

高品質トマト人工光育苗装置

High-Quality Tomato Seedling Production System Using Artificial Light

三須 英幸*
Hideyuki Misu

森 正樹
Masaki Mori

奥村 宗一郎
Souichirou Okumura

金澤 進一
Shin-ichi Kanazawa

池口 直樹
Naoki Ikeguchi

中井 龍資
Ryusuke Nakai

高品質なトマト大苗を育成する装置を開発した。大苗とは、収穫までの栽培期間を短縮するため、圃場に定植して栽培を開始する前にできるだけ生育を進めた苗である。閉鎖空間中、人工光下で大苗を育成することにより、病虫害リスクの少ない無農薬の育苗が可能となるが、トマト苗では、人工光下で育成すると生理障害が発生しやすく、十分な期間の育成はできなかった。本装置では、光波長の最適化など育成環境の改善により、生理障害の発生を抑制するとともに均一な大苗を育成することに成功した。本稿では、本装置の特長である生理障害抑制の抑制技術と苗の均一性に重要な気流制御技術について紹介する。(なお本研究は千葉大学との共同研究の中で実施されたものである)

We have developed a closed system for growing tomato seedlings using LEDs as the main light source. Although closed production systems reduce the risk of pest infection without using pesticides, tomato seedlings grown under artificial light for a long time are subject to physiological disorders. Our production system suppresses this problem and grows uniformly large seedlings, thereby shortening the cultivation period between seeding and harvesting. This paper describes how the system suppresses physiological disorders, while controlling air flow for uniform growth. (This research was conducted in collaboration with Chiba University.)

キーワード：人工光環境、育苗、トマト、生理障害、養液栽培

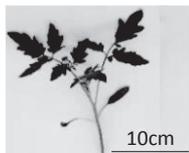
1. 緒言

我が国の農業人口が大幅に減少し高齢化が著しく進む中、国内の食料安定供給を確保し、さらに今後増加が期待される国外での食産業市場に参入していくためには、農業者の所得をあげ意欲ある新規就農者を増加させる必要がある。我々は新しく改良した底面給水型砂栽培装置（ニューサンドボニックス）で、人気の高い糖度6以上のトマトを千平米あたり22トン/年栽培できる技術を開発⁽¹⁾した。この品質・収量であれば、夫婦で経営可能とされる1haの栽培で、売上約8千万円/年、利益約1~2千万円/年が得られる可能性がある。このモデルを実現するためには、圃場

への定植後約1ヶ月に収穫できる大苗が安定的に供給されることが必要であるが、現状では、発芽後3週間程度の小苗を購入し、圃場でさらに2-3週間ほど栽培して大苗（写真1）を作るしかなく、圃場面積がその分減少する他、栽培コストがかかる問題があった。また圃場では病虫害にさらされ、定植時にはすでに罹患している場合もある（表1）。我々はこの問題に対処するため、病虫害から独立した人工光環境で、発芽から大苗まで育てる技術を開発したので報告する。

表1 育苗環境ごとの利点・課題点

	太陽光利用温室	人工環境施設	
		既存装置	当社育苗装置
メリット	<ul style="list-style-type: none"> ・設備費が安い ・ランニングコストが安い 	<ul style="list-style-type: none"> ・病虫害リスクが低い ・無農薬 ・品質の均一化が容易 	<ul style="list-style-type: none"> ・病虫害リスクが低い ・無農薬 ・品質の均一化が容易 ・大苗まで生産可能
デメリット・課題	<ul style="list-style-type: none"> ・品質の均一化が困難 ・病虫害リスクが高い ・2次育苗のための栽培圃場が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期費用が高い ・生産数に限りがある ・小苗にのみ対応 ・生理障害が発生する可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期費用が高い ・生産数に限りがある



