

完全人工光型植物工場で栽培するリーフレタスにおける 低硝酸品種の選定および低硝酸品種の根部特性

岡本章秀・北崎一義¹⁾・大和陽一

(2017年7月10日 受理)

要 旨

岡本章秀・北崎一義・大和陽一：完全人工光型植物工場で栽培するリーフレタスにおける低硝酸品種の選定および低硝酸品種の根部特性。農研機構報告九沖農研 67:22-34, 2018.

完全人工光型植物工場におけるリーフレタス生産に対して低硝酸品種を選定し、根部特性および硝酸イオンの吸収について標準的な硝酸イオン含量を示す品種と比較した。リーフレタス9品種の可食部の硝酸イオン含量を測定し、硝酸イオン含量が2590 mg kg⁻¹FWを示した'L-120'を低硝酸品種として選定した。液胞の浸透圧調整物質として、硝酸イオン含量は有機酸、糖および塩化物イオン含量の総和と相補的な関係にあり、'L-120'はこの値が他の8品種よりも有意に高かった。リーフレタスの根系に関して、パイプモデル理論より直径1 mm以下の根(細根)が吸収機能を担うとされた。'L-120'は細根量が標準的な硝酸イオン含量を示す'ノーチップ'に比べて有意に少なかった。栽培期間中の硝酸イオン吸収量は'L-120'が'ノーチップ'に比べて有意に少なく、硝酸イオン同化率に有意差は認められなかった。これらの結果から、低硝酸品種'L-120'では'ノーチップ'に比べ根からの硝酸イオンの吸収が限られ、その一因として少ない細根量があげられた。

キーワード：細根、品種間差、水耕、硝酸蓄積、硝酸吸収、浸透圧調整物質。

1. 緒 言

完全人工光型植物工場は、空き倉庫や空き店舗等の遊休施設を地域資源として活用できる等の特徴を備えたビジネスモデルとして期待されている(筑紫, 2009)。完全人工光型植物工場における経済生産には、植物体が小さい、生育期間が短いおよび利用部位の割合が大きいといった品目が適し(星, 2009)、多くの事業者がリーフレタスの生産に取り組んでいる(日本施設園芸協会, 2016)。リーフレタスは、光強度が弱いと植物体に硝酸イオンを蓄積しやすく、また播種から70日程度までは硝酸イオン含量が増加し、その後は減少していくとされている(BLOM-ZANDSTRA and EENINK, 1986; BLOM-ZANDSTRA and LAMPE, 1985)。完全人工光型植物

工場におけるリーフレタス生産は、人工光を光源に用いるため太陽光に比べて光強度が弱く、播種から40日前後の若い植物体を収穫することから、硝酸イオンが植物体に蓄積しやすいといえる。

硝酸イオンは人体に多量に摂取されると、亜硝酸塩やニトロソアミンなどの有害物質に変化することがある(BRUNINGFANN and KANEENE, 1993)。国際がん研究機関(IARC)は、硝酸イオンを“生体内でニトロソ化が起こる条件で、人に対しておそらく発がん性がある”物質に分類している(WORLD HEALTH ORGANIZATION AND INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 2010)。欧州連合(EU)では野菜中の硝酸イオン含量の基準値を定め、施設栽培における結球レタスを除くレタス類について4~9月は4000 mg kg⁻¹FW,

10～3月は5000 mg kg⁻¹FW以下としている (EUROPEAN COMMISSION, 2011)。本邦では食品安全委員会 (2008) が、野菜の成分中にある硝酸イオンにより人における硝酸イオンの吸収や代謝が影響を受ける可能性があるが、通常摂取する程度では人体に有害になるものではないと考えとし、野菜などの天然由来の食品について硝酸イオン含量の基準値は定められていない。しかし、完全人工光型植物工場における商品開発では、健康を気にする人向けに硝酸イオン含量が低いことを付加価値とする事例 (井熊・三輪, 2014; 辻, 2009) や、野菜の卸売販売を行う商社には糖度、ビタミンC、抗酸化力とともに硝酸イオン含量を品質評価指標とするケースがみられる (有井, 2016)。

高等植物の成長にとって、硝酸イオンは窒素源として重要な物質であり、アミノ酸に同化された後、タンパク質、核酸、ヘム、クロロフィルおよびアミン等の生体成分や二次代謝産物の合成に用いられる (大山, 1995)。根から取り込まれた硝酸イオンは、細胞質において亜硝酸イオンに還元されるが、このとき余剰分が液胞に輸送され蓄積する (小俣, 2001)。硝酸同化には根から新たに取り込まれた硝酸イオンが優先的に利用され、液胞に蓄積した硝酸イオンが再び細胞質に運ばれ還元される機会は少ないとされる (MACKOWN *et al.*, 1981)。他方、レタス類およびホウレンソウでは硝酸イオンが液胞の主要な浸透圧調整物質として溶質の濃度調整の役割を担い、同じ役割をもつ有機酸、糖および塩化物イオンとは相補的な関係にあることが示されている (BEHR and WIEBE, 1988; BLOM-ZANDSTRA and LAMPE, 1985; STEINGROVER *et al.*, 1986)。

植物体の成長を妨げずにレタス類の硝酸イオン含量を低減させる方法としては、培養液中の全窒素に対するアンモニア態窒素の割合を高めることや、LED光源を用いて青色光：赤色光比を1：4として照射することが報告されている (VAN DER BOON *et al.*, 1990; ZHOU *et al.*, 2013)。他方、硝酸イオン含量には品種間差が認められることから、低含量の品種 (以下、低硝酸品種) をスクリーニングすることが有効とされる (ESCOBAR-GUTIERREZ *et al.*, 2002; REININK and EENINK, 1988)。硝酸イオン含量の品種間差に関しては、硝酸イオン含量の高い品種が必ずしも硝酸イオン同化率が低いと

いうことではなく、品種間差は硝酸同化よりもむしろ根からの硝酸イオン吸収の差による影響が大きいと報告されている (BEHR and WIEBE, 1992; BLOM-ZANDSTRA and EENINK, 1986; BURNS *et al.*, 2011)。現在、市場規模が小さく、利益が見込めないため、民間での植物工場専用品種の開発が進められていない中では、既存品種から求められる特性に優れた品種を選定していくこととなる。本研究では硝酸イオンが蓄積しやすい完全人工光型植物工場におけるリーフレタス生産に対して、低硝酸品種を選定することおよび低硝酸品種の硝酸イオン吸収に関わる根部特性を明らかにすることを目的に以下2つの試験を行った。1) オランダで育成された品種中から、植物工場等での水耕用として選抜され、2013年に発表された「ハイドロレタスシリーズ」 (中原採種場 (株)) について可食部の硝酸イオン含量と、液胞の浸透圧調整物質として硝酸イオンと相補的な関係にある有機酸、糖および塩化物イオン含量を調査した。2) 選定した品種の根量、根の呼吸速度、根からの硝酸イオン吸収量および植物体での同化量を、養液栽培での主要品種であり、完全人工光型植物工場での生産も多く、かつ標準的な硝酸イオン含量を示す「ノーチップ」と比較した。

