第1章 緒 論

第1節 研究の背景

温室やパイプハウスを用いた施設栽培ではフィルムなど太陽光線を透過する資材で圃場を被覆している．施設栽培では降雨が遮断されるほか，気温や地温が高まり，作物生育にとって有利な環境となるが，水分の蒸発散量が灌水量を上回るため，過剰な施肥が行われると残された肥料養分は地表に移動し塩類集積を引き起こす．施設栽培では主に野菜や花きが栽培されるが，一般的にこれらの作物は水稲や畑作物と比べ養分吸収量が多く，養分の要求量も多いため，窒素などの施肥は過剰傾向にある．施設土壌の塩類集積が進むと，灌水により硝酸態窒素が系外へ流亡する恐れがある(大村・坂本，2000)ほか，生理障害や収量の低下なども見られる．一方，冬期間にフィルムを除去するハウスでは硝酸態窒素などが融雪とともに流亡し，環境負荷の問題が生じる．したがって，施設土壌で作物を持続的に生産するためには，施肥量を作物が必要とする分にとどめ，土壌の塩類集積を防ぐ必要がある．

北海道における施設栽培の施肥管理では土壌診断と有機物の施用にともなう施肥対応が設定されている(北海道農政部，2010)．窒素の施肥対応では土壌硝酸態窒素含量に基づき窒素の基肥と分追肥量が区分され，有機物の種類および連用年数に基づき窒素の減肥可能量が算出される．しかし，施設栽培ではトマトのように追肥を幾度も行う品目が多く，このような品目では栄養生長と生殖生長が並行するため，一時期の養分の過不足が生育障害や収量の低下を招くこともある．生育期間を通じて適切な施肥を行うには，土壌診断に加え，作物の栄養生理に見合った肥培管理法を確立する必要がある．

葉色や汁液の養分濃度から作物体の栄養状態を測定する作物栄養診断は，追肥の判断など施用養分量の調節に有効な手段である．野菜では葉柄などを採取し，作物体内の養分濃度を直接測定する汁液診断が用いられることが多く，主に窒素の栄養状態が診断対象となる．作物汁液による窒素栄養診断では，葉柄などの硝酸イオン（以下，硝酸）濃度から作物の窒素栄養状態を診断する．例えば，トマトの標準的な施肥では，定植以降各果房の果実肥大期ごとに追肥を行っている(北海道農政部，2010)．このときに，栄養診断で作物の栄養状態を把握して追肥量を決定することにより，収量を安定的に確保しつつ，余分な施肥を削減させることが期待できる(図 1-1-1)．

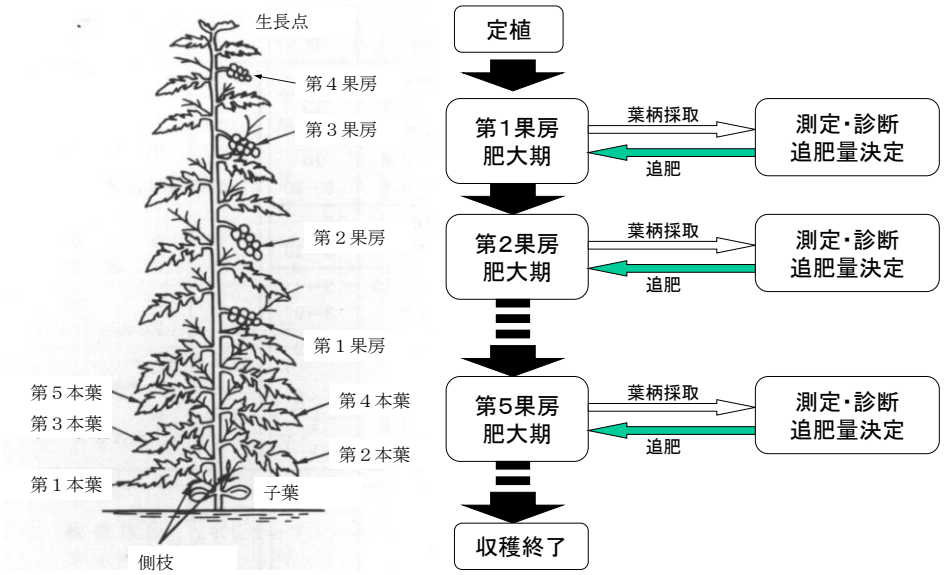


図 1-1-1 トマト栽培における栄養診断と追肥について（7段取りの場合）

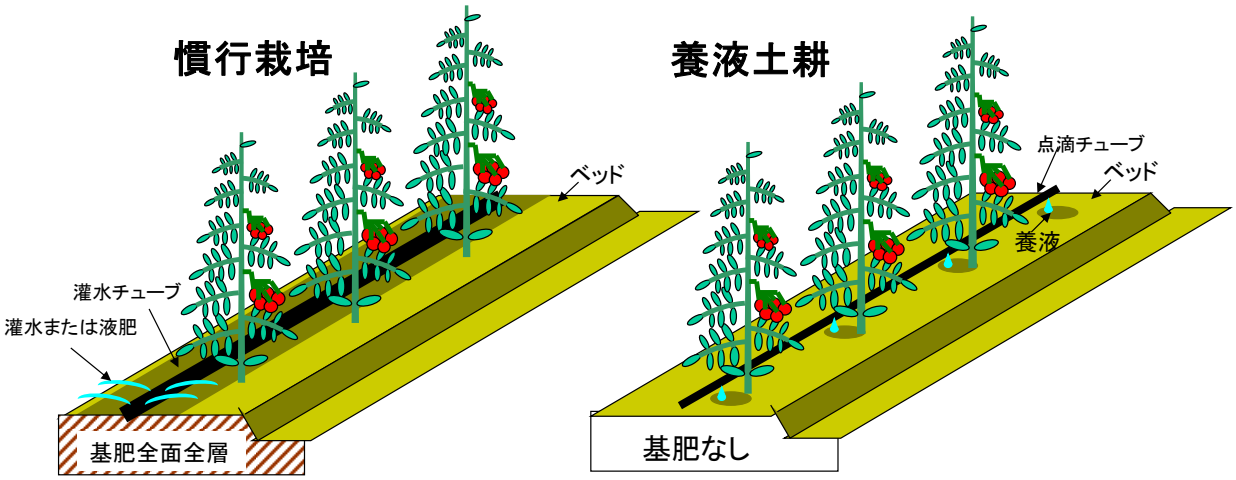


図 1-1-2 慣行栽培(左)と養液土耕(右)における施肥と灌水の特徴

もう一つ，効率的な肥培管理法として養液土耕(六本木・加藤，2000)が挙げられる．養液土耕は点滴灌水施肥，灌水同時施肥とも称され，点滴チューブを用いて作物の株元に肥料と水を同時に与える栽培法である．わが国において養液土耕が普及し始めたのは 1990 年代前半であり，導入戸数は 2002 年時点で少なくとも 1,000 戸を超え(荒木，2003)，2009 年における養液土耕システムの設置面積は全国で 1,243 ha，北海道で 39 ha となっている(農林水産省)．慣行栽培と養液土耕における施肥と灌水の特徴を図 1-1-2 に示した．慣行栽培(図 1-1-2 左)では定植前に基肥を全面全層施用するが，養液土耕(図 1-1-2 右)では定植後，株元に薄めた液肥(養液)を与えるため基肥を必要としない．また，慣行栽培では一度に多量の灌水を行うと，余剰水は土壌養分とともに系外に流亡する恐れがあるが，養液土耕では養水分を毎日必要量だけ与えることにより，環境への負荷は発生しにくくなる．養液土耕では株元に養分を与えるため，施肥利用率の向上と施肥量の節減が期待できる．また，作物の生育と栄養状態に合わせた施肥を行うことにより，施設土壌の塩類集積を防ぐ有効手段となる．

北海道における野菜栽培用施設（ガラス室，ハウスおよび雨よけ施設）の栽培延べ面積は 2009 年では 3,349 ha である．そのうち，トマトは 618 ha であり，メロン(720 ha)に次いで施設栽培面積の大きい品目である．北海道のトマト栽培ではハウス夏秋どりなど夏期に収穫を行う作型が主力となっており，2011 年の夏秋期(7～11 月)における収穫量は 44,000 t であり，都道府県別で 1 位となっている．北海道におけるトマトの栽培面積は 1990 年では 459 ha であったが，2005 年には 766 ha に増加し，近年は維持傾向にある(北海道農業協同組合連合会，2013)．トマトの栽培面積増加に伴い，新たにトマト栽培に取り組む生産者も増加している．栽培経験の少ない生産者が追肥など肥培管理の判断に不安を抱く場面も少なくない．そのため，トマトの栄養状態を客観的な尺度で捉える作物栄養診断が有効と考えられる．

