〔短報〕

可視近赤外分光法によるトマトの非破壊窒素栄養診断法

古林　直太[*1]　　坂口　雅己[*2]　　大橋　優二[*1]

トマトは生育期間が長く，栄養成長と生殖成長が並行して進行するため，作物の窒素栄養状態に応じた追肥が重要となる。窒素栄養診断法のひとつとして，葉柄汁液の硝酸濃度を指標とした方法があるが，診断部位の採取や破砕作業，硝酸濃度の測定などの煩雑な分析操作を要する。そこで，より簡便かつ非破壊で測定可能な手法として，可視光・近赤外センサーの活用を検討した。第1果房直下の主茎硝酸濃度は窒素供給量と相関が高く，トマトの栄養状態を良く反映していた。主茎硝酸濃度は近赤外分光法により中程度の精度で推定可能であったが，定量的にトマトの硝酸濃度を推定するには精度が不十分であると考えられた。活用にあたっては，主茎硝酸濃度「1500～3200 mg NO_3^- L^{-1}」を適正基準値として3段階に区分し，中庸な生育個体5株以上の測定を行い，推定値の過半数が含まれる区分を診断結果とするとともに，5日後の再診断を組み合わせることにより，簡便で適切な診断が可能と判断した。

緒　言

施設栽培では，天井がフィルムで被覆されており，無機態窒素が土壌に蓄積しやすい環境にある。無機態窒素は施肥窒素と肥効が同等とみなされることから，施設栽培では無機態窒素の大部分を占める硝酸態窒素を土壌窒素肥沃度の診断指標としている[1)]。トマトは比較的生育期間が長く，栄養成長と生殖成長が並行して進行するため，各果房の果実肥大に合わせて追肥を幾度も行う[1)]。一時期の養分の過不足が生育抑制や収量の低下を招く恐れもあることから，トマト葉柄汁液の硝酸濃度を指標とした窒素栄養診断法が開発され，その有効性が認められている[6)]。しかし，従来の診断方法は診断部位（第1果房直下葉の先端小葉の葉柄）の採取や，乳鉢による破砕作業，分析機器を用いた硝酸濃度の測定などの煩雑な分析操作を要する。さらには，診断部位の第1果房直下葉は，生育ステージ後半には枯死することや，生産現場では病気の蔓延防止の観点から下位葉の適葉を適宜行うため，葉柄を採取できずに栄養診断の継続が困難な場面も見受けられる。これらのことから，より簡便で継続的に窒素栄養診断が可能な手法として，非破壊による窒素栄養診断法の確立が求められている。

非破壊分析法の一つとして可視近赤外分光法（以下，Vis-NIR法）が挙げられる。Vis-NIR法は可視光域と近赤外光域の波長を用いた吸収分光法であり，非破壊測定が可能であることに加えて簡易かつ迅速性が高い分析法として，農産物の品質評価や作物の栄養診断等で広く活用されている[2), 4), 5)]。

本報ではVis-NIR法を用いたトマトの非破壊窒素栄養診断法の開発および活用方法を検討したので報告する。

試験方法

1　供試材料

大玉トマト（品種「麗夏」および「CF桃太郎ファイト」）を供試し，道南農業試験場内の雨よけハウスで栽培した（表1）。試験規模は8～16m^{2}とし，2反復で行った。整枝は主枝1本仕立を行い，「麗夏」は第7果房，「CF桃太郎ファイト」は第12果房の上位の葉2枚を残して摘心した。窒素施肥は基肥，追肥ともに硫安を用い，「麗夏」は第1果房から第5果房の肥大期，「CF桃太郎ファイト」は第1果房から第10果房の肥大期に追肥した（表2）。さらに，「CF桃太郎ファイト」では基肥なし，毎日点滴灌水による追肥の処理も実施した。収穫調査は，各処理区の8株を調査株とし，週1～2回，着色した果実を収穫した。

令和7年10月31日受理

*1　（地独）北海道立総合研究機構道南農業試験場，041-1201　北斗市本町（現：同中央農業試験場，069-1395　夕張郡長沼町）
E-mail：furubayashi-naota@hro.or.jp
*2　同上（現：同酪農試験場，086-1135　標津郡中標津町）