本試験は農林水産省「植物工場普及・拡大総合対策事業 (1) モデルハウス型植物工場実証・展示・研修事業」により整備された国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構植物工場九州実証拠点の施設で実施した。本事業で「レタスの高付加価値生産」コンソーシアムに参画された中原採種場株式会社研究開発部長諸岡 譲氏には、リーフレタス種子を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

II. 材料および方法

1. 供試材料および栽培条件

1) 硝酸イオンおよび他の浸透圧調整物質の品種間差 (試験1)

ハイドロレタスシリーズ12品種中、サラダナ2品種およびコスレタス1品種を除くリーフレタス9品種を供試した。試験は農研機構植物工場九州実証拠点 (福岡県久留米市) の完全人工光型植物工場で行った。播種はウレタン培地 ((株) エム式水

耕研究所)に1品種12粒行い,7日後に128穴セル成型トレイに移植,その後15日間育苗した。播種から育苗までは育苗室(TAN5型,床面積4.5m²,エスプレッソミック(株))を使用した。光源はHf蛍光灯(FHF32EX-D-HX-S,NECライティング(株))を用い,14時間日長,室温23℃,相対湿度70%で管理した。光合成有効光量子束密度(以下,PPFD)はセル成型トレイ面で180μmol m⁻²s⁻¹であった。施肥は大塚A処方1/2単位を3時間ごとに循環式の底面給液で行った。その後,ガター方式栽培槽(1ユニットは5段で構成,1段にガターが4本,1ガターに植え穴が8箇所;株間150mm,条間150mm,39.5株/m²;(株)アルミス;写真1)1ユニットの3段を使用し,各品種6株(3品種/段)を定植した。このとき,最前列のガターおよび各ガターの両端の植え穴には定植しなかった。光源はHf蛍光灯(FHF32EX-N-PD,東芝ライテック(株))を用い,16時間日長,室温24/18℃(昼/夜温),相対湿度70%,CO₂濃度600ppmで管理した。PPFDはガター上面で180μmol m⁻²s⁻¹であった。培養液は大塚A処方3/5単位とし,硝酸イオン濃度をサラダナ・レタス用の培養液組成として用いられる山崎処方と千葉大処方の範囲内である6~13me L⁻¹(丸尾,2012),pH5.5~6.5で管

理した。培養液量は1ユニット当たり110Lであった。収穫は生体重80g以上を目標とし,目標重量に達しなかった品種は,播種45日後(定植24日後)に収穫した。試験は3回行い,反復とした。このとき各品種の定植位置について,試験ごとに定植する段や,段内での配置を変えた。

収穫日に各品種の特性調査として,地上部生体重,調整重および葉数(葉長が2cm以上)等を各品種4株調査した。調整重とは,萎れや黄化がみられる下葉を取り除いた生体重である。続いて,可食部(地上部の茎および下葉を除去)の硝酸イオン,有機酸,糖および塩化物イオン含量をキャピラリー電気泳動法で測定するための試料を堀江(2009)の方法により次のように調製した。各株の可食部重に対して4倍量の蒸留水を加え,電子レンジでマイクロ波加熱処理し,内生酵素を失活させた。続いて,家庭用ミキサーで3分間摩砕し,定性濾紙(No.2,東洋濾紙(株))で濾過後,メンブレンフィルター(DISMIC®25CS045AN,東洋濾紙(株))に通し測定試料とした。試料は電気泳動まで-30℃で保存した。なお,成熟した植物細胞では細胞内体積の90%近くを液胞が占めるとされる(SALISBURY and ROSS,1991)。調製した試料には未展開葉由来も含まれたが,得られた値は液胞の含量を反映したものとみなした。

2) 地上部および根部特性の品種比較(試験2)

試験1で可食部の硝酸イオン含量が低かった'L-120'と,標準的な硝酸イオン含量を示す対照品種として'ノーチップ'(横浜植木(株))を供試した。各品種60粒を試験1と同じ方法で播種,育苗した。ただし,セル成型トレイに移植後の育苗日数は14日とした。定植には試験1と同じガター方式栽培槽の1ユニットを使用した。定植数は各品種48株とし,各段に1品種,1段当たり24株(8株×3ガター,最前列のガターは使用せず),1品種につき2段使用した。栽培条件は試験1と同じとした。試験は3回行い,反復とした。各品種の定植位置について,試験ごとに段およびユニット(当実証拠点には6ユニット設置)を変えた。

定植5,10および16日後に可食部の硝酸イオン含量を各品種3株調査した。硝酸イオン測定のための試料調製は試験1と同じとした。ただし,定植5日後は可食部重が小さかったため,可食部重



写真1 ガター方式栽培槽
黄枠で囲んだ範囲が1ユニット

に対して9倍量の蒸留水を加えて摩砕した。定植5、10および15日後に地上部の生体重および乾物重を各品種6株調査した。次にそれらの根部について、養分の吸収機能を担う根を仮想パイプ（以下、ルートモデル）から判別し（田中ら、1994）、その根長および体積を測定するため、各品種3株を用いて根の直径階級別根長を調査した。また残り3株を用いて根の呼吸速度を調査した。その後、これら6株の根部乾物重を調査した。なお、地上部および根部の乾物重は80℃で2日間以上乾燥処理し、室温に戻した後に測定した。

3) 硝酸イオン吸収量および同化量の品種比較（試験3）

‘L-120’および‘ノーチップ’を供試した。各品種120粒を試験2と同じ方法で播種、育苗した。定植は試験1と同じガター方式栽培槽の2ユニットを用い、1品種につき1ユニットを使用した。定植数は各品種96株（24株/段×4段）、定植後の栽培条件は試験1と同じとした。試験は3回行い、反復とした。各品種の定植位置について、試験ごとにユニットを変えた。定植15日後に地上部および根部の生体重とそれらの硝酸イオン含量を各品種6株調査した。硝酸イオン測定のための試料調製は試験1と同じとした。ただし、根部は株当たりの生体重が小さかったため、調製時に3株分をまとめ1試料とした。定植日および定植15日後の培養液の硝酸イオン濃度を調査するため、各培養液タンクから培養液を7 mL採取し、電気泳動まで5℃で保存した。なお、タンクの液量は予め減水分を水道水で補った。

硝酸イオン吸収量および同化量は次のように求めた。定植日および定植15日後の培養液、ならびに減水分を補った水道水の硝酸イオン濃度から、栽培期間中に全株が吸収した硝酸イオン量を算出し、定植株数で割ることから株当たり硝酸イオン吸収量を算出した。続いて、地上部および根部の硝酸イオン含量とそれぞれの試料の生体重から、株当たりの硝酸イオン量を求め、硝酸イオン吸収量との差を株当たり同化された硝酸イオン量とした。