第 2 節 既往の研究

1）作物汁液を用いた窒素栄養診断

野菜の窒素栄養診断の研究について，我が国では 1960 年前後に初めて報告されている(杉山・高橋 1958；景山 1961)．杉山・高橋(1958)は各種野菜における硝酸態窒素の含有量とその分布を測定し，景山ら(1961)はキュウリ，トマト，キャベツ，バレイショについて葉柄硝酸濃度と収量との関係を検討している．これらの報告における硝酸態窒素の分析操作は煩雑であり，労力と分光光度計などの分析機器を要したが，コンパクトイオンメータ(平岡ら，1990)や小型反射式光度計(建部・米山，1995)のように，硝酸イオンを生産現場で迅速に測定できる機器が利用できるようになると，窒素栄養診断は作物の栄養状態をその場で測定する「リアルタイム診断」(六本木，2007)として活用されるようになった．1990 年代以降，主に園芸作物を対象に窒素栄養診断の研究が国内の公的機関などによって行われるようになり，キュウリ(六本木，1991)，イチゴ(六本木，1992a；日笠ら，2009)，ナス（六本木，1992b），バレイショ(建部ら，2001)，キャベツ(Hikasa，1997；日笠，2000)，インゲンマメ(加藤ら，2009)等について栄養診断基準が設定された．トマトについては埼玉県(山﨑・六本木，1992)，愛知県（山田ら，1995），宮城県(上山ら，2004)，千葉県（山本ら，2005)等で栄養診断基準が設定されているが，栄養診断基準値は各県で異なっ

ている．また，栄養診断部位について山﨑・六本木(1992)は収穫期の果房直下葉としている他は，果実肥大期(果実がピンポン球大になった頃)の果房直下葉としている例が多い．これらの報告では，果実肥大期の果房直下葉が敏感に作物体の栄養状態を反映すると判断しているが，葉柄硝酸濃度と窒素施肥量との関係が判然としない事例が見受けられるほか，葉柄硝酸濃度が果実収量に与える影響について十分検証されていない．このことから，北海道で多く作付けされる夏秋どりトマトについて，独自の窒素栄養診断基準を設定する必要がある．

2）施設栽培における養液土耕技術

養液土耕による施肥の研究に関して，1970 年代後半にイスラエル(Bar-Yosef, 1977)，米国(Miller ら,1976)で報告があり，1980 年代以降は各国で研究事例が報告されている(Bar-Yosef, 1999)．国内では，伊藤・荒木(1985)が均衡かん水施肥によるマスフローを主体とした養分供給を検討している．1990 年代に養液土耕のシステムが生産現場に導入され始めると，国や府県の公的機関で養液土耕の研究が行われるようになった．国内では野菜，花き等を対象に養液土耕の研究が行われているが，果菜類を対象とした研究報告が多い．果菜類を対象とした養液土耕については，慣行施肥に対する減肥の可能性(玉井・大西，2002；山﨑，2002；山﨑・六本木，2002；荒木，2007)，土壌からの窒素供給量に基づく施肥法(荒木ら，2005；満田ら，2005)，根圏土壌の塩類ストレス軽減による生理障害の軽減効果(中野ら，2001)や土壌硬化の回避による根張りの向上(満田ら，2006)等が報告されている．また，国内の公的機関により各作物の養液土耕について養水分管理指針が設定されており，トマトに限定しても報告例は少なくない（田中，2003；上山ら，2004；國田ら，2004；山田ら，2005；伊藤・河井，2005；玉井，2005）．施設野菜の養液土耕における既往の報告では適正施肥量や土壌および葉柄汁液の適正範囲などが提案されているが，窒素施肥量が果実生産や施肥窒素利用率に与える影響については十分解明されていない．これは，既往の報告において無窒素区を設定していないなど施肥利用率を解析できない事例や，無窒素区を設定していても土壌からの窒素供給が潤沢であるため窒素施肥量の増減が収量や窒素吸収量を反映しにくい事例が多かったためである．一方，除塩を行った隔離床(林ら 2003)や土壌の残存無機態窒素が少ない露地栽培(安・池田 2009；植田ら 2009)では，トマト，ナスおよび葉菜類を対象に養液土耕における窒素施肥量の増減が窒素吸収量や施肥窒素利用率に与える影響を表現できている．施設栽培土壌において施肥と養分吸収との関係を正確に把握するためには，土壌無機態窒素をクリーニングクロップで持ち出すなど、土壌からの窒素供給を低く抑えた条件で施肥試験を行う必要がある．

研究の目的

本研究の目的は，施設土壌における塩類集積を回避し，作物を持続的に生産するために，作物の栄養生理に見合った肥培管理技術を確立することである．

本研究の第 2 章では代表的な施設野菜であるトマトについて窒素栄養診断法を検討した(坂口ら，2004a)．また，現地生産者の圃場で窒素栄養診断を実践し，果実収量の向上，減肥および土壌残存窒素の低下について検証した(坂口ら，2004b)．第3章ではトマトの窒素栄養生理に基づいた養液土耕栽培法を確立するため，はじめに養液土耕における施肥窒素利用率を算出し，各生育時期における適正窒素施肥量を設定した(坂口ら，2013)．次に，窒素栄養診断基準を設定するにあたり，各時期の窒素施肥量が葉柄硝酸濃度に及ぼす影響と葉柄硝酸濃度が果実収量や葉の窒素含有率に及ぼす影響を検討した．また，土壌硝酸態窒素が蓄積した生産者圃場において生育の制御が難しくなる事例が見受けられたため，対応策として，硝酸態窒素残存時の窒素施肥対応と生育初期における窒素栄養診断法を検討した．

第２章　ハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断法

第１節　葉柄汁液を用いた窒素栄養診断法の確立

1．はじめに

作物体の栄養診断は施用養分量を調節することを可能にし，環境への負荷を軽減する有効な手段の一つである．トマトは生育期間が比較的長く，栄養生長と生殖生長が並行して進行するため，定植以降各果房の果実肥大に合わせて追肥を行う．そのため栄養診断により作物の栄養状態を把握して追肥判断に活用したいという要望が大きい．

本節では，北海道で作付け面積が多いハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断法について検討した．

2．試験方法

1)耕種概要

試験は 1999 年と 2000 年に北海道北斗市の道南農業試験場のビニールハウスにおいて実施した．供試圃場の土壌は中粗粒褐色低地土であり土壌化学性は表 2-1-1 に示した．

品種は「ハウス桃太郎」を供試した．播種は 3 月中旬に，定植は５月中旬に行った．栽植様式はベッド幅 120cm の２条植え，通路 80cm，株間 30cm で，密度は 33300 株 ha^{-1} とし，試験規模は1区８㎡とし，２反復で行った．整枝は主枝１本仕立を行い，第 7 果房の上位の葉 2 枚を残して摘心した．収穫は７月上旬から９月中・下旬まで行った．供試圃場におけるハウスフィルムの素材は 1999 年は塩化ビニル，2000 年はフッ素樹脂フィルムであった．

2)試験処理

各処理区における窒素の基肥および追肥量を表2-1-2に示した．1999 年の窒素施肥は基肥，追肥ともに硫安を用い，基肥量を0，50，100，200，400kg N ha^{-1}の５処理，追肥量を100，200kg N ha^{-1}の２処理とした．2000 年は基肥量を0，100，200，400kg N ha^{-1}の４処理，追肥総量を 100，200，400kg N ha^{-1}の３処理とした．追肥は北海道施肥標準に従って，第1～5果房の果実がピンポン玉大に肥大した時点に行った．リンは重過石を用い，基肥として 87kg P ha^{-1} (200kg P_2O_5 ha^{-1})を各区共通に施肥した．加里は基肥，追肥ともに硫加を用い，基肥を 87kg K ha^{-1} (200kg K_2O ha^{-1}) 共通に施肥し，追肥は窒素と同時にK_2O換算で窒素と同量を施肥した．

3)調査および分析方法

葉柄硝酸濃度の測定について，第 1～5 果房の果実がピンポン玉大に肥大した追肥前日の午前 9 時～正午の間に全果房直下葉の先端小葉葉柄を採取した．予備調査において先端小葉葉柄は他の小葉葉柄と比べ硝酸濃度がやや高く，含有率の標準偏差が小さいことから採取位置とした(表 2-1-3)．1 回の採取につき各試験区から 3 株ずつ葉柄を採取したが，1 区分では分量が足りなかったため，2 反復分の葉柄を合わせて 1 試料とした(葉柄硝酸濃度の反復なし)．新鮮または風乾した葉柄を乳鉢で磨砕後，蒸留水で希釈抽出し，抽出液についてオートアナライザー(BRAN+LUEBBE AACS-Ⅱ)を用いて硝酸濃度（新鮮重あたりの硝酸濃度 mg NO_3^- L^{-1})を測定した．

収量調査について，各処理区中央の 8 株を調査株とした．週 1 回または 2 回，着色した果実を収穫した．収穫の前期(収穫 1～3 週目)，中期(収穫 4～7 週目)，後期(収穫 8～11 週目)において各１回または２回，果実糖度(Brix)を測定するとともに，果実を 60～70℃で通風乾燥し，乾物生産量を求めた．

茎葉および樹上果実の養分吸収量は収穫終了時に全処理区で 4 株を採取し，調査した．採取した株を葉，茎および果実に分け，それぞれを 60～70℃で通風乾燥し，乾物生産量を求めた．乾物試料について硫酸－過酸化水素分解(水野ら，1980)を行い，分解液中のアンモニア態窒素をオートアナライザーで測定し，各部位の窒素含有率から窒素吸収量を算出した．