2　硝酸濃度の実測値の測定

トマト体内における硝酸濃度の測定部位は定植後早期から測定でき，栽培期間中に損傷の可能性が低く，栽培終了時まで測定可能な第1果房直下または直上の「主茎」とした。第1果房直下または直上の主茎部分を細断して1.0gを秤量し，49mlの蒸留水を加えた。ホモジナイザーで粉砕した後，ろ液の硝酸濃度をオートアナライザーswAAt（ビーエルテック社製）で測定した。

また，比較として従来の診断部位である第1果房直下葉[6]の先端小葉葉柄についても同様の方法で硝酸濃度を測定した。

写真　可視・近赤外光センサーを用いたトマトの主茎硝酸濃度測定の様子

3　可視近赤外スペクトルの測定

主茎表面に可視･近赤外光センサーを巻き付けて可視･近赤外光を主茎内部へ入射し，反射，屈折透過および散乱した光を測定した。センサー部は試料表面での正反射光を避けるため，照射部と受光部を主茎表面の別々の位置に密着させるインタラクタンス法を採用した。測定時は外乱光の影響を防ぐため，測定部を遮蔽物（ゴム布）で覆った（写真）。主茎硝酸濃度の可視・近赤外スペクトルは携帯型可視近赤外分光器（HKNエンジニアリング製）で波長570nm ～ 1031nmを1nm間隔，蓄積時間600msの条件で測定し，本機内蔵の専用ソフト（Cane）で二次微分スペクトル値を算出した。

4　検量線の作成および評価の手法

前段2，3で得られた主茎硝酸濃度の二次微分スペクトル値と実測値を用いて重回帰分析を実施した。説明変数選択法としてステップワイズ・変数増加法を用い，BIC（Baysian information criterion，ベイズ情報量規準）が最小となるところで変数選択を停止した。供試サンプルを検量線作成用サンプル（「麗夏」n=308，「CF桃太郎ファイト」n=215）と検量線評価用サンプル（「麗夏」n=329，「CF桃太郎ファイト」n=207）の2つに区分し，硝酸濃度が均一分散するように1:1の割合でグループ分けした。得られた検量線は相関係数（r），予測標準誤差（SEP）に加えて，EI法[3]に基づき評価し，実用性の評価区分を行った。統計解析にはJMP ver.15（SAS）を用いた。

表1　供試作物の耕種概要

試験年次	品種	収穫段数	定植時期	摘心時期	収穫期間	栽植密度
2019 ～ 2021	麗夏	7段	5月下旬	7月下旬	7月上中旬～ 9月上中旬	ベッド120cm幅 通路80cm幅 条植え、株間30cm
2020 ～ 2021	CF桃太郎ファイト	12段	4月下旬	8月中旬	6月下旬～ 10月上中旬	ベッド120cm幅 通路80cm幅 条間100cm2条植え 株間40cm

表2　窒素施肥処理

年度	品種	処理区[1]	土壌窒素(mg 100g^{-1})[2]		窒素施肥量(kg ha^{-1})	
			熱水抽出性	硝酸態	基肥	追肥（内訳）[3]
2019	麗夏	N0	3.6	0.2	0	0
		N150			50	100(20×5回)
		N250			100	150(30×5回)
		N350			150	200(40×5回)
	麗夏	N0	3.4	4.3	0	0
		N100			50	50(10×5回)
		N200			100	100(20×5回)
		N300			150	150(30×5回)
2020	麗夏	N0	4.6	0.4	0	0
		N250			150	100(20×5回)
		N350			150	200(40×5回)
		N450			150	300(60×5回)
		N0	8.2	0.6	0	0
		N300			150	150(30×5回)
		N350			150	200(40×5回)
		N0	10.2	0.4	0	0
		N250			150	100(20×5回)
		N350			150	200(40×5回)
	CF桃太郎ファイト	N550	3.8	0.1	150	400(40×10回)
		N340			0	340
		N340			0	340
2021	麗夏	N350	2.5	0.0	150	200(40×5回)
		N160			160	0
		N300	6.5	0.0	100	200(40×5回)
		N300			300	0
	CF桃太郎ファイト	N450	2.4	0.6	100	350(35×10回)
		N330			0	330
		N280			0	280

1）処理区の数字は合計窒素施肥量を示す。
2）試験年春季の定植前0-20cm深の土壌
3）「麗夏」は各果房肥大期に追肥
「CF桃太郎ファイト」は養液供給システムで毎日施肥・灌水