2. キャピラリー電気泳動法

キャピラリー電気泳動装置（CAPI-3300、大塚電子（株））を用いた。泳動方法はメーカーのマ

ニュアルに従った。硝酸イオンおよび塩化物イオンは泳動液に有機酸・金属イオン分析用泳動液 α -AFQ109（大塚電子（株））を用い、試料導入は落差法で25 mm、30秒、泳動は25℃、-25 kV、7分、検出は間接吸光法で波長265 nmとした。有機酸は泳動液に有機酸分析用泳動液 α -AFQ133（大塚電子（株））を用い、試料導入は落差法で25 mm、90秒、泳動は25℃、-20 kV、8分、検出は間接吸光法で波長275 nmとした。糖は泳動液に単糖分析用泳動液 α -AFQ111（大塚電子（株））を用い、試料導入は落差法で25 mm、60秒、泳動は25℃、-20 kV、25分、検出は間接吸光法で波長230 nmとした。キャピラリー管はすべての測定で内径75 μ m、長さ80 cm（有効長67.5 cm）とした。

3. 根の直径階級別根長の測定

ウレタン培地内を含めてすべての根を採取し、0.1%クリスタルバイオレット溶液で16時間染色し、その後十分に水洗した。続いて、透過原稿ユニット付きイメージスキャナー（A3サイズ）上に据えたガラストレイ（50 cm × 33 cm × 2 cm）に水道水を張り、そこに1 cm程度に切断した根を均一に広げ、パーソナルコンピューターにより画像（300 dpi、256階調グレースケール）を得た。直径階級別根長の測定は、根系解析用マクロソフトウェアRoot length 1.80（木村、1998）を使用し、直径0.085 ~ 1.982 mmの根を20階級に分け、それぞれの階級に含まれる根長を得た。その後、階級値と根長から各階級の体積を算出した。

4. 根の呼吸速度の測定

地上部から根部を切り離し、蒸留水で水洗後、紙タオルで十分に水気を取り、先端～中央部の根をおよそ0.75 g採取した。空気でバブリングし酸素飽和させた蒸留水200 mLが入ったトールビーカーに採取した根を浸漬し、25℃暗黒条件で2時間静置処理した。処理後、根を取り出し、溶存酸素計（model55、ワイエスアイ・ナノテック（株））を用いて溶存酸素量を測定した。対照区として、根を入れずに同じ条件で処理した蒸留水の溶存酸素量を測定した。対照区との溶存酸素量の差と、処理した根の乾物重から酸素消費量を求め、根の呼吸速度（ $\text{mgO}_2 \text{gDW}^{-1}\text{h}^{-1}$ ）を算出した。

5. 統計分析

統計解析ソフトウェア JMP®11 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) を用いて、品種間の有意差検定を分散分析により行った。このとき、反復は混合モデルにおける変量効果として扱った。事後検定として多重比較を行う場合は、Tukey の HSD 検定を行った。

III. 結果および考察

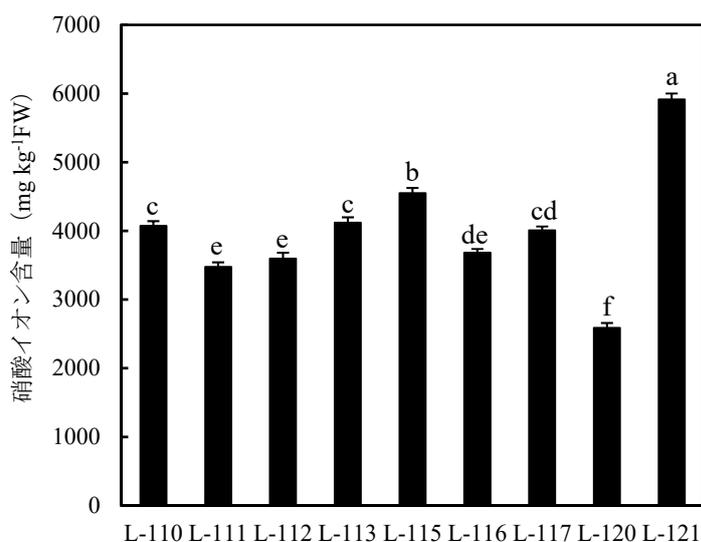
1. リーフレタス9品種の可食部の硝酸イオン含量 (試験1)

供試した9品種の収穫調査時の地上部特性を第1表に示した。播種から収穫までの日数は品種によって異なり、最も短い'L-111'および'L-120'で38日、最も長い'L-121'で46日となった。'L-112'は成長が遅く、生体重が80gに至らない時点での調査となった。'L-112'を除く8品種について、収穫時の生体重は87~116g、調整重は83~113gであった。葉数は16.5~35.0枚と差が大きく、オークリーフ系は30枚以上と多かった。葉の大きさおよび形についても品種によって差が認められ、栽培日数が短い品種ほど最大葉が大きく、最大葉長の値が大きい品種ほど葉長/葉幅比が大きかった。

第1表 リーフレタス9品種の地上部特性

品種	系統	葉色	栽培日数	定植後日数	地上部生体重 (g/株)	調整重 (g/株)	葉数 (枚/株)	最大葉長 (cm)	最大葉幅 (cm)	葉長/葉幅比
L-110	リーフ	グリーン	43	21	102.0	99.0	23.0	15.4	16.0	1.0
L-111	リーフ	グリーン	38	16	95.6	88.7	16.5	22.8	19.1	1.2
L-112	リーフ	レッド	46	24	53.1	52.1	18.3	14.4	14.1	1.0
L-113	バタビア	グリーン	42	20	97.1	91.6	24.9	17.5	15.8	1.1
L-115	バタビア	レッド	45	23	87.1	83.2	28.3	19.2	13.6	1.4
L-116	オークリーフ	グリーン	40	18	116.0	113.4	33.3	18.4	19.1	1.0
L-117	オークリーフ	レッド	44	22	88.8	83.0	35.0	16.4	16.3	1.0
L-120	バタビア	グリーン	38	16	97.2	92.7	25.2	23.3	16.0	1.5
L-121	フリル	グリーン	46	24	99.3	96.5	22.7	17.6	14.0	1.3

n=4, 3反復。



第1図 リーフレタス9品種の可食部の硝酸イオン含量
異なる英文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意差あり (n=4, 3反復)。
縦線は標準誤差を示す。

第1図に各品種の可食部の硝酸イオン含量を示した。最も低い品種は‘L-120’の2590 mg kg⁻¹FW, 最も高い品種は‘L-121’の5910 mg kg⁻¹FWであり, 残り7品種は3470 ~ 4550 mg kg⁻¹FWの範囲にあった。ESCOBAR-GUTIERREZ *et al.* (2002) は形態型の異なる品種を供試して硝酸イオン含量を調査した結果, 形態型間(サラダナ, リーフレタス, コスレタス) およびサラダナ品種間で差異が認められることを報告した。BURNS *et al.* (2011) は各形態型の平均硝酸イオン含量がサラダナおよびリーフレタスで高く, 結球レタスおよびコスレタスでは低いことを報告した。今回供試した「ハイドロレタスシリーズ」は, 系統(リーフ, バタビア, オークリーフ, フリル) および葉色(グリーン, レッド)の組合せにより変化に富んだ品種で構成されている。‘L-120’はグリーンバタビアとなるが, 同じグリーンバタビアの‘L-113’や, レッドバタビア‘L-115’の硝酸イオン含量が低いということはなく, リーフレタス各系統と硝酸イオン含量との間に関係性はないように考えられた。硝酸イオン含量が低かった‘L-111’, ‘L-116’および‘L-120’は栽培日数が38 ~ 40日と短く, 硝酸イオン含量が高かった‘L-115’および‘L-121’は栽培日数が45 ~ 46日と長かったことから, 硝酸イオン含量と栽培日数との間に関係性がみられたが, 栽培日数が38日であった‘L-111’と‘L-120’との硝酸イオン含量の差は1000 mg kg⁻¹FW近くあり, 栽培日数を低硝酸品種の選別に利用することは難しいと考えられた。‘L-120’は供試した品種の中で硝酸イオン含量が最も低い品種であったため, 完全人工光型植物工場での栽培における低硝酸品種として選定した。