葉柄採取時および栽培終了時に，トマト株間中間点の土壌を採取し，土壌硝酸態窒素を調査した．風乾土中の無機態窒素を 100g L^{-1} 塩化カリウム溶液で抽出し，抽出液中の硝酸態窒素はオートアナライザーで測定した．

試料数について 1999 年の葉柄硝酸濃度は 6 月 4 日は n=5，以降は n=6，2000 年は６月７日は n=4，以降は n=8 である．果実収量および窒素吸収量の試料数は 1999 年は n=12，2000 年は n=16 である．土壌硝酸態窒素含量の試料数は 1999 年の葉柄採取時期は n=6，栽培終了時は n=12，2000 年は葉柄採取時期，栽培終了時ともに n=16 である．

表 2-1-1 供試圃場の土壌化学性(栽培前, 0～20cm 深)

年次	pH (H_2O)	EC (dS m^{-1})	硝酸態窒素 (mg N kg^{-1})	可給態P[1)] (mg P kg^{-1})	交換性塩基(mg kg^{-1}) K	Ca	Mg
1999年	5.7	0.37	0	91	123	3304	330
2000年	5.8	0.06	2	79	335	2652	365

1) 可給態Pはトルオーグ法による

表 2-1-2 各処理区における窒素の基肥および追肥量 (kg N ha^{-1})

1999年 処理区	基肥	追肥 1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	合計
N 0+100	0	20	20	20	20	20	100
N 0+200	0	40	40	40	40	40	200
N 50+100	50	20	20	20	20	20	150
N100+200	100	40	40	40	40	40	300
N200+200	200	40	40	40	40	40	400
N400+200	400	40	40	40	40	40	600
施肥月日	5/12	6/5	6/23	7/2	7/14	7/23	

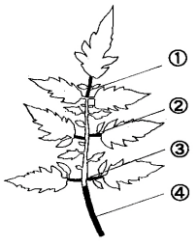
2000年 処理区	基肥	追肥 1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	合計
N 0+100	0	20	20	20	20	20	100
N100+100	100	20	20	20	20	20	200
N100+200	100	40	40	40	40	40	300
N100+400	100	80	80	80	80	80	500
N200+100	200	20	20	20	20	20	300
N200+200	200	40	40	40	40	40	400
N200+400	200	80	80	80	80	80	600
N400+200	400	40	40	40	40	40	600
施肥月日	5/14	6/8	6/24	7/2	7/11	7/20	

注) N100+200区は北海道における窒素施肥標準量に相当

表 2-1-3 予備調査における葉柄部位と硝酸濃度の変動

小葉の部位	葉柄硝酸濃度の4部位平均を100とした時の硝酸濃度指数 平均値[1)]	標準偏差	変動係数
①	115	11.9	10.4
②	105	16.7	15.9
③	93	12.9	13.9
④	90	17.2	19.2

1) n = 8, 全平均の実数値は4073mg NO_3^- L^{-1}



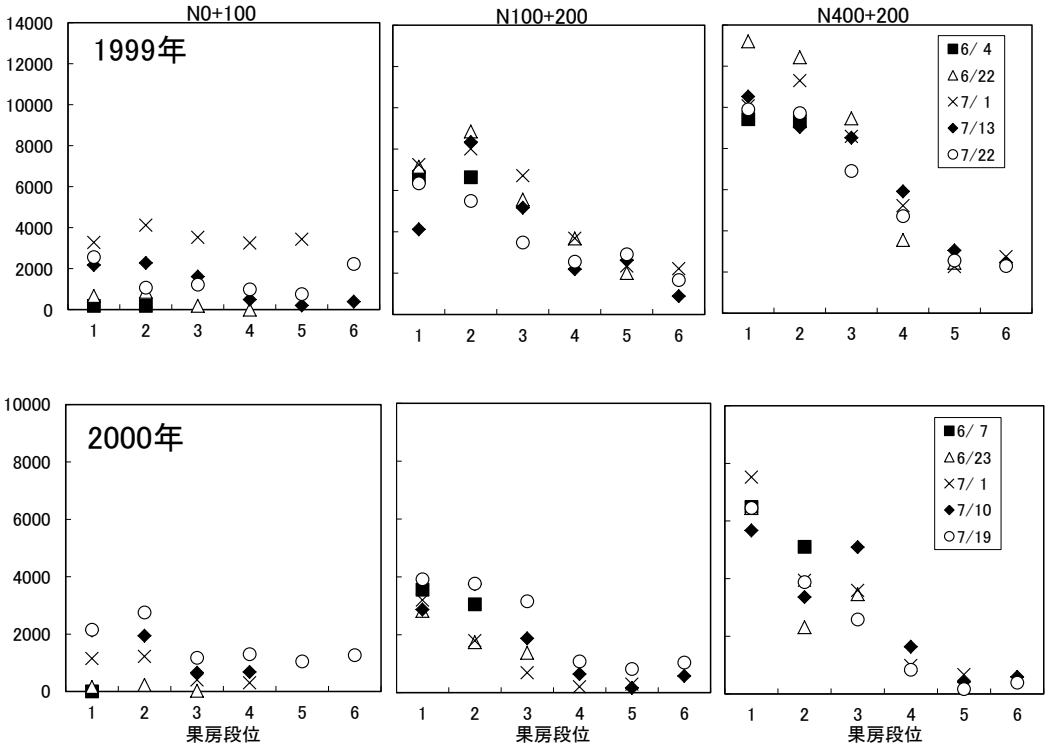


図 2-1-1 窒素施肥量別の各果房直下葉における葉柄硝酸濃度

表 2-1-4　各果房直下葉の葉柄硝酸濃度と積算窒素施肥量の相関

果房段位	測定月日(1999年) 6/4	6/22	7/1	7/13	7/22
第１	0.853	0.925 **	0.924 **	0.920 **	0.937 **
第２	0.879 *	0.849 *	0.931 **	0.827 *	0.907 *
第３		0.932 **	0.872 *	0.925 **	0.914 *
第４		0.760	0.665	0.894 *	0.550
第５		0.724	-0.398	0.491	0.254
第６			0.764	0.629	0.070

果房段位	測定月日(2000年) 6/7	6/23	7/1	7/10	7/19
第１	0.875	0.842 **	0.920 **	0.757 *	0.753 *
第２	0.886	0.420	0.658	0.449	0.302
第３		0.790 *	0.596	0.808 *	0.236
第４			0.400	0.582	-0.138
第５			0.206	0.437	-0.802 *
第６				0.551	-0.740 *

*は相関が5%水準、**は1%水準で有意であることを示す。

表 2-1-5　各処理区における果実収量および窒素吸収量

1999年 処理区	果実収量 (Mg ha^{-1})	窒素吸収量(kg N ha^{-1}) 茎葉	果実	合計
N　0+100	72	45	75	120
N　0+200	97	78	87	165
N 50+100	81	58	68	126
N100+200	112	107	96	202
N200+200	108	132	99	231
N400+200	110	139	100	240

2000年 処理区	果実収量 (Mg ha^{-1})	窒素吸収量(kg N ha^{-1}) 茎葉	果実	合計
N　0+100	104	61	108	170
N100+100	140	104	141	245
N100+200	158	124	191	315
N100+400	161	135	190	325
N200+100	151	128	178	306
N200+200	166	144	196	340
N200+400	167	143	208	352
N400+200	180	141	224	365

