, K.-H., and Oh, M.-M. 2013. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. *Hortscience*. 48: 988-995.
- 曾根良輔, 渡邊風斗, 久松奨, 鈴木克己, 切岩祥和. 2019. ワサビ種子における適切なブライミング処理方法の検討. 園芸学研究. 18別2: 407.
- Sultana, T., Savage, G. P., McNeil, N. G., Martin, R.J., Deo, B. 2002. Effects of fertilisation on the allyl isothiocyanate profile of above-ground tissues of New Zealand-grown wasabi. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 82(13): 1477-1482.
- 田淵俊人. 2009. 園芸作物の形態. 金浜耕基編著, 園芸学. 47-70. 文永堂, 東京.

- 竹川昌宏, 大和陽一, 濱野恵, 山崎博子, 三浦周行. 2004. 根鉢形成にともなうキャベツとチンゲンサイセル苗の定植後の生長遅延. 園芸学会雑誌. 73(1): 79-81.
- 竹内純, 竹内浩二, 鍵和田聡, 西村修一, 渡辺建司, 堀江博道. 2008. 東京都奥多摩地域のワサビ栽培における病害の発生状況. 関東東山病害虫研究会報. 55: 39-44.
- Tamura, N., Toh, S., Lepiniec, L. and Kawakami, N. 2004. Characterization of high temperature resistant germination mutant of *Arabidopsis*. 3rd International Symposium on Plant Dormancy, Wageningen, The Netherlands.
- 田中弘太, 芳賀一, 西島卓也. 2014. ワサビを加害する水生昆虫の発生生態と防除対策. 静岡県農林技術研究所. あたらしい農業技術. 587: 1-13.
- 田中逸夫, 舟橋芳仁, 嶋津光鑑. 2008. ワサビの人工光栽培に関する研究. 植物環境工学. 20(3): 119-124.
- 田中逸夫, 伊藤佳洋, 篠塚真理, 嶋津光鑑. 2009. ワサビの室内人工光栽培に関する研究—気温および養液温度が生育に及ぼす影響—. 植物環境工学. 21(4): 175-178.
- 田中逸夫. 2015. 人工光を用いたワサビの室内水耕栽培における環境制御と採算性評価. 特産種苗. 20: 64-67.
- 田中進, 古江寿和. 2005. ワサビのセル成型育苗法. 近畿中国四国農業研究成果情報 (府県試験研究機関および近畿中国四国農業研究センター分), 野菜推進部会, 技術, 普及に移しうる成果 (普及). 259-260.
- 種五勇氣, 久保勇人, 岡本千晶, 野末はつみ, 野末雅之. 2016. ワサビ植物の光阻害に対する遠赤色光の影響. 日本生物環境工学会 2016 年金沢大会講演要旨. 90-91.
- 達山和紀, 江川宏, 山本広基, 久保田博之, 古庄伸平. 1983. ワサビ種子の休眠打破と施設による育苗. 農村開発. 12: 15-19.
- Toh, S., Yoshida, T., Imamura, A., Nakabayashi, K., Okamoto, M., Hanada, A., Yamaguchi, S., Kamiya, Y., Nambara, E. and Kawakami, N. 2004. Expression of ABA and GA related genes in thermoinhibited *Arabidopsis* seeds. 3rd International Symposium on Plant Dormancy, Wageningen, The Netherlands.
- 徳増智, 加藤正弘, 矢野文香. 1975. アブラナ属作物種子の休眠覚醒に及ぼす貯蔵湿度の影響. 育種学雑誌. 25(4): 197-202.
- 徳増智, 亀井聡, 加藤正弘. 1981a. アブラナ属作物種子の発芽率に及ぼす貯蔵湿度と発芽温度との関係. 育種学雑誌. 31: 109-120.
- 徳増智, 柿原文香, 加藤正弘. 1981b. アブラナ科作物種子の乾燥貯蔵及び莢中保存による休眠の変化. 園芸学会雑誌. 50: 208-214.
- 徳増智, 金田泉, 加藤正弘. 1985. カラシナ及びアビシニアカラシ種子の休眠の変化とアシルカラシ油含量の推移. 園芸学会雑誌. 54: 75-81.
- Tokumasu, S., Kanada, I. and Kato, M. 1985. Germination behaviour of seeds as affected by different temperatures in some species of *Brassica*. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*. 54: 364-370.
- Toyomasu, T., Yamane, H., Murofushi, N. and Inoue, Y. 1994. Effects of exogenously applied gibberellin and red light on the endogenous levels of abscisic acid in photoblastic lettuce seeds. *Plant and Cell Physiology*, 35: 127-129.
- Tsangrassoulis, A. 2001. Short-wave radiation. In Energy and climate in the urban built environment (edited by Santamouris, M.). *James and James*. London. 110-136.
- 上野良一, 中川善紀. 1973. ワサビの新品種「さんべ」、「さぶみ」、「いわみ」について. 島根県農業試験場研究報告. 11: 31-40.
- 上坂敏之, 遠藤智, 前田壮志, 古川一, 八木繁幸, 中澄博行. 2019. 青紫蛍光フィルムによるトマト果実の高リコピン化. 色材協会誌. 92(9): 253-259.
- 山本幸彦, 月時和隆. 1996. ハクサイ基礎編. 農業技術体系野菜編 7. 132. 農山漁村文化協会, 東京.
- Yamane, K., Sugiyama, Y., Lu, Y., Lu, N., Tanno, K., Kimura, E. and Yamaguchi, H. 2015. Genetic Differentiation, Molecular Phylogenetic Analysis, and Ethnobotanical Study of *Eutrema japonicum* and *E. tenue* in Japan and *E. yunnanense* in China. *The Horticulture Journal*. 85(1): 46-54.
- 山根京子. 2015. 遺伝資源としてのワサビ. 特産種苗. 20: 56-58.
- 山根京子, 加藤朋恵, 石田佳織, 羽賀夏子, 奥西勲, 小林恵子. 2019. 野生および栽培ワサビの辛味成分含有量比較. 育種学研究. 21 別 1: 94.
- 山根京子. 2020. わさびの日本史. 1-240. 文一総合出版, 東京.
- Yamauchi, Y., Ogawa, M., Kuwahara, A., Hanada, A., Kamiya, Y. and Yamaguchi, S. 2004. Activation of gibberellin biosynthesis and response pathways by