一般的な小苗



当社大苗

写真1 一般的な小苗（左）と当社が生産する大苗（右）

2. 通常の高糖度トマト栽培方法と要求される大苗のコスト

トマトは、定植後、1段（花房）、2段（花房）と花を付け着果する。日本国内で好まれる高糖度トマトは、栽培中にストレスを加えるため、3から4段以上になると収量が著しく落ちるため、面積あたりできるだけ多くの苗を定植し、低段で栽培を終了する低段密植という方法をとるのが一般的である。例えば3段までの低段密植の場合、購入可能な小苗を圃場に定植すると約8週間後に収穫が始まり14週間後に栽培が終了し、栽培後の培地などの手当の後15週間後に再度小苗を定植する。このため、一年間に3.5回の定植から収穫（これを一作と言う）が行われ、3段/作×4作=12段のトマトが年間で収穫される。1段あたり500g（3-4個）のトマトが取れると、一般的に定植密度は4000株/千m²であるので、20トン/千m²の収穫が期待できる。もし大苗が入手可能であれば、定植後6週間で収穫が始まり、13週間後には次の苗が定植できる。その時収量は、500g/段×3段×52週/13週×4000株/千m²=24トン/千m²となる。トマトの平均的卸売り価格は350円/kgで、大苗を使うことにより、135万円/年もの売上増になる。必要な苗の数は4000×52/13=16千本なので、大苗のコストが小苗コスト+50円/苗であれば56万円/年/千m²の利益増となる。

3. 人工光による育苗の問題点

人工光下でのトマト大苗の育成における大きな課題は、育苗中の葉に生理障害が発生することであった。生理障害は播種15日後程度から発生し、**写真2**に示すように初期では葉の表面や葉脈にこぶ状のカルスが生じ、進行すると葉全体が壊死し、最終的には株が枯死に至る。この生理障害は、太陽光利用温室ではほとんど発生しないが、人工環境施設で発生しやすく、さらに、トマトの品種により生理障害の発生しやすさが異なることがわかっている⁽²⁾。栽培期間中に重要となる耐病性が高いことから我々が注目してい

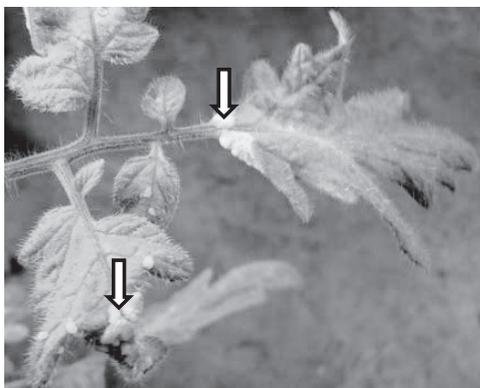


写真2 人工環境で育成したトマト苗で発生する生理障害（カルス）

た品種においては比較的発生しやすく、大苗完成までに下位葉が複数枚落葉した。

一方で、苗の均一性も重要な課題である。閉鎖環境で育成する苗は、開放環境に比べて資源消費量が少なく花の分化節位などの品質が安定し⁽³⁾、病虫害汚染リスクが少なく無農薬で済む⁽⁴⁾などのメリットがある。一方、イニシャルコストが高くなるというデメリットがあり、できるだけ植栽密度を上げることが求められる。植栽密度を上げると風の当たり方などに不均一ができ、大苗育苗のように栽培期間が長い場合は特に苗の草丈にバラツキがでてしまう。草丈に大きく影響する要因は2つあり、風環境と光環境である。光環境は大苗完成時の葉面積指数（Leaf area index：LAI）を踏まえて照射強度を調節⁽⁵⁾し、反射板や光源の設置位置により比較的容易に好適環境に合わせることができる。ところが、栽培空間全体を、風速を好適環境とされる0.3~1.0m/s±0.1 m/s以内抑えることは困難であった。

4. 発生する生理障害への対策

千葉大学内に設置した12m²の環境制御可能な閉鎖型装置で、基礎検討を行ったところ、生理障害は下記の環境条件で発生することがわかった。

- (1) 湿度85%以上の高湿度環境が継続する環境
- (2) CO₂濃度が1000ppm付近の環境
- (3) 主光源に蛍光灯やLEDを使用した環境

上記の環境要因に対し対策を行ったので説明する。

4-1 高湿度環境の改善

高湿度の環境に曝されると葉にこぶ状の生理障害が発生することは、耐病性の高い土台となる品種と食味の良い果実をつける品種の異なる個体を1つの個体として栽培する技術である接ぎ木の作業工程でも起こると報告されている⁽⁶⁾。トマト苗では、明期である昼と暗期である夜の設定温度を数度変えて育成するのが一般的な手法である。我々の人工環境下での実験でも、実験装置内に空調機を設置し温度をコントロールした。明期と暗期の切り替え時から暗期にかけて実験装置内の湿度が上昇し、暗期中は100%の湿度環境が継続していた。植物からの蒸散量は暗期より明期でおよそ10倍程度多いが、暗期でも常にある程度の除湿能力が空調機器に求められる。単一の空調機器によるコントロールでは、明期は光源点灯時の熱を除去する時に同時に除湿され湿度が下がるが、暗期では光源の発熱がなくなるため、除湿する速度が落ち、除湿速度より苗からの蒸散速度が上回り高湿度となる（**図1**）。そこで、除湿専用の機器を設置し、育苗中に湿度環境を60~80%の範囲で維持する設定とした（**図2**）。これによる設備コストの増加は、装置全体の1%であり、十分に許容できる範囲であると考えられる。