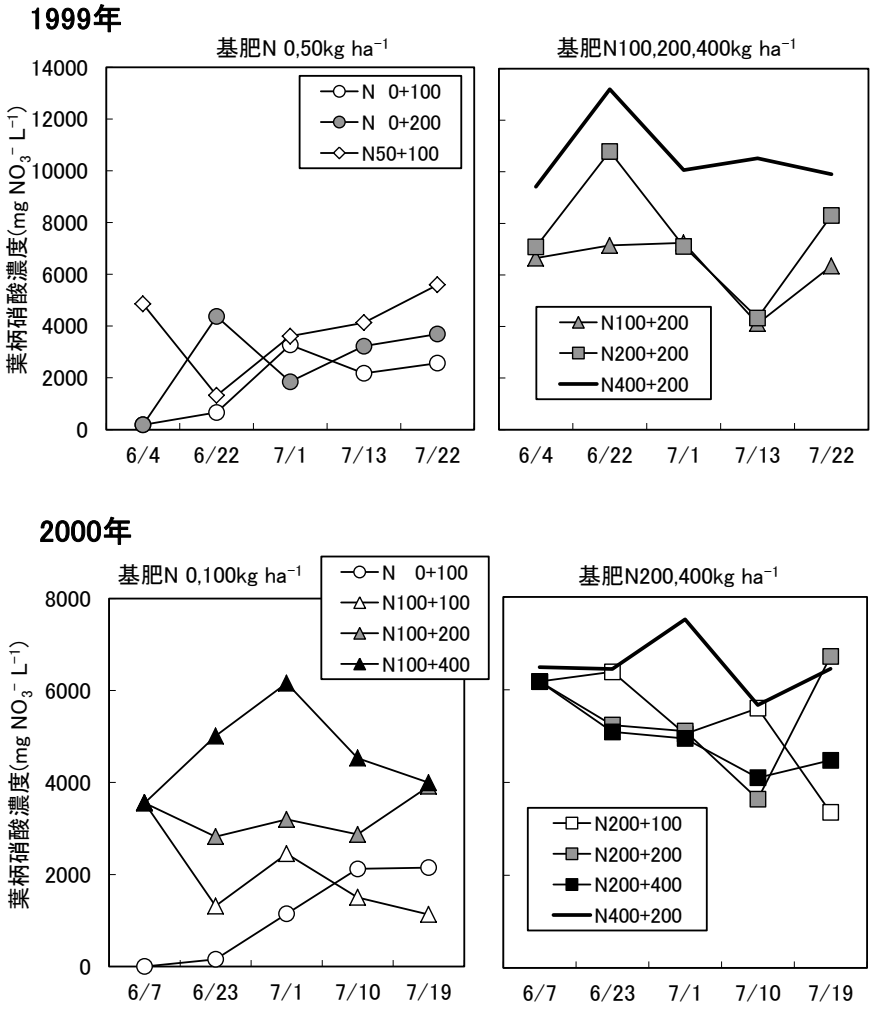


図 2-1-2　各処理区における第1果房直下葉葉柄硝酸濃度の推移

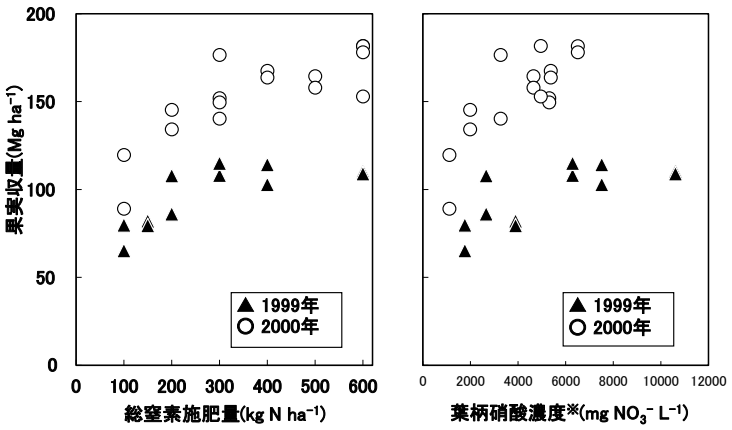


図 2-1-3 総窒素施肥量(左)および葉柄硝酸濃度(右)と果実収量の関係

※葉柄硝酸濃度は第1～5果房肥大期に測定した第1果房直下葉葉柄硝酸濃度の平均値

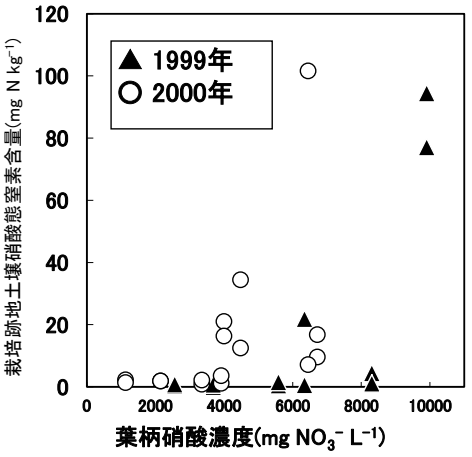


図 2-1-5 収穫期(第5果房肥大期)における第1果房直下葉葉柄硝酸濃度と栽培跡地土壌硝酸態窒素含量の関係

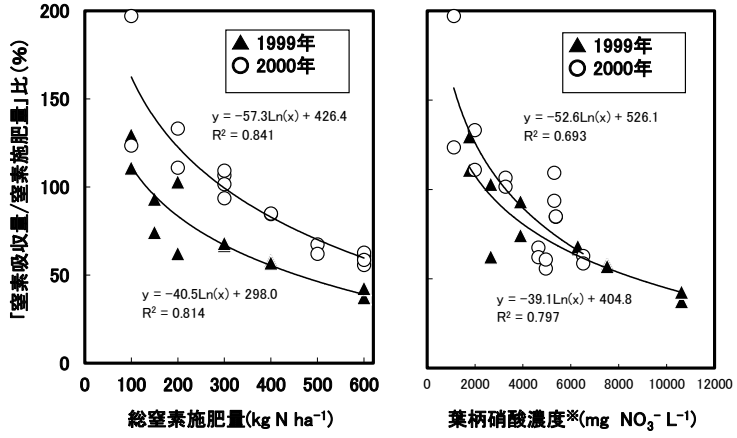


図 2-1-4 総窒素施肥量(左)および葉柄硝酸濃度(右)と「窒素吸収量/窒素施肥量」比の関係

※葉柄硝酸濃度は第1～5果房肥大期に測定した第1果房直下葉葉柄硝酸濃度の平均値

3. 結果

窒素施肥量が最も少ない N0+100 区，北海道の施肥標準区である N100+200 区，窒素施肥量が最も多い N400+200 区について各果房直下葉における葉柄硝酸濃度を図 2-1-1 に示した．葉柄硝酸濃度は下位葉で高く上位になるほど低くなった．第4～6果房直下葉の葉柄硝酸濃度は窒素施肥処理や採取時期に関わらず低かった．第1～3果房直下葉の葉柄硝酸濃度は第4～6果房直下葉と比べ高く推移した．また，第1～3果房直下葉の葉柄硝酸濃度は窒素施肥量の増加に伴って高まった．図に表示されていない他の処理区についても同様の傾向が認められた．

各果房直下葉の葉柄硝酸濃度と積算窒素施肥量の相関を表 2-1-4 に示した．第4～6果房直下葉の葉柄硝酸濃度は積算窒素施肥量との相関が低く，窒素供給量を反映しなかった．一方，第1～3果房直下葉の葉柄硝酸濃度は上位葉と比べ積算窒素施肥量との相関が高かった．特に第1果房直下葉は2カ年通して高い正の相関を示した．

各処理区における収量および窒素吸収量を表 2-1-5 に示した．1999 年における収量は総窒素施肥量 100～300kg N ha^{-1} の範囲では窒素施肥量の増加に伴って高くなり，N100+200 区の 112Mg ha^{-1}が最高であった．300kg N ha^{-1}

以上では窒素施肥量が増加しても収量は増加しなかった．窒素吸収量は窒素施肥量の増加に伴って高くなり，N100+200 区で合計 202kg N ha^{-1}, N400+200 区で合計 240kg N ha^{-1}となった．

2000 年は 1999 年に比べ全体的に収量水準が高い傾向にあった．収量は窒素施肥量の増加に伴って高くなり，N400+200 区の 180Mg ha^{-1}が最高であった．窒素吸収量は窒素施肥量の増加に伴って高くなり，N100+200 区で合計 315kg N ha^{-1}, N400+200 区で 365kg N ha^{-1}となった．

各処理区における第 1 果房直下葉葉柄硝酸濃度の推移を図 2-1-2 に示した．1999 年における基肥 N が 0kg N ha^{-1}系列では葉柄硝酸濃度は 0～4,000mg NO_3^- L^{-1}の範囲で推移した．N50+100 区では 1,000～6,000mg $NO_3^-L^{-1}$の範囲で推移した．N100+200 区，N200+200 区および N400+200 区ではそれぞれ 4,000～7,000mg NO_3^- L^{-1}, 4,000～11,000mg NO_3^- L^{-1}および 10,000～13,000mg $NO_3^-L^{-1}$の範囲で推移した．

2000 年における葉柄硝酸濃度は 1999 年と比べ全体的に低い傾向にあった．N0+100 区では葉柄硝酸濃度は 0～2000mg NO_3^- L^{-1}の範囲で推移した．N100+100 区，N100+200 区および N100+400 区ではそれぞれ 1,000～3,500mg $NO_3^-L^{-1}$, 3,000～4,000mg $NO_3^-L^{-1}$および 3,500～6,000mg $NO_3^-L^{-1}$の範囲で推移した．基肥 N が 200kg N ha^{-1}系列において N200+100 区の葉柄硝酸濃度は 3,355mg NO_3^- L^{-1}まで低下したが，N200+200 区と N200+400 区ではそれぞれ 4,000～7,000mg NO_3^- L^{-1}, 4,000～6,000mg NO_3^- L^{-1}の範囲を推移した．N400+200 区では 6,000～7,500mg $NO_3^-L^{-1}$の範囲を推移した．

総窒素施肥量と果実収量の関係を図 2-1-3 左に示した．1999 年の収量は総窒素施肥量 300kg N ha^{-1}で最高になったが，2000 年の収量は 1999 年に比べ全体的に高く，総窒素施肥量 600kg N ha^{-1}で最高になった．