- low temperature during imbibition of *Arabidopsis thaliana* seeds. *The Plant Cell*. 16: 367-378.
- 山内雪香, 小川幹広, 桑原亜由子, 花田篤志, 神谷勇治, 山口信次郎. 2005. シロイヌナズナ種子発芽における環境要因によるジベレリンの代謝制御機構. 第46回日本植物生理学会年会講演要旨集. 33.
- 横木国臣, 上野良一. 1983. ワサビ. 65-70. 農山漁村文化協会, 東京.
- 吉田勝平, 島崎一彦, 江川晴香, 濱田和俊. 2009. 固体発光性色素を活用した農園芸用波長変換被覆資材の開発. 平成20年度国立大学法人高知大学国際・地域連携センター年報. 45-48.
- 吉田正温. 1974. ワサビ属の細胞学的研究II—ワサビ: 島根3号—. 島根大学農学部研究報告. 8: 49-50.
- Yoshioka, T., Endo, T. and Satoh, S. 1998. Restoration of seed germination at supraoptimal temperatures by fluridone, an inhibitor of abscisic acid biosynthesis. *Plant and Cell Physiology*. 39(3): 307-312.

Summary

This study was conducted on the seed-propagated wasabi [*Eutrema japonicum* (Miq.) Koidz. (syn. *Wasabia japonica* (Miq.) Matsum.)] in Shizuoka Prefecture with the aim of establishing: 1. a system for ensuring year-round mass production and supply of seedlings using new seed germination and seedling growth management techniques, and 2. a method for improving the cultivation environment in wasabi fields by using a new shading material.

1. Methods for improving seedling management to establish a system for the year-round mass production and supply of seedlings

The problems faced during the germination of wasabi seeds are: 1) the germination rate varies widely from seed to seed, 2) the germination of dry seeds is unstable, and 3) seed germination is unstable at temperatures above 20 °C. The following factors are considered to contribute to the unstable germination: 1) the difference in the degree of dormancy among seeds, 2) presence of deeper dormancy in dry seeds, and 3) insufficient break in the dormancy due to the lack of pre-sowing treatment.