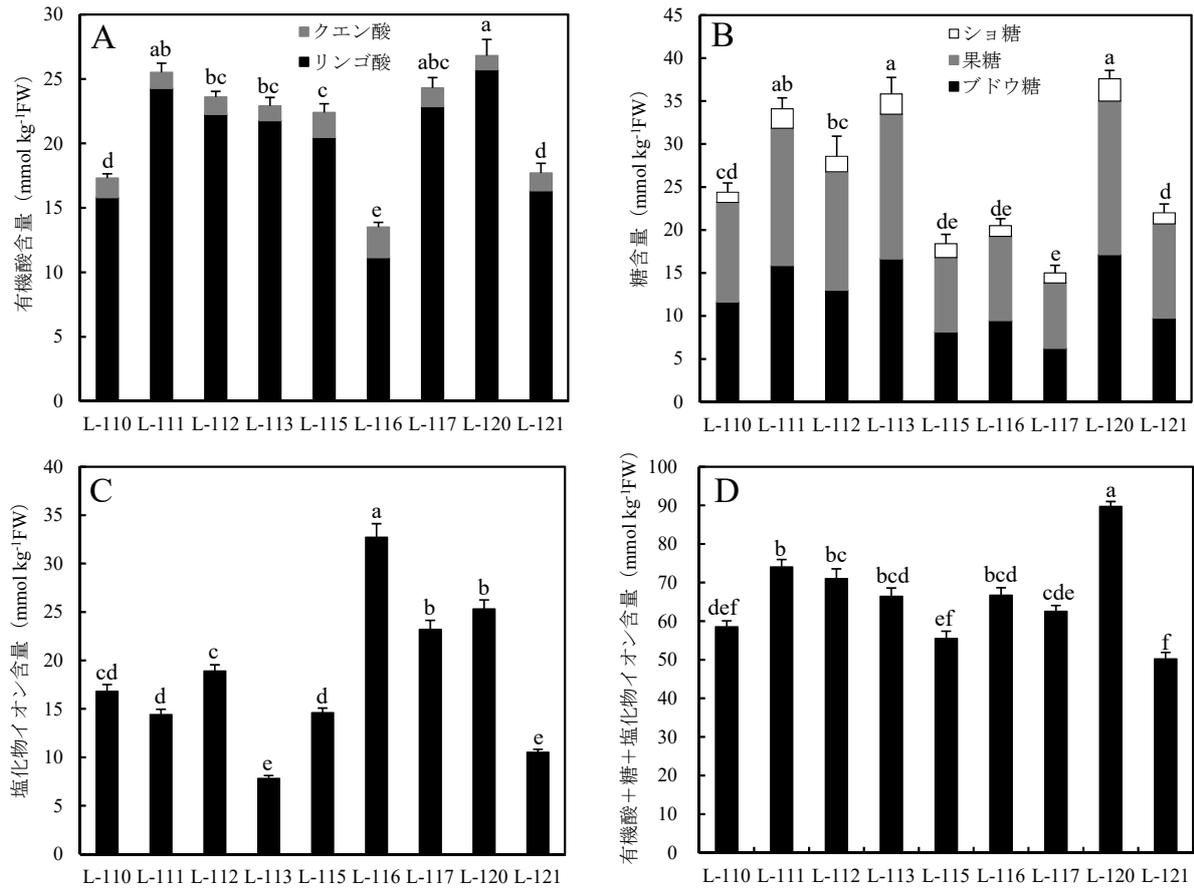
2. リーフレタス9品種の可食部の有機酸, 糖および塩化物イオン含量(試験1)

有機酸としてリンゴ酸およびクエン酸, 糖としてブドウ糖, 果糖およびショ糖を測定した。供試した9品種の可食部の有機酸含量は13.5 ~ 26.8 mmol kg⁻¹FWの範囲にあり, ‘L-116’は低く, ‘L-111’, ‘L-117’および‘L-120’は高かった(第2図A)。すべての品種でリンゴ酸の割合が高く, ‘L-116’を除く8品種では90%以上, ‘L-116’で82.6%を示した。可食部の糖含量は15.0 ~ 37.6 mmol kg⁻¹FWの範囲にあり, ‘L-117’は低く, ‘L-111’, ‘L-113’および‘L-120’は高かった(第2図B)。ほとんど

の品種でブドウ糖と果糖がほぼ同等の含量を示し, すべての品種で糖全体の90%以上をブドウ糖+果糖が占め, ショ糖は僅かであった。可食部の塩化物イオン含量は7.8 ~ 32.7 mmol kg⁻¹FWの範囲にあり, ‘L-113’および‘L-121’は低く, ‘L-116’は高かった(第2図C)。BLOM-ZANDSTRA and LAMPE (1985) は光強度を弱めて栽培すると, 硝酸イオン含量の増加と有機アニオン(おもに有機酸)+ブドウ糖+ショ糖の減少が認められ, 液胞の浸透圧調整物質として硝酸イオンと有機酸+糖がほぼ1:1の相補的な関係にあることを示した。BUWALDA and WARMENHOVEN (1999) は培養液のリン酸濃度と硝酸イオン蓄積との関係について検討した中で, 硝酸イオンと有機酸+糖との間に強い負の相関($r = -0.9$)を認めた。硝酸イオン含量の品種間差に関する報告では, BEHR and WIEBE (1988) がサラダナ19品種について調査した中で, 硝酸イオンと強い負の相関が認められる物質としてリンゴ酸, ブドウ糖, 果糖および塩化物イオンをあげた。そこで供試した9品種について, 硝酸イオンとリンゴ酸, ブドウ糖, 塩化物イオン, 有機酸+糖および有機酸+糖+塩化物イオンとの相関関係をみたところ, 硝酸イオンと有機酸+糖+塩化物イオンとの間に $r = -0.77$ の強い負の相関が認められた(第2表)。このことから, 本試験では有機酸, 糖および塩化物イオン含量の総和が, 液胞の浸透圧調整物質として硝酸イオンと相補的な関係にあると考えられた。低硝酸品種として選定した‘L-120’の有機酸+糖+塩化物イオン含量は, 供試した他の8品種に比べて有意に高かった(第2図D)。よって, 液胞の浸透圧調整物質の構成からみたとき, ‘L-120’は有機酸, 糖および塩化物イオン含量の総和が高い品種であるため, それらと相補的な関係にある硝酸イオン含量が低いと考えられた。

3. 低硝酸品種の根量および根の呼吸速度(試験2)