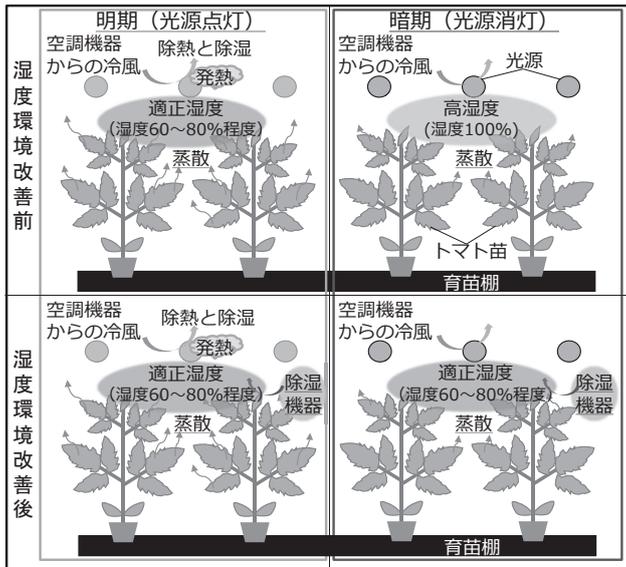


図1 装置内の湿度環境の模式図

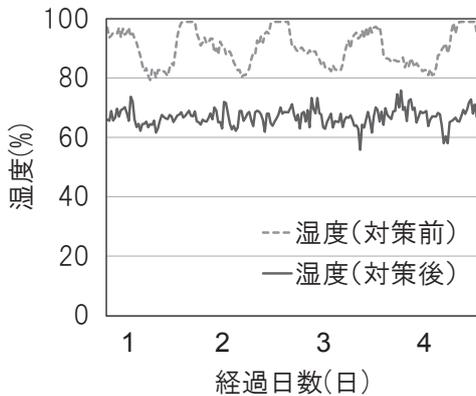


図2 環境改善後の実際の装置内湿度推移

対策前環境での育苗試験では、生理障害の発生程度が低く重症化しにくい品種において63%の個体で下位葉に生理障害を確認したが、対策後は生理障害の発生は2%であった。

4-2 高濃度CO₂環境の改善

人工環境下では生育速度を高めるためにCO₂濃度を1000ppm程度に高めることが多い。しかしながら、1200ppm以上の高濃度CO₂環境では植物種類によっては生理障害が発生することが報告されている⁽⁷⁾。長期間の栽培において、葉の葉緑素が減少し黄白化するクロロシスや、組織の一部が変色・枯死するネクロシスが発生する場合がある。トマトにおいては、光環境でその上限が異なり、一般的には晴天時で1000~1500ppm、曇天時で500~1000ppmとされている。

これまでの育苗試験では、CO₂濃度を1000ppmに設定

していたために、上述の事例と同様に生育速度過剰によって生理障害が発生していた可能性があった。そこで、CO₂濃度の設定値を大気と同等の400~500ppmに設定した。本環境での育苗試験の結果、生理障害の発生程度が中程度の品種では100%、発生程度が高い品種では70%生理障害の発生を抑制し、発生の程度も軽微であった。高濃度CO₂環境での育成に対して本環境での育成では、苗の生長量を示す地上部乾物重は21%低下するが生理障害の発生リスクを考慮すると許容範囲であると判断できる。

4-3 生理障害の抑制に有効な光質

LEDを使用した育苗でも遠赤色光の使用により、同様な生理障害を抑制した報告⁽⁸⁾があり、光質の調整により抑制できる可能性が高いと考えられる。我々の知見では白色蛍光灯と白色LEDの間において生理障害の発生程度に差があり、LEDの方が蛍光灯に比べて発生割合が高く、重症化しやすいことがわかっている。LEDは紫外線を全く含まないが、蛍光灯ではわずかに含むため、これが要因の1つであると推察し、主光源とするLEDに加え紫外線ランプを用いて0.5w/m²の強度の紫外線を追加照射した(図3)。なお、紫外線照射の効果をより明確にするために310nmにピークを有し波長域が狭い紫外線ランプ(図4)を選定し試験を行った。