葉柄硝酸濃度と果実収量の関係を図 2-1-3 右に示した．いずれの年も収量は葉柄硝酸濃度 6,000mg $NO_3^-L^{-1}$程度で収量が最高になり，4,000mg $NO_3^-L^{-1}$以下では大きく減少した．総窒素施肥量と窒素吸収量/窒素施肥量比の関係を図 2-1-4 左に示した．窒素吸収量/窒素施肥量比は総窒素施肥量の増加に伴って低下した．1999 年では総窒素施肥量 300kg N ha^{-1}における窒素吸収量/窒素施肥量比が約 70%であったが，2000 年では約 100%であった．このように，同一総窒素施肥量における窒素吸収量/窒素施肥量比は年次間の収量水準により異なった．一方，葉柄硝酸濃度と窒素吸収量/窒素施肥量比の関係（図 2-1-4 右）を見ると，1999 年と 2000 年で葉柄硝酸濃度と窒素吸収量/窒素施肥量比はほぼ同一線上となった．

収穫期における葉柄硝酸濃度と栽培跡地土壌硝酸態窒素含量の関係を図 2-5 に示した．1999 年および 2000 年における跡地土壌硝酸態窒素は収穫期の葉柄硝酸濃度がそれぞれ 6,000mg $NO_3^-L^{-1}$, 4,000mg $NO_3^-L^{-1}$を超えると残存が確認され，葉柄硝酸濃度が高まるほど残存量が高まる傾向にあった．

4．考察

1）栄養診断部位の決定

トマトの葉柄硝酸濃度は下位葉で高く上位になるほど低下する傾向にあった（図 2-1-1）．その傾向は，日笠(2000)，He ら(1998)，李ら(1991)，山田ら(1995)の報告と同様であった．宍戸ら(1991)はトマト葉の光合成速度および窒素含有率は展開後の若い時期で高く，生長および時間の経過に伴って低くなると述べている．Fonseka ら(1997)はバレイショの葉中窒素濃度と硝酸還元酵素活性とは強い正の相関があると述べている．宍戸ら(1990)は果房のシンク活性は果実肥大が盛んになるにつれ高くなり，肥大が鈍化するとシンク活性が低くなると述べている．これらのことから，若い上位葉は葉身の光合成速度や硝酸還元酵素活性が高く，近傍にある肥大果房および生長点のシンク活性が高いため，下位葉と比べ葉柄硝酸濃度が常に低くなると考えられた．

葉位によって葉柄硝酸濃度が大きく異なることから，診断部位と時期を決定することは作物の窒素栄養診断を行う上で重要である．トマトの栄養診断部位について，景山ら(1961)は枯葉を除いて下部より 3～5 葉上部の成葉，山田ら(1995)は直径 2～3cm 程度に肥大した果房直下葉を採取部位としている．また海外では，最も若い成葉を診断部位とした報告が多い(Coltman ，1988；Andersen ら，1999；Locascio ら，1997)．

本試験を行ったハウスは定植前土壌の残存窒素が少なく，過去数年にわたって堆肥を施用していない．この条件では窒素施肥量と葉柄硝酸濃度の相関が高い部位が栄養診断葉位として適当と想定した．本試験では第1果房直下葉は葉柄硝酸濃度と積算窒素施肥量との相関が常に高かったため栄養診断部位として適当と考えられた（表 2-1-4）．また，第1果房直下葉は葉柄硝酸濃度と葉柄採取時の土壌硝酸態窒素含量との相関も 1999 年は n=6, r=0.579～0.900, 2000 年は n=16, r=0.609～0.911 と高いため土壌中の硝酸態窒素含量の増減にも対応すると考えられた．

一方，上位葉の葉柄硝酸濃度はいかなる窒素施肥量や生育時期においても低く（図 2-1-1），積算窒素施肥量との相関も低かったため（表 2-1-4），栄養診断に利用する事は困難と考えられた．

トマトにおいて最も若い成葉を診断部位とした事例では，

Coltman(1988)は10月から翌4月までの養液栽培において葉柄硝酸濃度と収量は高い相関を示し，栄養診断が施肥の効率化に有効な手段であると述べている．しかし，Andersenら(1999)は5月定植の土耕栽培において定植7週目の葉柄硝酸濃度では窒素施肥量及び果実収量と有意な相関があったが，13 週目では相関が得られなかったと報告している．また，Locascio ら(1997)は複数地点の春期定植の点滴かん水施肥栽培において定植 6 週目までは葉柄硝酸濃度が窒素施肥量を反映したが，定植 12 週目では葉柄硝酸濃度が各処理区とも無施肥区並に低下したことを示している．吉岡ら(1977)はトマトにおいて高照度，高夜温，高地温，低窒素条件で光合成産物の転流が速やかになると述べている．Onoら(1996)はヒマワリにおいて強光条件では弱光条件と比べソース葉からシンクへ窒素の転流が促進されると述べている．これらのことから，夏を生育期間とする夏秋どり作型は冬を生育期間とする促成作型と照度や気温条件が大きく異なり，肥大果房や生長点などのシンク活性に差が生じる．そのため生育時期におけるシンク活性が強い夏秋どり作型では上位葉の葉柄硝酸濃度は窒素施肥量に関わらず低くなり，トマトの窒素栄養状態をあまり反映しないと考えられた．一方，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．下位葉に輸送されてく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される．下位葉の葉柄は窒素栄養が過剰なときは硝酸が蓄積し，低下すると蓄積していた硝酸が他の部位へ輸送されるため，トマトの窒素栄養状態を反映すると考えられた．

葉柄の採取時間帯について本試験では午前 9 時～正午の間としているが，著者らは午前 10 時頃と午後 6 時頃における第 1 果房直下葉葉柄硝酸濃度の差がおおむね±10%以内に収まっていることを確認している(坂口ら，2003a)．また，He ら(1998)は葉柄採取日の天候や時刻が異なってもトマト葉柄汁液の無機養分濃度の変動は小さいことを示している．

2）葉柄硝酸濃度と生育量の関係

単年度で比較した場合，窒素施肥量が多くなるに従い窒素吸収量および葉柄硝酸濃度は高まる傾向にあった（表 2-1-5，図 2-1-2）．一方，年次で比較すると，同一窒素施肥量における窒素吸収量は 2000 年の方が多い傾向にあったが（表 2-1-5），葉柄硝酸濃度は 2000 年の方が低い傾向を示した（図 2-1-2）．山田ら(1995)は促成栽培トマトにおいて施肥量が多い区ほど葉柄硝酸濃度は高く推移し，施肥窒素の利用率が低下することを示している．田中ら(1980)はコマツナにおいて遮光条件では窒素吸収量が低下し，生体内の硝酸態窒素含量が高くなると述べている．

本試験では 2000 年の圃場は 1999 年の圃場と比べ光透過性が優れる素材のハウスフィルムを被覆していた．2カ年における光条件の違いがそれぞれの窒素吸収量および葉柄硝酸濃度に影響を与えたと考えられた．これらの現象から葉柄硝酸濃度が高まる理由として，次のことが考えられる．第1は根からの硝酸の吸収量が非常に多い場合．第2は日照不足などによって炭素同化が抑えられ，根から吸収された硝酸がアミノ酸まで十分同化されない場合である．葉柄硝酸濃度は窒素の吸収が同化よりも相対的に速い場合に上昇すると考えられた．一方，収量水準が高い 2000 年は，炭素や窒素の同化が速く，生育量が増加すると同時に葉柄に蓄積する硝酸の量が減るため葉柄硝酸濃度は低くなったと考えられた．

収量水準や窒素吸収量の異なる 1999 年と 2000 年を比較すると，総窒素施肥量と窒素吸収量/窒素施肥量比との関係における回帰線は離れているが（図 2-1-4 左），葉柄硝酸濃度と窒素吸収量/窒素施肥量比はほぼ同一線上となった（図 2-1-4 右）．このように葉柄硝酸濃度は窒素施肥量よりも窒素吸収量/窒素施肥量比をよく反映しており，窒素の需要と供給のバランスを示す一種の指標になると考えられる．このことは葉柄硝酸濃度が施肥窒素の利用率を普遍的に表現できることを示唆している．

3）栄養診断基準値の設定

収量はいずれの年も葉柄硝酸濃度 6,000mg NO_3^- L^{-1}程度で最大になった．また 4,000mg NO_3^- L^{-1}以下では収量が大きく減少した（図 2-1-3 右）．1999 年における N50+100 区は大半の時期で葉柄硝酸濃度が 4,000～6,000mg NO_3^- L^{-1}で推移していたが，6 月 22 日に 1,318mg NO_3^- L^{-1}に低下しており（図 2-1-2），収量は最高収量であった N100+200 区の 72%にとどまった（表 2-1-5）．1999 年において収量が最高であった N100+200 区は 2000 年では葉柄硝酸濃度が 3,000～4,000mg NO_3^- L^{-1}を推移しており（図 2-1-2），収量は最高収量であった N400+200 区の 88%にとどまった（表 2-1-5）．これらのことから十分な収量を得るため葉柄硝酸濃度は 4,000mg NO_3^- L^{-1}以上を維持する必要があると考えられた．

窒素吸収量/窒素施肥量比は葉柄硝酸濃度が高まるに伴って低下した（図 2-1-4 右）．また，収穫期の葉柄硝酸濃度が高まるにつれ栽培跡地土壌硝酸態窒素含量は高まる傾向があった（図 2-1-5）．施肥窒素の利用率向上と跡地土壌への硝酸態窒素残存を低減させるため，葉柄硝酸濃度の上限を設定する必要がある．葉柄硝酸濃度が上限を超えた場合には追肥を省略することになるが，一方で減肥による減