‘L-120’および‘ノーチップ’の硝酸イオン含量は成長に伴って増加していったが, 調査を行った定植5, 10および16日後のいずれについても‘L-120’が対照品種の‘ノーチップ’に比べて有意に低かった(第3図)。定植16日後の‘L-120’の硝酸イオン含量は2390 mg kg⁻¹FWと試験1と同程度であった。地上部生体重の値は, 定植5日後では‘L-120’が‘ノーチップ’に比べて小さかったが, 定植10



第2図 リーフレタス9品種の可食部の有機酸，糖および塩化物イオン含量

A, 有機酸；B, 糖；C, 塩化物イオン；D, 有機酸+糖+塩化物イオン。

異なる英文字間には Tukey の HSD 検定により 5%水準で有意差あり (n=4, 3 反復)。

縦線は標準誤差を示す。有機酸および糖についてはそれぞれリンゴ酸+クエン酸，ブドウ糖+果糖+ショ糖の標準誤差。

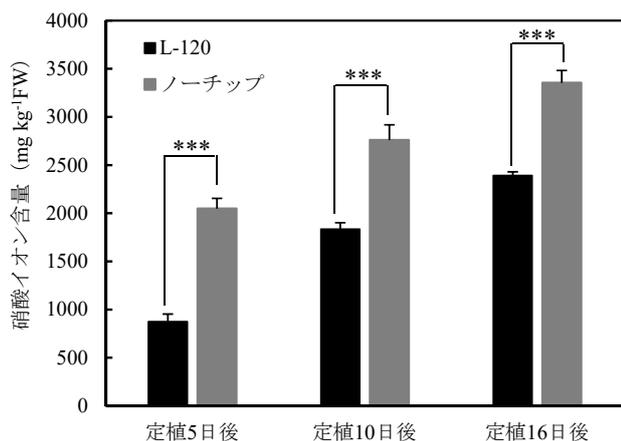
第2表 可食部の硝酸イオン含量と有機酸，糖および塩化物イオン含量との相関

変量	相関係数
リンゴ酸	-0.36 *** ^c
ブドウ糖	-0.44 ***
塩化物イオン	-0.51 ***
有機酸 ^a +糖 ^b	-0.48 ***
有機酸+糖+塩化物イオン	-0.77 ***

a) リンゴ酸+クエン酸。

b) ブドウ糖+果糖+ショ糖。

c) *** は 0.1%水準で有意差ありを示す (n=4, 3 反復)。



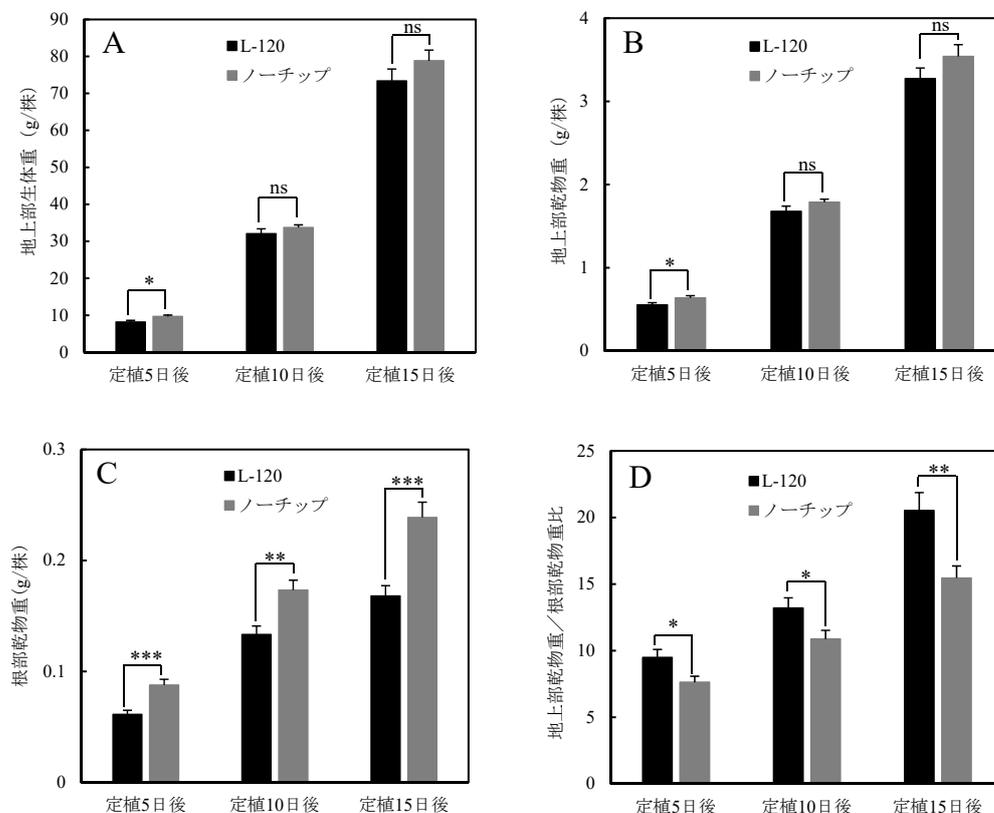
第3図 'L-120' および 'ノーチップ' の可食部の硝酸イオン含量

*** は分散分析により 0.1%水準で有意差ありを示す (n=3, 3 反復)。縦線は標準誤差を示す。

および 15 日後は有意差が認められなかった (第4図A)。地上部乾物重についても地上部生体重と同じ傾向を示した (第4図B)。このため、これら2品種は地上部が同じように成長していたと考えられ

た。根部乾物重は定植 5, 10 および 15 日後のいずれについても 'L-120' の値が 'ノーチップ' よりも有意に小さかった (第4図C)。地上部乾物重/根部乾物重比 (以下, S/R 比) は定植 5, 10 および 15 日後のいずれについても 'L-120' の値が 'ノーチップ' よりも有意に大きく、定植 15 日後の値は 'L-120' が 20.5, 'ノーチップ' が 15.5 であった (第4図D)。以上から、'L-120' は 'ノーチップ' に比べて光合成産物の根への分配が少ない品種と考えられた。

ところで、根部乾物重は炭素収支を研究する場合には不可欠なパラメーターであるが、根の機能と直接に関係づけることが困難とされ、水耕では根の体積がイオンの吸収量と密接に関係づけられることから、根量を表すパラメーターとして根長および根の体積が用いられる (中元, 1998)。加えて、根系は通導および吸収といった機能別に分けることができることから、本試験では吸収機能を担う部分に対しての根量を求めることとした。根系を機能別に分類する手法としては、ルートモデルを作製し、円柱と