結果および考察

1　窒素栄養診断部位の硝酸濃度

葉柄の硝酸濃度は第1果房肥大期の最大が6594 mg NO_3^- L^{-1}であり、第4果房肥大期では13484 mg NO_3^- L^{-1}となり，概ね上段の肥大期に最大値が高くなる傾向であった（表3）。一方，主茎では硝酸濃度の最大値は3621 mg NO_3^- L^{-1}と，葉柄の半分以下であり、各果房肥大期の硝酸濃度の最大値は概ね同水準であった。各測定部位の硝酸濃度と窒素供給量との関係をみると，主茎では相関係数が各果房肥大期で0.9以上であったが，葉柄では第3果房肥大期で0.9を下回った。したがって主茎の方が，トマトの土壌からの窒素供給と栄養状態を反映していると考えられた。

2　主茎硝酸濃度を用いたトマトの窒素栄養診断基準値の設定

主茎硝酸濃度と果実収量の関係をみると，果実収量は主茎硝酸濃度に対応して増加し2300 mg NO_3^- L^{-1}程度より高まると減少に転じた（図1）。最大収量に対する収量比が95までを許容可能な果実収量水準とすると，果実収量170Mg ha^{-1}以上でこの水準を満たすとともに，そのときの主茎硝酸濃度は1500 mg NO_3^- L^{-1}以上および3200 mg NO_3^- L^{-1}以下であった。

そこで，主茎硝酸濃度における窒素栄養診断基準値を「1500 ～ 3200 mg NO_3^- L^{-1}」とした各果房肥大期における基準値の妥当性を検討した。窒素施肥量4水準0，150，250，350（施肥標準）kg N ha^{-1}における各果房肥大期の主茎硝酸濃度の推移を図2左に示した。N0区の各果房肥大期における主茎硝酸濃度の推移をみると，いずれの測定時期も下限値1500 mg NO_3^- L^{-1}を大きく下回り，果実収量は施肥標準であるN350区より5割近く減収した。N150区では下限値前後を推移し，第2果房肥大期および第5果房肥大期には1500 mg NO_3^- L^{-1}を下回り，果実収量はN350区より1割以上減収した。N250区およびN350区では，いずれの果房肥大期も1500 ～ 3200 mg NO_3^-

L^{-1}の範囲内で推移した。N250区はN350区と比較して硝酸濃度が低く，果実収量も施肥標準区に比べて最大で8%減少したが，基準下限値を下回る時期がみられたN150区と比較して多収であった。これらのことから，各果房肥大期において，主茎硝酸濃度が診断基準値を逸脱する頻度が少ない処理区ほど多収であり，経時的な窒素栄養診断によって主茎硝酸濃度を基準値内で管理することで生育・収量の安定化が図れると考えられた。

従来のハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断法は第1果房直下の先端小葉葉柄を診断部位とし，硝酸濃度4000～7000 mg NO_3^- L^{-1}を基準値としている[6]。これに対して，主茎硝酸濃度を用いた窒素栄養診断は，従来法とは診断部位および硝酸濃度の基準値が異なるため，各果房肥大期の主茎硝酸濃度と葉柄硝酸濃度の推移を比較した。果実収量が減収したN150区における主茎硝酸濃度は，第2果房肥大期および第5果房肥大期に下限値1500 mg NO_3^- L^{-1}を下回ったが（図2左），葉柄硝酸濃度は第1果房肥大期を除き下限値4000 mg NO_3^- L^{-1}を上回り，特に第3果房肥大期では上限値7000 mg NO_3^- L^{-1}を上回った（図2右）。すなわち，N150区の主茎硝酸濃度の推移は概ね基準値内および基準下限値以下であるのに対し，葉柄硝酸濃度では基準上限値を超える時期もあり，さらにN250区やN350区では上限値を超えて推移していた。坂口ら（2004）は第1果房直下葉のような下位葉は充分に成熟した部位であり，周辺果房のシンク活性も下がっていることから，下位葉に転流される硝酸は葉身における窒素同化や周辺果房の影響を受けにくく，葉柄に蓄積すると推測した[6]。このため，葉柄硝酸濃度による診断では硝酸濃度が基準上限値を逸脱する頻度が多く，トマトの窒素栄養状態を十分以上であると過大評価しやすい傾向にあると考えられる。一方，根から吸収された養分を葉や果実に運ぶ導管などから構成される主茎については，その硝酸濃度が体内全体の窒素栄養状態をより正確に反映すると推察される。