表 2-1-6　ハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断に基づく施肥対応

診　断　部　位	:	第１果房直下葉の先端小葉葉柄
栄養診断基準値	:	葉柄硝酸濃度 4000～7000mg NO_3^- L^{-1}
診　断　時　期	:	各果房の果実がピンポン玉大になった時点 （摘心位下方３段目まで）
追　肥　時　期	:	診断直後
窒素施肥対応	:	4000mg NO_3^- L^{-1}未満　－ 40kg N ha^{-1}追肥．５日後に再度診断し， 7000mg NO_3^- L^{-1}以下の場合，40kg N ha^{-1}追肥 4000～7000mg NO_3^- L^{-1}－ 40kg N ha^{-1}追肥（施肥標準のとおり） 7000mg NO_3^- L^{-1}を超える場合は追肥を省略する

収のリスクを回避する必要がある．

1999 年において最高収量であった N100+200 区の葉柄硝酸濃度は 4,000～7,000mg NO_3^- L^{-1}の範囲で推移した．同区における栽培跡地の土壌硝酸態窒素含量は平均 11.3mg N kg^{-1}に抑えられていたため，施肥管理は適切であり，追肥の省略は減収の恐れがあると考えられた．N200+200 区および N400+200 区の葉柄硝酸濃度はそれぞれ 4,000～11,000mg NO_3^- L^{-1}，10,000～13,000mg NO_3^- L^{-1}の範囲で推移していたが，収量は N100+200 区以下であったため（図 2-1-2，表 2-1-5）葉柄硝酸濃度は 7,000mg NO_3^- L^{-1}より高く推移しても収量は向上しないと考えられた．これらのことから，葉柄硝酸濃度が 7,000mg NO_3^- L^{-1}を越える場合は追肥を省略できると考えられた．

以上のことから，ハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断に基づく施肥対応を表 2-1-6 のように示した．なお，本診断基準値は生育障害がないことを前提としたものであり，病害虫など生育障害が発生した場合には生育障害の対策を優先する．

5. 要約

ハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断法を設定した．

1）下位葉の葉柄硝酸濃度は上位葉と比べ高く，積算窒素施肥量との相関も高いためトマトの窒素栄養状態を反映していた．特に，第1果房直下葉の葉柄硝酸濃度は積算窒素施肥量と常に高い相関を示し，窒素栄養診断の採取葉位として最適であった．

2）2000 年は 1999 年に比べ全体的に収量および窒素吸収量が高く，葉柄硝酸濃度は低かった．これは根から吸収された硝酸が速やかに同化され，葉柄に蓄積する硝酸の量が減ったためと考えられた．また，2 カ年における光条件の差がそれぞれの窒素吸収量と葉柄硝酸濃度に影響を与えていると考えられた．

3）収量は 2 カ年とも葉柄硝酸濃度 6,000mg NO_3^- L^{-1}程度で最大となり，4,000mg NO_3^- L^{-1}以下では大きく減少した．

4）葉柄硝酸濃度が高まるに伴って窒素吸収量/窒素施肥量比が低下し，跡地の硝酸態窒素含量が高まったことから，葉柄硝酸濃度は施肥窒素の利用率を反映していた．

5）以上のことから第1果房直下葉を窒素栄養診断の採取葉位とした．収量，窒素吸収量/窒素施肥量比および跡地の残存窒素を考慮し，栄養診断基準値を葉柄硝酸濃度 4,000～7,000mg NO_3^- L^{-1}と設定した．

第 2 節 窒素栄養診断法の有効性実証

1. はじめに

1990 年代後半より北海道では夏秋どりトマトの栽培面積が拡大しており，新たにトマト栽培に取り組む生産者が増加している．草勢の観察から栄養状態を判断する肥培管理は多くの経験が必要であり，初めてトマトを栽培する生産者がその判断に不安を抱く場面も少なくない．

前節において確立したトマトの窒素栄養診断法では，トマト葉柄汁液の硝酸濃度を計測することで窒素栄養状態を把握できる．窒素栄養診断法を活用することで，トマト栽培経験者には減肥による肥料コスト削減や環境負荷の低減，栽培初心者には熟練者と対等な水準で施肥管理ができるメリットがあると想定できる．本節では現地の生産者圃場で窒素栄養診断を実施し，果実収量や生産額の向上，減肥について実証するとともに，栄養診断技術の普及定着を目指した(坂口，2003b).

2. 試験方法

1）現地実証試験

北海道北斗市の生産者 A 氏圃場（灰色低地土）で実施した．圃場内でビニールハウス2棟を選定し，試験ハウスと慣行ハウスとした．試験ハウスの施肥については作付け前の土壌診断に基づいて基肥量を決定し，追肥は栄養診断に基づいて対応した．慣行ハウスでは生産者の慣行で施肥を行った．堆肥（牛ふんバーク堆肥）は 2001 年には両ハウスとも 40 Mg ha^{-1} 施用した．2002 年には試験ハウスは 20Mg ha^{-1}，慣行ハウスは 40 Mg ha^{-1} とした．品種は 2001 年は「ハウス桃太郎」，2002 年は「みそら」を供試した．栽植様式は幅 5.4m のビニールハウスに 3 ベッドの 2 条植え，株間を 40cm(栽植密度 27,800 株 ha^{-1})とした．定植は 5 月下旬，収穫段数は 6 段で収穫期間は 2001 年は 7 月 16 日～9 月 22 日，2002 年は 7 月 22 日～10 月 10 日であった．収量調査は各ハウスの全体を対象としており，反復は設けなかった．収穫はJA新はこだて大野支店の集荷日ごとに行われ，各ハウスの可販果収量および規格区分は JA 新はこだて大野支店の集計データに基づいた．

栄養診断は各果房の果実がピンポン玉大になった日に行った．栄養診断の操作は以下の手順で行った．(1)トマト5株以上から第1果房直下葉の先端小葉を採取．(2)葉柄 1.0 g を乳鉢で摩砕し，蒸留水を 49 ml を加え希釈．(3)希釈液を小型反射式光度計(Merck RQ flex)で硝酸濃度を測定．葉柄硝酸濃度について試料の反復は設けなかった．

図 2-2-1 青年農業者がそれぞれトマトの葉を持ち寄り，葉柄硝酸濃度を測定している

表 2-2-1 試験ハウス(上)と慣行ハウス(下)における施肥量(2001 年)

試験ハウス

		養分施肥量(kg ha^{-1})		
	肥料の種類	N	P	K
基肥	化成肥料A	50	22	42
	ぼかし肥A	30	22	17
	合計	80	44	58

慣行ハウス

		養分施肥量(kg ha^{-1})		
	肥料の種類	N	P	K
基肥	有機入り肥料A	60	26	33
	有機入り肥料B	40	31	29
	有機入り肥料C	10	30	8
	ぼかし肥B	72	7	7
	米ぬか	45	39	28
追肥	液肥A (7/20)	10	1	4
	液肥A (7/27)	10	1	4
	合計	247	135	114

2）4Hクラブの取り組み

生産者 A 氏が所属する北斗市の 4H クラブ（青年農業者団体）ではプロジェクト研究としてトマトの栄養診断に取り組んでいる（図 2-2-1）．調査戸数は 10 戸で，トマトを初めて栽培するクラブ員 B 氏と C 氏は栄養診断に基づいて追肥量を決定し，栽培経験がある他のクラブ員は慣行で追肥を行った．各クラブ員の圃場について窒素施肥量，果実収量，栽培前後の土壌硝酸態窒素を調査した．果実収量は JA 新はこだて大野支店の集計データに基づいた．

3. 結果

1）現地実証試験

＜2001 年度＞

試験ハウスでは土壌診断の結果を基に基肥を施用した．栽培期間中の合計窒素施肥量は試験ハウスでは 80 kg N ha^{-1} で，慣行ハウスの 247 kg N ha^{-1} と比べ，大幅な減肥となった（表 2-2-1）．葉柄硝酸濃度はいずれのハウスも常に 7,000 mg NO_3^- L^{-1} 以上で推移し，試験ハウスでは追肥を行わなかった．（図 2-2-2）．

果実収量は試験ハウスで 110Mg ha^{-1} となり慣行ハウスに比べ 109%を示し，大幅な減肥を行っても慣行を上回る収量が得られた（図 2-2-3 上）．試験ハウスの規格別収量は慣行ハウスに比べて 2L(260g 以上)，L(200～260g)の量が多く，M1 以下(170g 未満)の量が少なかった．

試験ハウスにおける果実の推定生産額は 2,777 万円 ha^{-1} であり，慣行ハウスに比べ 107%となった．また試験ハウスでは慣行ハウスと比べ 2L，L 規格の生産額が多かった（図 2-2-3 下）．試験ハウスの肥料コストは慣行ハウスと比べ約 170,000 円 ha^{-1}（約 50%）削減できた(データ省略)．

両ハウスとも跡地土壌の EC および硝酸態窒素が栽培前より高まり養分過多の傾向であったが，試験ハウスでは慣行ハウスに比べ，跡地の硝酸態窒素含量が低かった（表 2-2-2）．