第4図 'L-120' および 'ノーチップ' の地上部重および根部重

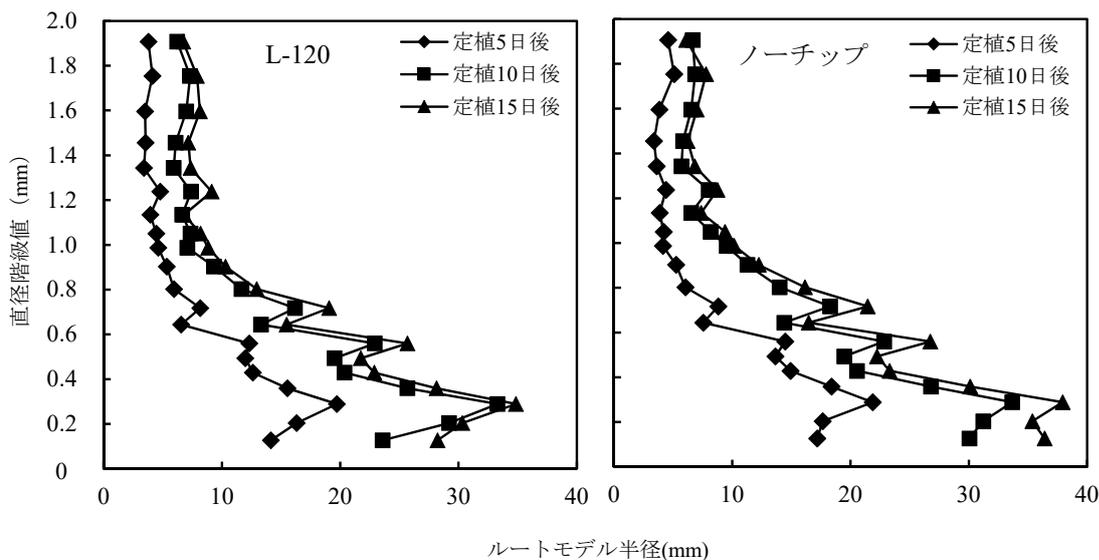
A, 地上部生体重; B, 地上部乾物重; C, 根部乾物重; D, 地上部乾物重/根部乾物重比。

*, **, *** および ns は分散分析によりそれぞれ 5, 1, 0.1%水準で有意差ありおよび有意差なしを示す (n=6, 3 反復)。縦線は標準誤差を示す。

なるパイプモデルとの適合性によって判別することが提案されている（有馬・芝山，1998；田中ら，1994）。ルートモデルとは，樹木の分枝様相を定量的に解析するパイプモデル理論を応用したもので，根の直径に基づいた根系構造の解析手法である。根を一定の長さに切断し，それらを直径階級別に集めて体積を求める。このとき階級幅は任意であるが，ルートモデル作製時に根系構造の特徴が捉えられるように設定する。次に各直径階級の体積と等しい体積をもつ厚みが一定（本試験では0.1mm）の円盤を仮想し，その円盤を直径階級が小さいものから順に積み上げた円盤柱を作製する。この円盤柱の片断面図をルートモデルと呼ぶ。すなわち，ルートモデルはX軸に各直径階級の円盤の半径（ルートモデル半径と呼ぶ），Y軸に各直径階級の階級値をとった折れ線グラフとなる。通常，円盤柱はある直径階級の部分が著しく大きな半径を示すことから円柱とはならず，ルートモデルで表すとその部分が突出した形となる。この形状は根の機能的役割と密接に関係しているとされ，円柱となる直径階級の部分の根は通導機能を担い，円柱とならない突出した部分の根は吸収機能を担うとされる。

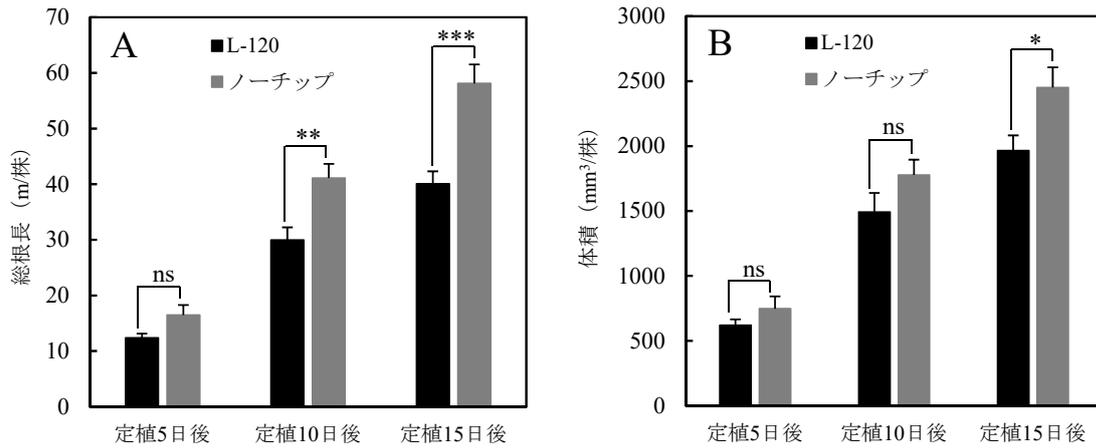
定植5，10および15日後の直径階級別根長を用いてルートモデルを作製した結果，2品種ともに

直径階級値が1 mmより太い部分ではルートモデル半径がほぼ一定で，1 mm以下の部分では直径階級値が小さくなるにつれルートモデル半径が大きくなり，直径0.2～0.3 mmにピークが認められた（第5図）。このことから‘L-120’および‘ノーチップ’の根系に関して，直径1 mmより太い部分は通導機能を担う根，直径1 mm以下の部分は吸収機能を担う根（以下，細根）として分けた。細根の総根長の値は，定植10および15日後に‘L-120’が‘ノーチップ’に比べて有意に小さかった（第6図A）。細根の体積の値は，定植15日後に‘L-120’が‘ノーチップ’に比べて有意に小さかった（第6図B）。SCHEIBLE *et al.* (1997) はタバコを材料とした試験で，硝酸イオンが地上部および根部への炭素分配を制御し，地上部に硝酸イオンが蓄積すると根の成長が抑制されることを報告した。TIAN *et al.* (2008) はトウモロコシの根の伸長抑制には組織中の窒素化合物の蓄積が関与するとし，窒素化合物の蓄積によって根の内生オーキシンレベルが低下するとした。リーフレタスについても同様な機構が存在し，‘L-120’では定植10日後あたりから地上部の硝酸イオン含量が‘ノーチップ’に比べて低いレベルで細根の成長抑制が始まり，定植15日後には細根の総根長や体積の値が‘ノーチップ’に比べ



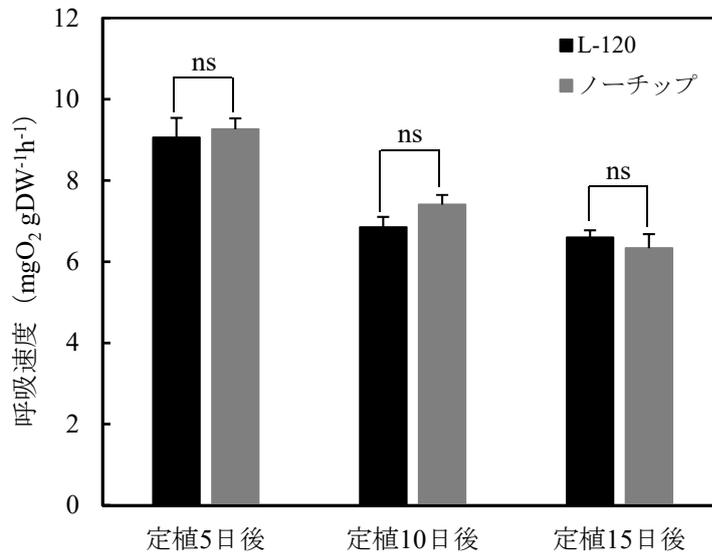
第5図 ‘L-120’ および ‘ノーチップ’ の生育に伴うルートモデルの変化

n=3, 3反復から作製。ルートモデル半径とは，直径階級別の根長とその階級値から求められる体積と，同じ体積をもつ厚みが0.1mmの円盤を仮想したときの円盤の半径。