以上から，ハウス夏秋どりトマトにおける第1果房肥大期以降に行う窒素栄養診断は，診断部位を葉柄から主茎に変更することで経時的モニタリングが可能となり，硝酸濃度1500～3200 mg NO_3^- L^{-1}を基準値として設定し，これを逸脱した場合に追肥の有無を検討することができると考えられた。

表3　各部位の硝酸濃度範囲および硝酸濃度と窒素供給量の相関係数（「麗夏」，2019～2021年）

測定部位	項目	測定時期（果房肥大期）				
		第1	第2	第3	第4	第5
主茎（第1果房直下）	硝酸濃度	171～3229	0～2983	70～3576	0～2742	0～3621
	相関係数	0.92 **	0.92 **	0.91 **	0.92 **	0.94 **
葉柄（第1果房直下）	硝酸濃度	514～6594	0～10740	0～12819	0～13484	0～11665
	相関係数	0.92 **	0.94 **	0.65 **	0.89 **	0.79 **

1）硝酸濃度の単位はmg L^{-1}
2）窒素供給量（kg ha^{-1}）は施肥前40cmまでの残存硝酸態窒素量と窒素施肥量の合計
3）**は1%水準で有意

図1　第5果房肥大期の主茎硝酸濃度と果実収量の関係（品種：「麗夏」，2019～2021年）

1)数値は果実収量（単位：Mg ha^{-1}），()内数値はN350区の果実収量を100とした指数を示す
2)点線は各部位の基準値を示す

図2　各果房の果実肥大期における主茎および葉柄硝酸濃度の推移（「麗夏」，2019年）

3　主茎硝酸濃度と可視近赤外スペクトルとの関係

検量線作成用サンプルを用いて品種別の検量線と品種区分なしの検量線を作成し，その精度を検量線評価用サンプルで評価した。「麗夏」で作成した検量線はrが0.46，SEPが508 mg NO_3^- L^{-1}，EI（精度評価指標）が40.3％であり，検量線の実用性評価がランク「D」（実用性は乏しい）の判定であった（図3，表4）。同様に，「CF桃太郎ファイト」では，rが0.43，SEPが330 mg NO_3^- L^{-1}，EIが39.8％であり，検量線の実用性評価がランク「D」（実用性は乏しい）と判定された。一方，品種区分なしの検量線は，rが0.59，SEPが541 mg NO_3^- L^{-1}，EIが33.2％であり，検量線の実用性評価はランク「C」（実用性中程度）が得られ各々の品種による評価より向上した。「麗夏」は「CF桃太郎ファイト」に比べて2割程度多収で収量性が異なると考えられる。2品種を用いて作成した品種区分なしの検量線は品種別に作成した検量線に比べて他品種への適用幅が広く，より汎用性の高い検量線と考えることから，以下では品種区分なしの検量線を用いることとした。

4　Vis-NIR法を用いたトマトの非破壊窒素栄養診断への活用

主茎硝酸濃度を用いた窒素栄養診断法を生産現場に導入するために，3つの診断基準区分（基準値内「1500～3200 mg NO_3^- L^{-1}」，基準値未満「1500 mg NO_3^- L^{-1}未満」，基準値超過「3200 mg NO_3^- L^{-1}超過」）を設定し，主茎硝酸濃度の実測値に対する推定値の適合率を検討した（表5）。1株毎における全体の適合率は，実測値と同区分が60.8％（326/536点），1区分外れ38.2％（205/536点），2区分外れ0.9％（5/536点）と2区分外れが極めて低かったが，基準値超過「3200 mg NO_3^- L^{-1}超過」の区分ではサンプル点数が少なく，推定値の適合率が7.0％（4/57点）と著しく低かった。このことから，3200 mg NO_3^- L^{-1}超過の場合には診断精度に懸念が残った。

1株毎の診断では精度が劣ることから、5株の主茎硝酸濃度の実測平均値が含まれる区分と5株の推定値の内過半数が占める区分の適合率を検証した結果，適合率は実測値と同区分が72.9％（78/107点），1区分外れ27.1％（19/107点），2区分外れ0.0％（0/107点）と，1株毎の診断と比較して適合率が向上した（表5）。ただし，主茎硝酸濃度が3200 mg NO_3^- L^{-1}を超過する場合は，2区分外れはないもののすべて1区分外れ（8/8点）となり，ある程度は誤診のリスクが残ると考えられた。