＜2002 年度＞

2002 年は硝酸態窒素の残存量が低いハウスを選定し，試験ハウスについては堆肥施用量を 20 Mg ha^{-1} に減らした．試験ハウスにおける合計窒素施肥量は 183 kg N ha^{-1} であり，慣行ハウスの 275 kg N ha^{-1} に比べ 92kg N ha^{-1} の減肥となった（表 2-2-3）．

試験ハウスでは慣行ハウスに比べ土壌硝酸態窒素は低く推移した．収穫終了時の土壌硝酸態窒素は 10 mg N kg^{-1} であり，慣行ハウスの 104 mg N kg^{-1} に比べ土壌の残存窒素を大幅に低減できた（図 2-2-4，表 2-2-4）．葉柄硝酸濃度は慣行ハウスで 8,000 mg NO_3^- L^{-1} 以上で推移したが，試験ハウスでは生育後半に 7,000 mg NO_3^- L^{-1} を下回った（図 2-2-5）．

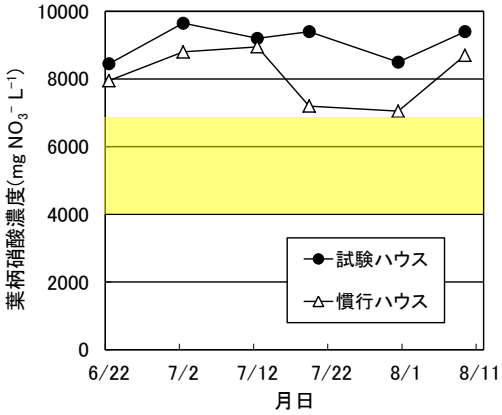


図 2-2-2 各ハウスにおける葉柄硝酸濃度の推移（2001 年）

※着色範囲は葉柄硝酸濃度の基準値（4000～7000 mg NO_3^- L^{-1}）を示す．

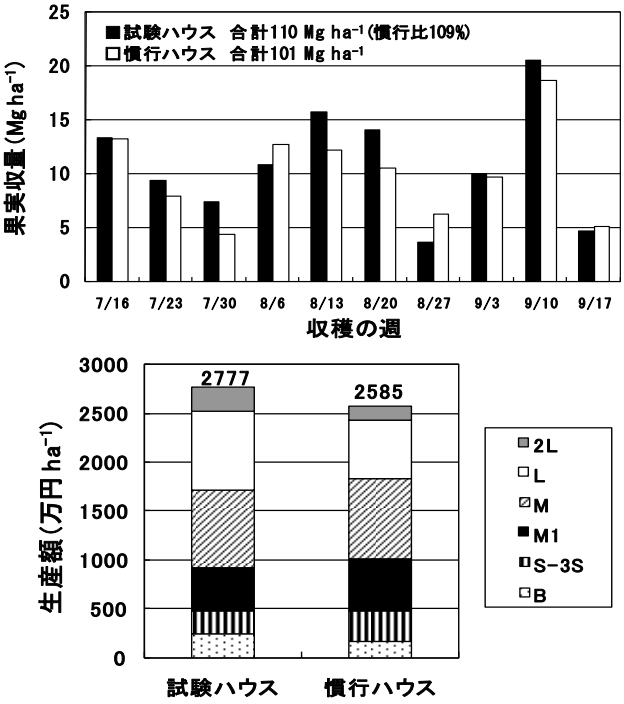


図 2-2-3 2001 年における各ハウスの果実収量の推移(上)と生産額(下)

※規格は 2L:260g 以上 L:200～260g M:170～200g M1:140～170g S:120～140g 2S:90～120g 3S:90g 未満 B:空洞果などの変形果

表 2-2-2 各ハウスの作付前と栽培後の土壌化学性(2001 年)

時期	ハウス	pH (H_2O)	EC (dS m^{-1})	硝酸態窒素 (mg N kg^{-1})	可給態P[1)] (mg P kg^{-1})	交換性塩基(mg kg^{-1}) K	Ca	Mg
作付前	試験ハウス	6.4	0.43	149	1231	440	6418	760
	慣行ハウス	6.1	0.16	37	450	340	4545	555
栽培後	試験ハウス	6.6	1.48	417	1209	614	7619	941
	慣行ハウス	6.1	0.99	508	533	531	5503	627

1) 可給態Pはトルオーグ法による

表 2-2-3 試験ハウス(上)と慣行ハウス(下)における施肥量(2002 年)

試験ハウス

	肥料の種類	養分施肥量(kg ha^{-1}) N	P	K
基肥	化成肥料A	50	22	42
	ぼかし肥A	60	44	33
追肥	液肥A (6/28)	20	3	8
	液肥A (8/ 1)	33	4	14
	液肥A (8/17)	20	3	8
	合計	183	75	105

慣行ハウス

	肥料の種類	養分施肥量(kg ha^{-1}) N	P	K
基肥	有機入り肥料A	67	29	37
	有機入り肥料B	45	34	32
	有機入り肥料C	11	33	9
	有機肥料A	67	19	0
	ぼかし肥A	34	24	18
	有機資材A	11	5	6
追肥	液肥A (7/20)	20	3	8
	液肥A (7/27)	20	3	8
	合計	275	151	120

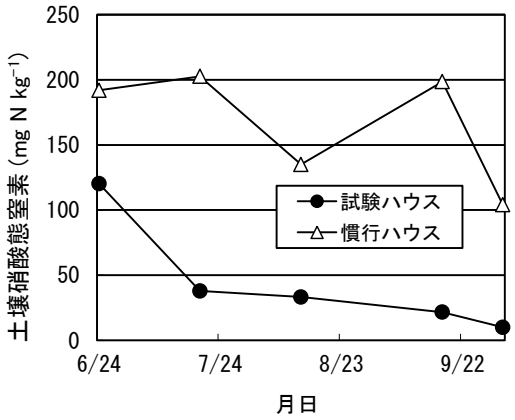


図 2-2-4 各ハウスにおける土壌硝酸態窒素の推移(2002 年)

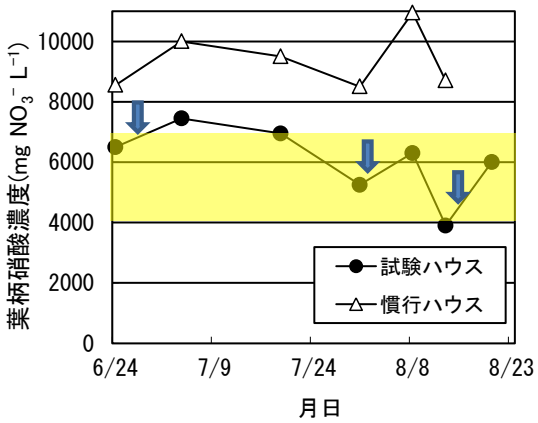


図 2-2-5 各ハウスにおける葉柄硝酸濃度の推移(2002 年)

1) 着色範囲は葉柄硝酸濃度の基準値(4000～7000 mg NO$_3^-$ L^{-1})を示す.

2) 矢印は試験ハウスの追肥日を示す.

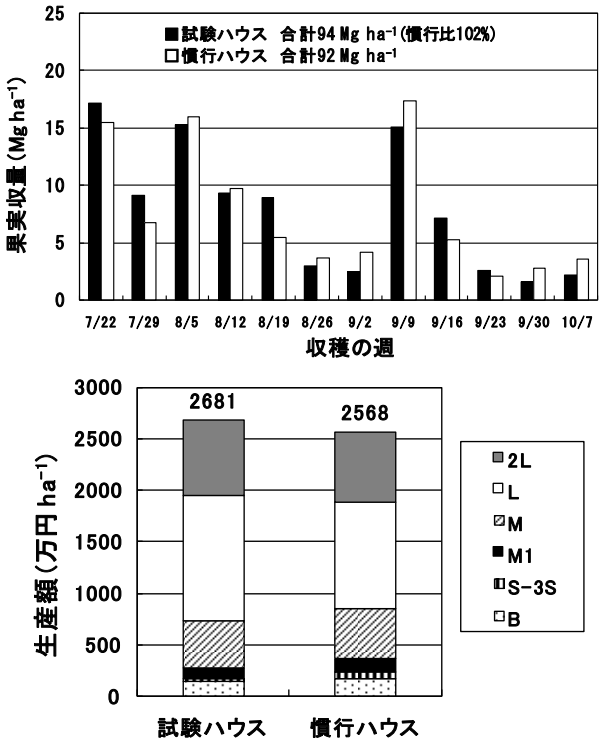


図 2-2-6 2002 年における各ハウスの果実収量の推移(上)と生産額(下)

※規格は 2L:260g 以上 L:200～260g M:170～200g M1:140～170g S:120～140g 2S:90～120g 3S:90g 未満 B:空洞果などの変形果

表 2-2-4 各ハウスの作付前と栽培後の土壌化学性(2002 年)

時期	ハウス	pH (H_2O)	EC (dS m^{-1})	硝酸態窒素 (mg N kg^{-1})	可給態P[1)] (mg P kg^{-1})	交換性塩基(mg kg^{-1}) K	Ca	Mg
作付前	試験ハウス	7.4	0.17	10	1100	490	5332	573
	慣行ハウス	6.6	0.20	24	262	581	3023	452
栽培後	試験ハウス	7.1	0.30	10	1140	349	5882	675
	慣行ハウス	6.1	0.50	104	284	498	3338	513