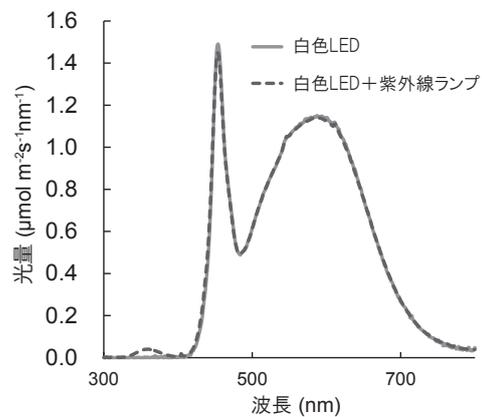


図3 紫外線ランプ追加試験時の照射光量

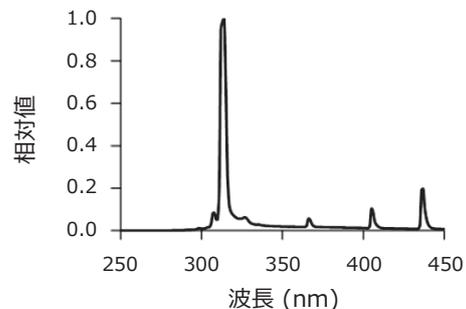


図4 紫外線ランプ波長

LEDを主光源とし紫外線を追加照射すると、紫外線照射なしの試験区と比較し、生理障害の発生を84%抑制できた。育成中に紫外線の照射を中断した場合、中断処理の5日後に生理障害の発生を確認したことから、少なくとも、育成期間中の明期は継続して照射する必要があることがわかった。また、紫外線の照射強度を2倍量の1.0w/m²の強度で照射した時、0.5w/m²の照射時に比べて同程度の生理障害抑制効果を得たが、地上部乾物重が約30%減少したことから、過剰な強度の照射は生育を必要以上に抑制するため、紫外線は照射強度の調節が必要であることがわかった⁽⁹⁾。さらに、光条件を同一とし、灌水方法を植物体に常に養液が供給される水耕方式と園芸用土に一日数回養液を供給する方式の2方式を比較した結果、園芸用土を用いた場合において水耕方式よりも短い育成日数で生理障害が発生したことから、植物体内の水分状態の変動が大きいほど生理障害の発生を助長する可能性が示唆された。

植物は紫外線などの光を感知するために、光を受容するタンパク質を有しており⁽¹⁰⁾、受光した光に対して様々な反応を示す。紫外線に対する反応は下記ようになる。UV-A波長域ではUV受光体の他に可視光の青色を認識する青色受容タンパク質であるフォトトロピンによる反応も一部含み、莖の間延びの抑制や、花芽の開花促進、アントシアンなどの色素の合成促進が起きる。UV-BはUV-Aより強いエネルギーであるため成長を抑制することが知られ、照射によって発生した酸化物質の除去のために、植物体内で抗酸化物質の合成の促進や葉内への紫外線透過量を減少させるために細胞壁を強化する反応を示す。

我々が照射した紫外線はUV-B波長であり、上記のような効果を示したと考えられるが、育成中に紫外線照射を中断した数日後に生理障害が発生したことから、細胞壁の強化による物理的な構造変化による障害抑制よりは、抗酸化物質の合成促進による高速育成時に発生する活性酸素種の除去能が高まったことによる生理障害の発生抑制の可能性があると考えられた。

5. 苗の均一性への対策

当社の装置では5週間トマト苗を育成し大苗にするため、育成環境のばらつきは、大苗完成時の草丈に大きく影響し品質のばらつきを生む。そこで、草丈に影響する1つの要素である風環境の改善を行った。

5-1 育成棚あたりの送風環境

シミュレーション解析によって均一性と風速を両立する送風方法を調査した。トマト苗の育成空間を通過する風速を均一化するために、実際に育成空間中の風速を測定し風の通りにくさをモデル化し、これを考慮した送風方法の検討を行った。