第6図 'L-120' および 'ノーチップ' における吸収機能を担う根の総根長および体積
A, 総根長; B, 体積。

*, **, *** および ns は分散分析によりそれぞれ 5, 1, 0.1% 水準で有意差ありおよび有意差なしを示す (n=3, 3 反復)。縦線は標準誤差を示す。



第7図 'L-120' および 'ノーチップ' の根の呼吸速度

ns は分散分析により有意差なしを示す (n=3, 3 反復)。

縦線は標準誤差を示す。

て小さくなったと推測された。

根の呼吸速度に関して、定植 5, 10 および 15 日後のいずれについても 'L-120' と 'ノーチップ' との間で差は認められなかった (第7図)。根からの無機イオンの吸収は、根の呼吸から供給されるエネルギーによって行われるとされる (山口, 1998)。これらの品種間で差が認められなかったことから、次の試験 3 で行う硝酸イオン吸収量の品種比較に際して、根の呼吸から供給されるエネルギーの影響を考慮に入れる必要はないと考えられた。

4. 低硝酸品種の根からの硝酸イオン吸収量および同化量 (試験 3)

定植から収穫までの間の根からの硝酸イオン吸収量は、'L-120' が 12.0 mmol/株、'ノーチップ' が 13.9 mmol/株であり、'L-120' が有意に少なかった (第3表)。同化された硝酸イオン量は 'L-120' が 7.5 mmol/株、'ノーチップ' が 8.2 mmol/株と、これらの品種間で差は認められなかった (第3表)。このとき、硝酸イオン同化率は 'L-120' が 62.9%、'ノーチップ' が 59.1% であり、これらの品種間で差は認められなかった (第3表)。BEHR

第3表 ‘L-120’ および ‘ノーチップ’ の根からの硝酸イオン吸収量、植物体内で同化された硝酸イオン量およびその同化率

品種	硝酸イオン 吸収量 (mmol/株)	同化された 硝酸イオン 量 (mmol/株)	硝酸イオン 同化率 (%)
L-120	12.0	7.5	62.9
ノーチップ	13.9	8.2	59.1
有意差 ^a	*	ns	ns

a) * および ns はそれぞれ分散分析により 5%水準で有意差ありおよび有意差なしを示す (n=3)。

and WIEBE (1992) は硝酸イオン蓄積の品種間差の原因を検討し、地上部の硝酸イオン含量の品種間差は根からの硝酸イオン吸収量の差であることを報告した。BURNS *et al.* (2011) も同様に地上部の硝酸イオン含量の品種間差は根からの硝酸イオン吸収量に強く影響されるとした。さらに BURNS *et al.* (2012) はリーフレタス(硝酸イオン含量が高い)と結球レタス(硝酸イオン含量が低い)との交雑実生 96 個体を用いて、地上部の硝酸性窒素含量の個体間差の大きさについて、その 72.6% が根からの硝酸イオンの吸収、残り 27.4% が硝酸同化によると推定した。他方、液胞に蓄積された硝酸イオン含量の品種間差とサイトゾル酵素である硝酸還元酵素の活性との間に関係性は認められていない (BLOM-ZANDSTRA and EENINK, 1986)。本試験で ‘L-120’ は ‘ノーチップ’ に比べて根からの硝酸イオン吸収量が少なく、同化された硝酸イオン量および同化率に差が認められなかったことから、地上部の硝酸イオン含量には硝酸同化よりも根からの硝酸イオン吸収量が強く影響を及ぼしていると考えられた。

BUWALDA and WARMENHOVEN (1999) は硝酸イオンの蓄積を防ぐ一つの方法として、根からの硝酸イオンの取り込み機会を減少させることで、硝酸イオンの吸収を抑えることを提案した。硝酸イオンの取り込み機会を減少させる一般的な方法としては、培養液中の硝酸イオン濃度を低くすることが考えられる。今回 ‘L-120’ が示した細根量が少ないことは、硝酸イオンの取り込み機会の減少につながり、本品種における根からの硝酸イオン吸収を制限する一因になっていることが示唆された。

引用文献

- 1) 有井雅幸 (2016) 野菜の機能と品質評価指標. 施設と園芸 **173**: 55-61.
- 2) 有馬 進・芝山秀次郎 (1998) パイプモデルを応用したサツマイモ根系形成経過の解析. 海と台地: 佐賀大海浜台地生物生産セ報 **8**: 39-42.
- 3) BEHR, U. and WIEBE, H.-J. (1988) Relations between nitrate content and other osmotica in the cell sap of lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.). *Gartenbauwissenschaft* **53**: 206-210.
- 4) BEHR, U. and WIEBE, H.-J. (1992) Relation between photosynthesis and nitrate content of lettuce cultivars. *Sci. Hortic.* **49**: 175-179.
- 5) BLOM-ZANDSTRA, M, and EENINK, A. H. (1986) Nitrate concentration and reduction in different genotypes of lettuce. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **111**: 908-911.
- 6) BLOM-ZANDSTRA, G. and LAMPE, J. E. M. (1983) The effect of chloride and sulphate salts on the nitrate content in lettuce plants (*Lactuca sativa* L.). *J. Plant Nutr.* **6**: 611-628.
- 7) BLOM-ZANDSTRA, M. and LAMPE, J. E. M. (1985) The role of nitrate in the osmoregulation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown at different light intensities. *J. Exp. Bot.* **36**: 1043-1052.
- 8) BRUNINGFANN, C. S. and KANEENE, J. B. (1993) The effects of nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on human health: a review. *Vet. Hum. Toxicol.* **35**: 521-538.
- 9) BURNS, I. G., DURNFORD, J., LYNN, J., MCCLEMENT, S., HAND, P. and PINK, D. (2012) The influence of genetic variation and nitrogen source on nitrate accumulation and iso-osmotic regulation by lettuce. *Plant Soil* **352**: 321-339.