In this study, it was found that 1) the germination rate increased on extending the GA₃ treatment period from 3-5 days to 10 days before seeding, and 2) the germination temperature range increased on adding a wet and chilling treatment for 10 to 15 days at 5 °C after GA₃ treatment before seeding. The germination rate at 20 °C was almost the same as that at 15 °C, the optimum temperature for germination.

In order to cover the annual shortage of 2 million seedlings in the Shizuoka Prefecture, we need to 1) mass-produce seedlings with high multiplication efficiency, 2) improve the production efficiency of the area under the seedling nurseries, and 3) improve the production efficiency during the operational period of the nurseries.

To address the above problems, we compared seedlings grown in conventional conditions (cell size: 72 cells, seedling growth period: 4 months after transplanting into cell trays) with seedlings grown under conditions of reduced cell sizes and growth periods (cell size: 128 and 200 cells; seedling growth period: 2 and 3 months after transplanting into cell trays). The results showed that: 1) there was no difference in the active seedling taking root rate after planting in the wasabi field; and 2) there was no difference in the rhizome size, one year after planting. This indicated that the productivity of wasabi did not decrease with the reduction in the cell size and the shortening of the growth period.

In the Shizuoka Prefecture, the seedling production is conventionally limited to the lowland areas, and the seedling season is from mid-October to late-June of the following year. The number of seedling crops raised per year is one time, which limits the timing of seedling supply. To achieve a larger annual production and supply of seedlings, it is necessary to 1) stabilize the seed germination during the high-temperature summer season and 2) increase the times of raising seedling per year to achieve the supply needed for planting in the fall.

In this study, the following seedling management techniques were identified: 1) improvement in the pre-seeding seed treatment method to increase the germination rate, and expansion of the germination temperature range; and 2) shortening of the seedling growth period after transplanting into cell trays to enable the mass production of seedlings.

The expansion of the germination temperature range would lead to an expansion in the area under seedling production in the Shizuoka Prefecture, from the customary lowland areas to the new cool highland areas, and the annual seedling turnover rate would be increased by the shortening of the seedling growth period. The seedling-raising season in the lowland areas is from mid-October to late-June of the following year, and thus, the annual times of raising seedling would increase two to threefold. In the cool highland

areas, the seedling growing season is from early-March to late-October, which straddles the summer high-temperature period, allowing a stable supply of seedlings for fall planting and increasing the annual times of raising seedling plantation by twofold.

Therefore, establishing this new system would enable year-round mass production and supply of seedlings to cover the shortage of 2 million seedlings for planting, and ensure a more stable and systematic production of wasabi.

2. A method for improving the growth environment in the wasabi fields using a new shading material

In wasabi cultivation, shading nets are stretched over the wasabi fields during the hot summer season to block the direct sunlight and prevent the temperature from rising. However, there are two problems with the growth of wasabi: 1) the appropriate amount of transmitted solar radiation is unknown, and 2) the effect of quality of light on the transmitted light is unknown; therefore, productivity needs to be improved by selection of appropriate shading rate and color of shading material.

In this study, four types of shading nets were compared: a conventional black net [22% photosynthetic active radiation (PAR) transmittance], a white net (64% PAR transmittance, with near-infrared shading), a red net (42% PAR transmittance), and a blue net (42% PAR transmittance). The results showed that 1) the white net allowed the highest amount of transmitted light, the wavelength composition of the transmitted light was similar to sunlight, and the rhizome weight was recorded the highest under it; 2) the quality of transmitted light did not affect the isothiocyanate content of the rhizomes; and 3) the white net transmitted abundant PAR while shading near-infrared light, thus, effectively suppressing the temperature increase.

These results suggest that the use of white net is effective in suppressing the increase in the temperature of the wasabi plants while allowing a greater abundance of PAR to reach the plant body than is conventionally the case, thus promoting the growth of wasabi and increasing its production.

The introduction of a new shading material for wasabi cultivation during the high-temperature summer season: a white polyethylene net mixed with white pigment and an anti-thermal agent, would increase the growth of wasabi by effectively shading the near-infrared rays and preventing a rise in the plant body temperature. It also would increase the amount of PAR reaching the plant body, thereby promoting photosynthesis.

3. Conclusion

The new seedling cultivation system and shading management technology proposed in this study would lead to a drastic improvement in the management of wasabi cultivation. Simple modifications to the conventional management methods can help increase the productivity significantly, and prove to be highly effective in its introduction to production sites, enabling year-round plantation and stable production of wasabi.