送風方式は大きく分けて吹き出し式と引き込み式があるが、育成空間の送風環境を均一化することを重要視し、静

流である引き込み式を採用した。引き込み式の課題に風速が弱い点があるが、コスト増となる送風ファンの追加を行わず送風量を高める方式を検討した。検討した新方式は送風ファン付近に開口部を設け、ファン付近の風の圧力損失を小さくするとともに、送風ファン1機あたりが引き込む範囲を広げることで、送風ファン付近の急激な風速の増加を防ぐことができる。これにより、送風ファンの追加をせずに好適範囲の風速維持と均一性の向上が両立できる。本手法は、筐体冷却用ファンの場合にも、省エネ効果が期待できる。さらに、送風ファンを交互に、上下に配置することで、大きな苗の育成に必要な広い育苗空間内における上下の送風環境の均一性を向上させることができた(図5)。

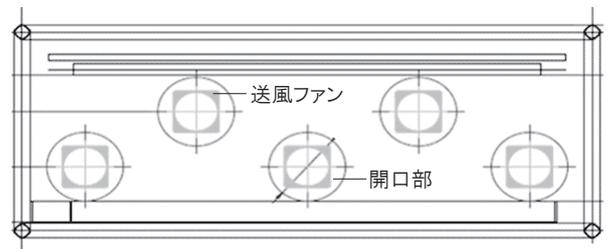


図5 育苗棚における送風ファンの配置

5-2 実用規模設備での送風環境解析

実用規模装置では、育成棚を連結してトマト苗を育成する方式を検討している。連結した育成棚においても、好適

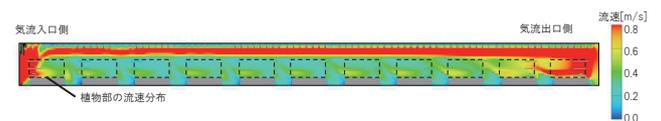


図6 連結育成棚の気流解析結果

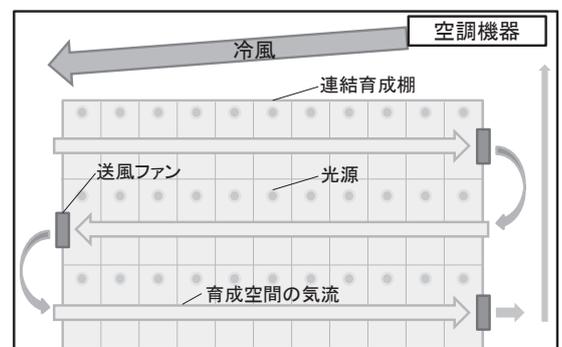


図7 装置全体の気流模式図

な送風環境を実現する必要があるため、シミュレーション解析によって送風方法を検討した。

連結した棚の育成空間の気流を均一にするため、途中には送風ファンを設けず、一方向に風を流すことが理想である。解析の結果、気流の出口側に送風ファンを設け、かつ各棚同士の密着度を上げることで、育成空間を流れる風速を好適風速内に維持できることがわかった（図6）。なお、育成棚は3段の育成空間を有しており、各段の気流を左右交互にすることで装置内全体の気流を発生させ、装置内の温度だまりの発生を防止することができる（図7）。

6. 総合施策と栽培結果

人工光型大苗育苗装置ではこれまでに述べた対策を組み合わせ、湿度を60~80%間で、CO₂濃度を400~500ppm程度に管理し、明期には主光源のLEDに加えて適量のUV-Bを照射することで、生理障害の発生程度が低いもしくは中程度の品種では100%、非常に発生しやすい品種では94%それぞれ生理障害の発生を抑制することができ、約5週間の間、人工光環境下でトマト苗育成が可能であることが明らかとなった。さらに、送風方式に上述の方式を採用することで育成棚全体の草丈の均一性を36%向上させることができた。

一般的な小苗と当社育苗装置で生産した大苗を同時に当社が開発した栽培装置であるニューサンドポニックスに定植し栽培した試験では、大苗の試験区で概ね2週間程度生育が早く、栽培終了まで生育差を維持したまま栽培でき、1作あたりの栽培期間を短縮できることが明らかになった。