- 10) BURNS, I. G., ZHANG, K., TURNER, M. K., LYNN, J., MCCLEMENT, S. HAND, P. and PINK, D. (2011) Genotype and environment effects on nitrate accumulation in a diversity set of lettuce accessions at commercial maturity: the influence of nitrate uptake and assimilation, osmotic interactions and shoot weight and development. *J. Sci. Food Agr.* **91**: 2217-2233.
- 11) BUWALDA, F. and WARMENHOVEN, M. (1999) Growth-limiting phosphate nutrition suppresses nitrate accumulation in greenhouse lettuce. *J. Exp. Bot.* **50**: 813-821.
- 12) 筑紫正宏 (2009) 経済産業省・農林水産省の取り組み。「植物工場ビジネス戦略と最新栽培技術」(技術情報協会編) p. 3-13. 技術情報協会, 東京.
- 13) ESCOBAR-GUTIERREZ, A. J., BURNS I. G., LEE, A. and EDMONDSON, R. N. (2002) Screening lettuce cultivars low nitrate content during summer and winter production. *J. Hortic. Sci. Biotech.* **77**: 232-237.
- 14) EUROPEAN COMMISSION (2011) Commission regulation (EU) No 1258/2011 of 2 December 2011 amending regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for nitrates in foodstuff. *Off. J. Eur. Commun.* **L320**: 15-17.
- 15) 堀江秀樹 (2009) キャピラリー電気泳動法による野菜の主要呈味成分の分析. *分析化学* **58**: 1063-1066.
- 16) 星 岳彦 (2009) 植物工場における制御技術。「植物工場ビジネス戦略と最新栽培技術」(技術情報協会編) p. 58-71. 技術情報協会, 東京.
- 17) 井熊 均・三輪泰史 (2014) 植物工場経営. 175p. 日刊工業新聞社, 東京.
- 18) 木村和彦 (1998) 画像解析による根長と根の直径の測定—その1. 実践編—. 根の研究 **7**: 8-11.
- 19) 小俣達男 (2001) 硝酸の吸収と同化。「朝倉植物生理学講座 2. 代謝」(山谷知行編) p. 47-53. 朝倉書店, 東京.
- 20) MACKOWN, C. T., VOLK, R. J. and JACKSON, W. A. (1981) Nitrate accumulation, assimilation and transport by decapitated corn roots: effect of prior nitrate nutrition. *Plant Physiol.* **68**: 133-138.
- 21) 丸尾 達 (2013) レタス類。「養液栽培のすべて」(日本施設園芸協会・日本養液栽培研究会共編) p. 258-266. 誠文堂新光社, 東京.
- 22) 中元朋実 (1998) 根長密度。「根の事典」(根の事典編集委員会編) p. 87-89. 朝倉書店, 東京.
- 23) 日本施設園芸協会 (2016) 平成 27 年度次世代施設園芸導入加速化支援事業 (全国推進事業) 事業報告書 別冊 2 大規模施設園芸・植物工場実態調査・事例集. 平成 28 年 4 月 1 日公表 <http://www.jgha.com/jisedai/h27/r2/h27r23.pdf>
- 24) 大山卓爾(1995)植物根における窒素の吸収と代謝. 根の研究 **4**: 85-91.
- 25) REININK, K. (1991) Genetics of nitrate content of lettuce, 1: Analysis of generation means. *Euphytica* **54**: 83-92.
- 26) REININK, K. and EENINK, A. H. (1988) Genotypical differences in nitrate accumulation in shoots and roots of lettuce. *Sci. Hortic.* **37**: 13-24.
- 27) SALISBURY, F. B. and ROSS, C. W. (1991) Plant Physiology. 682p. Wadsworth Publishing Company, California.
- 28) SCHEIBLE, W.-R., LAUERER, M., SCHULZE, E.-D., CABOCHE, M. and STITT, M. (1997) Accumulation of nitrate in the shoot acts as a signal to regulate shoot-root allocation in tobacco. *Plant J.* **11**: 671-691.
- 29) 食品安全委員会 (2008) 葉物野菜中の硝酸塩について. 平成 20 年 7 月 4 日公表 https://www.fsc.go.jp/sonota/sonota_qa/yasai_shousanen.pdf
- 30) STEINGROVER, E., RATERING, P. and SIESLING, J. (1986) Daily changes in uptake, reduction and storage of nitrate in spinach grown at low light intensity. *Physiol. Plantarum* **66**: 550-556.
- 31) 田中典幸・三原 実・有馬 進・原田二郎 (1994) ダイズの根系構造のパイプモデル適合性とその範囲. 日作紀 **63**: 63-67.
- 32) TIAN, Q., CHEN, F., LIU, J., ZHANG, F. and MI, G. (2008) Inhibition of maize root growth by high nitrate supply is correlated with reduced IAA levels in roots. *J. Plant Physiol.* **165**: 942-951.
- 33) 辻 昭久 (2009) 新しい光が農業を変える! HEFL 照明による野菜人工栽培技術。「植物工場ビジネス戦略と最新栽培技術」(技術情報協会編) p. 128-142. 技術情報協会, 東京.
- 34) VAN DER BOON, J., STEENHUIZEN, J. W. and STEINGROVER, E. G. (1990) Growth and nitrate concentration of lettuce as affected by total nitrogen and chloride concentration, NH_4/NO_3 ratio and temperature of the recirculating nutrient solution. *J. Hort. Sci.* **65**: 309-321.
- 35) WORLD HEALTH ORGANIZATION AND INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH

- ON CANCER (2010) IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 94, Ingested nitrate and nitrite, and cyanobacterial peptide toxins. 464p. Lyon, France.
- 36) 山口武視 (1998) 根の呼吸と養分吸収. 「根の事典」 (根の事典編集委員会編) p. 328-329. 朝倉書店, 東京.
- 37) ZHOU, W. L., LIU, W. K. and YANG Q. C. (2013) Reducing nitrate content in lettuce by pre-harvest continuous light delivered by red and blue light-emitting diodes. *J. Plant Nutr.* **36**: 481-490.

Screening Cultivars for Low Nitrate Content and Root Characteristics of Low-Nitrate Cultivars of Leaf Lettuce Grown in a Closed Plant Factory

Akhide Okamoto, Kazuyoshi Kitazaki¹⁾, and Yoichi Yamato

Summary

We sought to find low-nitrate cultivars of leaf lettuce grown in a closed plant factory, and compared root characteristics and nitrate absorption of a low-nitrate cultivar with a normal nitrate cultivar. Nitrate content in the edible part was measured for nine leaf lettuce cultivars, and L-120 was selected as a low-nitrate cultivar because the nitrate content of this cultivar was 2590mg kg⁻¹FW. As a vacuolar osmoticum, a decrease in nitrate content was compensated by an increase in the sum of contents of organic acids, sugars, and chloride, and this value of L-120 was significantly higher than those of the other eight cultivars. In the root system of leaf lettuce plants, roots of 1mm or less in diameter (fine roots) played a role in the absorbing function using the pipe model concept, and the volume of fine roots of L-120 was significantly smaller than those of the normal-nitrate cultivar no tip. L-120 exhibited a significantly lower net nitrate uptake than no tip during the growing period. No significant difference in nitrate assimilation rate was found between L-120 and no tip. These results suggest that the low-nitrate cultivar L-120 limits the root uptake of nitrate compared with no tip, and the limitation of nitrate uptake is caused in part by the small volume of fine roots.

Keywords: Fine root, Genetic variation, Hydroponic, Nitrate accumulation, Nitrate uptake, Osmoticum

Horticulture Research Division, National
Agricultural Research Center for Kyushu Okinawa Region, 1823-1, Miimachi
Kurume, Fukuoka 839-8503, Japan.

Present address:

1) Hokkaido University