以上のことを踏まえ，Vis-NIR法を用いた非破壊窒素栄養診断に基づく施肥対応は，従来の葉柄硝酸濃度に基づく方法から，診断部位と診断基準値を変更し，中庸な生育である5個体の過半数が含まれる区分を診断結果とし，5日後の再診断を組み合わせることとした（図4）。これにより，簡便で非破壊によるトマトの栄養診断と施肥対応が可能となり，生育・収量の安定化に寄与できると考える。今後は診断精度の向上や他作物への適用が期待される。

図3　主茎硝酸濃度の可視光・近赤外光センサー推定値と実測値の関係

表4　主茎硝酸濃度の推定式の推定精度

供試品種	検量線		検定					
	n	r	n	r	SEP[1)]	回帰式[2)]	EI(%)[3)]	EI評価[4)]区分
麗夏	308	0.57	329	0.46	508	y=0.23 x+1441	40.3	D
CF桃太郎ファイト	215	0.58	207	0.43	330	y=0.24 x+851	39.8	D
品種区分なし	523	0.68	536	0.59	541	y=0.38 x+970	33.2	C

1）SEP：予測標準誤差
2）y：硝酸濃度推定値，x:硝酸濃度実測値
3）EI = SDP（誤差標準偏差）×2×100/試料実測値の分布幅
4）区分A：実用性が極めて高い（≦12.4），B：実用性が高い（12.5 ～ 24.9），C：実用性が中程度（25.0 ～ 37.4），D：実用性が乏しい（37.5 ～ 49.9），E：実用性が極めて乏しい（≧50.0 ～）

表5　窒素栄養診断基準区分に対する判定適合率

評価方法	区分	適合率（%）			
		主茎硝酸濃度範囲（mg NO_3^- L^{-1}）			計
		～ 1500	1500 ～ 3200	3200 ～	
1株毎	実測値と同区分	67.5	66.7	7.0	60.8
	1区分外れ	32.5	33.3	84.2	38.2
	2区分外れ	0.0	0.0	8.8	0.9
5株の内過半数が含まれる区分	実測値と同区分	77.4	81.1	0.0	72.9
	1区分外れ	22.6	18.9	100	27.1
	2区分外れ	0.0	0.0	0.0	0.0

図4　窒素栄養診断に基づく施肥対応

（左：葉柄を用いた従来法[1)]，右：Vis-NIR法を用いた非破壊窒素栄養診断法）

謝　辞　本論文執筆にあたりご高閲を賜った北海道立総合研究機構中央農業試験場の後藤英次農業環境部長，本研究の遂行にあたり測定機械の開発にご協力いただいた（株）HKNエンジニアリングの本田博之氏，適切な圃場管理を実施いただいた北海道立総合研究機構道南農業試験場の研究支援の方々ならびに契約職員の方々に深く感謝の意を表します。

引用文献

1）北海道農政部．北海道施肥ガイド2020．北海道農政部，札幌，2020，p.98-99
2）前田建二郎，平良英三，上野正実，川満芳信，小宮康明．サトウキビの簡易栄養診断に向けた葉身窒素含量の近赤外測定法の開発．農業情報研究．17，105-110（2008）
3）水野和彦，石栗敏機，近藤恒夫，加藤忠司．近赤外線反射率測定法による乾草の成分および栄養価の推定．草地試験場研究報告．38，35-47（1987）
4）元木悟，染谷美和，樋口洋子，森本進，藤尾拓也，池浦博美．可視・近赤外分光法によるミニトマトの糖度およびリコペン含量の非破壊計測．日本食品保蔵科学会誌．44，145-153（2018）
5）永井耕介，吉川年彦，沢正樹，小林尚司，田中平義．近赤外分光法による農産物の非破壊品質評価（第2報）トマトの内部成分と食味についての分析ソフトの開発．日本食品低温保蔵学会誌．15，75-81（1989）
6）坂口雅己，日笠裕治，中住晴彦．ハウス夏秋どりトマトにおける窒素栄養診断法．日本土壌肥料学雑誌．75，29-35（2004）

Non-Destructive Technique for Nitrogen Nutrition Diagnostics of Tomato Using Visible and Near-Infrared Spectroscopy

Naota FURUBAYASHI[*1], Masami SAKAGUCHI and Yuji OHASHI

[*1] Hokkaido Research Organization Donan Agricultural Experiment Station（Present; Hokkaido Research Organization Central Agricultural Experiment Station, Naganuma, Hokkaido, 069-1395, Japan）
E-mail: furubayashi-naota@hro.or.jp