7. 実用規模設備における苗生産と運用

最後に、現在我々が設計を進めている、1ha規模圃場を運営可能とする人工光型大苗育苗装置を紹介する。

本装置は、貨物船などで荷物の輸送に用いる40フィートのリーファーコンテナを利用し、内部に作物の育成棚を設けてトマト苗の育成を可能とする。コンテナ内部の育成棚は移動と連結が可能であり、育成中は連結状態を維持し、作業時には育成棚をスライドさせ作業スペースを確保する。このような構造であることから、作業時に必要なスペースを常設する場合、育成棚が8組（各3段）しか置けないのに対し、11組の棚が設置でき育苗面積が38%向上する結果、同時に約4000株の大苗の育成が可能である（図8）。

圃場に定植する苗を購入する場合、上述の通り、播種から3週間程度の小苗を利用する方法が一般的である。これは、大苗の輸送を避ける理由として、輸送時の水分管理の難しい点や輸送時の衝撃による葉の損傷などの苗の痛みのリスクが高い点、輸送コストが高い点があげられるためである。本装置を圃場近くに設置・活用することで、上記の輸送リスクを回避し、かつ小苗購入時に必要な二次育苗に



図8 実用規模の人工光型大苗育苗装置の模式図

よる圃場の一部占有がなくなるため圃場の利用効率が上がる。さらに、本装置では好適環境で育苗するため、年間を通して、播種から大苗完成まで安定して5週間で行うことができることから、圃場での栽培計画を立てやすくなる。大きな栽培圃場を細分化し、いくつかのブロックに分けて低段密植栽培を行う場合、圃場へ苗を供給する頻度が増えるため、育苗装置の回転効率を高く維持した状態で運用することができる。

本装置のコストは、中古コンテナを面積効率よく活用するため、装置コストを含む一株あたりのコストは目標の100円/苗を実現できる見込みである。また小苗用の市販の装置と較べても、同じ小苗を栽培するのであれば、装置費用を2/3程度に抑制できる可能性がある。

7. 結 言

当社の人工光型大苗育苗装置は品質の高いトマトの大苗を育成できる装置である。本装置は外環境から独立し、トマト苗の育成に必要な要素である温度、湿度、光、CO₂、培養液を、閉鎖空間内で適切に供給することにより、病虫害リスクが低く、無農薬な苗であり、さらに、トマトの品種を問わず生理障害の発生を抑制し、生長の揃いが良い大苗を生産することができる。特に本装置は、トマトの低段密植栽培を行う圃場へ定期的に苗を供給する場合、稼働効率が最も良い。

8. 謝 辞

本稿執筆にあたり、ご指導・ご助言いただきました千葉大学・丸尾教授、後藤教授、彦坂准教授ならびに古在名誉教授に深く感謝いたします。

・サンドポニックスは、住友電気工業(株)の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) SEIテクニカルレビュー第190号 (2017)
- (2) Pinkard et al, "Physiology and anatomy of lenticel-like structures on leaves of Eucalyptus nitens and Eucalyptus globulus seedlings" (2006)
- (3) 大山克己 他、「閉鎖型苗生産システムと解放型苗生産システムの夏期におけるトマトセル成型苗の品質と資源消費量の比較例」、生物環境調節 41 (1)、57-61
- (4) 古在豊樹、「人工光型植物工場」、オーム社 (2012)
- (5) 横井真悟 他、「閉鎖型苗生産システムにおけるトマト実生個体群の葉面積指数がエネルギー利用率に及ぼす影響」、植物工場学会誌、No15 (4)、231-238 (2003)
- (6) 淨閑正史、「接ぎ木時に発生するナス科植物のintumescence抑制方法」(2015)
- (7) 柘田正治 他、「蛍光灯連続光下でのピーマン結実肥大に及ぼす炭酸ガス施肥効果」、植物工場学会誌、No.12 (4)、254-260 (2000)
- (8) T. Eguchi et al, "Far-red and Blue Light Synergistically Mitigate Intumescence Injury of Tomato Plants Grown Under Ultraviolet-deficit Light Environment" (2016)
- (9) S. Hikosaka et.al. (unpublished)
- (10) 徳富哲 他、「紫外光から遠赤色光まで、多彩な植物光受容体」、生物物理55 (4) 181-186 (2015)

執 筆 者

三須 英幸* : 新領域技術研究所



森 正樹 : 新領域技術研究所



奥村宗一郎 : 解析技術研究センター



金澤 進一 : 新領域技術研究所 主幹



池口 直樹 : 新領域技術研究所 室長



中井 龍資 : 新領域技術研究所



*主執筆者