1) 可給態Pはトルオーグ法による

表 2-2-5 4H クラブ員による収量, 窒素施肥量および土壌硝酸態窒素

栄養診断の実施	生産者	果実収量 (Mg ha^{-1})	窒素施肥量 (kg N ha^{-1})	土壌硝酸態窒素(mg N kg^{-1}) 定植前	栽培跡地
有り	クラブ員B	81.0	218	18	6
	クラブ員C	93.0	198	34	20
	A試験ハウス	93.5	183	10	10
無し	他クラブ員8戸平均	85.6	204[1)]	66	134[1)]
	(範囲)	(71.0～91.9)	(78～276)	(24～190)	(32～302)

1)欠測あり

生育は茎径と着果数では試験ハウスと慣行ハウスの間に大きな差はなかったが, 試験ハウスでは葉色が薄く, 第4果房肥大期の草丈では試験ハウスでは 141 cm で慣行ハウスの 151 cm に比べ 10 cm 低かった(データ省略). この時期における試験ハウスの葉柄硝酸濃度は 5,000 mg NO_3^- L^{-1} 前後となっていた(図 2-2-5)ため, 窒素を 33 kg N ha^{-1} 追肥した(表 2-2-3).

2002 年は天候不順により 2001 年と比べ収量は低下したが, 試験ハウスにおける果実収量は 93.5 Mg ha^{-1} であり慣行ハウスに比べ 102%となった(図 2-2-6 上). 前年と同様に試験ハウスでは慣行ハウスに比べ 2L, L の生産額が高く, 推定生産額は 2681 万円 ha^{-1} で, 慣行ハウスに比べ 104%となった(図 2-2-6 下). 肥料コストは試験ハウスで慣行ハウスに比べ約 28 万円 ha^{-1}(約 40%)削減できた(データ省略).

表 2-2-4 に各ハウスの作付け前と栽培後の土壌化学性を示したが, 試験ハウスにおける栽培後の土壌 EC および硝酸態窒素は慣行ハウスと比べて低く, 環境負荷の軽減が図られた.

2カ年の実証試験の結果をまとめると以下の通りとなる. (1)土壌診断および栄養診断によって 68%ないし 33%の窒素減肥が図られた. (2)栄養診断に基づいて減肥を行っても, 試験ハウスでは慣行ハウスと同等以上の果実収量が得られた. (3)試験ハウスでは慣行ハウスと比べ栽培跡地の土壌硝酸態窒素が低く, 環境への負荷が軽減された. (4)試験ハウスでは慣行ハウスと比べ果実の生産額が高く, 肥料コストが削減され, 経済性の面においても優位であった.

2)4Hクラブの取り組み

クラブ員A氏とB氏についてはいずれも生育期間中の葉柄硝酸濃度は 7,000 mg NO_3^- L^{-1} 以上を推移したため, 生育期間中の追肥は行わなかった(データ省略).

果実収量は栄養診断を行ったクラブ員では他クラブ員に比べ収量は同等以上であった. また, 栄養診断を行ったクラブ員は栽培跡地の土壌硝酸態窒素が低かった(表 2-2-5). このようにトマト栽培の初心者でも栄養診断技術を用いることでトマト栽培経験者よりも高い水準の施肥管理を行うことができた.

4. 考察

実証試験の結果, 試験ハウスの窒素施肥量は慣行ハウス比で 2001 年は 32%, 2002 年は 67%であり, 大幅な減肥となった(表 2-2-1, 2-2-3). 2001 年と 2002 年で窒素施肥量に差がみられたのは, 2001 年は試験ハウスの栽培前土壌硝酸態窒素が慣行ハウスに比べ 100mg N kg^{-1} 程度高かったためと考えられる. また, 2001 年の試験ハウスでは追肥を行わなくても葉柄硝酸濃度が低下しなかった理由として土壌に残存する窒素や堆肥由来の窒素を吸収していたと考えられた.

果実収量は 2001, 2002 年とも試験ハウスでは慣行ハウスを上回っており(図 2-2-3, 2-2-6), 栄養診断に基づいて減肥を行っても慣行以上の収量が得られることが確認できた.

しかし，2002 年度の試験ハウスでは第5果房肥大期に葉柄硝酸濃度が 4,000 mg NO_3^- L^{-1} 前後まで低下し，収穫後期の収量は慣行ハウスと比べやや少なかったことから，現地においても葉柄硝酸濃度が 4,000 mg NO_3^- L^{-1} を下回ると減収すると考えられた．

2001 年の試験ハウスは慣行ハウスに比べ生産額は 190 万円 ha^{-1} 上回り，肥料コストは 17 万円 ha^{-1} 削減できた．2002 年の試験ハウスは慣行ハウスに比べ生産額が 110 万円 ha^{-1} 上回り，肥料コストは 28 万円 ha^{-1} 削減できた．このように両年とも経済性は試験ハウスの方が優れていた．

2001 年は試験ハウスにおいて定植前の土壌硝酸態窒素が深さ 20～60 cm の層に 100mg N kg^{-1} 程度存在したため，作土の土壌診断による減肥と栄養診断による追肥の省略をしても跡地土壌硝酸態窒素は高い濃度で残存した．一方、2002 年は定植前の残存窒素が少ない状態で栽培を始めたため，試験ハウスにおける跡地硝酸態窒素含量は 10mg N kg^{-1} となり，硝酸態窒素蓄積による環境負荷の軽減が実証された（図 2-2-4，表 2-2-4）．以上述べてきた栄養診断技術の有効性については4H クラブのプロジェクト活動によっても確かめられた（表 2-2-5）．

他府県で作物または土壌溶液の窒素診断を用いた肥培管理の事例として，愛知県では葉柄硝酸濃度を指標とした肥培管理によりトマトとメロンの作付け体系において土壌 EC が低く保たれた(山田ら，1996)．また，神奈川県では環境保全型栽培体系を実証したプロジェクト研究で基肥にぼかし肥料を用い，土壌溶液診断による追肥を行うことにより化学肥料の使用量を 60％以上削減できた報告がある(岡本ら，2001)．千葉県では栄養診断に基づく追肥法により，慣行と同等の収量を確保しつつ，追肥窒素量を慣行の 0～50％に抑えている(山本ら，2006)．

これらの例のように土壌診断および栄養診断に基づく施肥対応は肥料コストの削減と環境負荷低減を実現すると考えられる．一方で，硝酸態窒素が蓄積した圃場や施肥基準(北海道農政部，2010)を上回る多肥を行った圃場では，生育期間中の葉柄硝酸濃度は基準値以上を推移し，追肥が一度も要らない状態となる．栄養診断を行う前に土壌診断に基づいた基肥窒素量の設定することは山本ら(2005)も提唱している．トマトの栄養状態に合わせた施肥管理を行うには施肥基準を遵守することが基本と考えられる．

5. 要約

現地においてハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断を実践し，収量の向上や減肥について実証するとともに，問題点を整理し，栄養診断技術の普及定着を目指した．

1） 実証試験圃における2カ年の結果は，①土壌診断および栄養診断によって 68%ないし 33%の窒素減肥が図られ，栽培跡地の土壌硝酸態窒素が低く，環境への負荷が軽減された．②栄養診断に基づいて減肥しても，慣行と同等以上の果実収量が得られた．③栄養診断圃場では慣行と比べ果実の生産額が高く，肥料コストが削減され，経済性の面においても優位であった．

2） 青年農業者クラブにおける取り組みでは，トマト栽培の経験がないクラブ員が栄養診断を行った結果，他のクラブ員に比べ果実収量は同等以上となり，栽培跡地の土壌硝酸態窒素が低かった．

3） 以上のことから，栽培初心者でも栄養診断技術を用いることで適切な施肥管理を行うことができた．

第３章　栄養診断に基づく夏秋どりトマトの養液土耕技術

第１節　果実生産と施肥窒素利用率からみた生育時期別の適正施肥量

1. はじめに

養液土耕は点滴チューブを用いて作物の株元に肥料と水を同時に与える栽培法である. 養液土耕においても養分供給の過不足は塩類集積あるいは不十分な生育を招くため(Bar-Yosef, 1999), 作物の生育時期ごとの養分要求量に合わせた施肥量を設定する必要がある. 施肥量の設定に当たっては, 施肥量が収量のほかに養分の吸収量および利用率に与える影響を把握することが重要である. 施設野菜の養液土耕における既往の報告では適正施肥量や土壌および葉柄汁液の適正範囲などが提案されているが, 窒素施肥量が果実生産や施肥窒素利用率に与える影響については十分解明されていない. これは, 既往の報告において無窒素区を設定していないなど施肥利用率を解析できない事例や, 無窒素区を設定していても土壌からの窒素供給が潤沢であるため窒素施肥量の増減が収量や窒素吸収量を反映しにくい事例が多かったためである.

本節では, 硝酸態窒素残存量を少なく抑えたハウスにおいて, 夏秋どりトマトにおける養液土耕が果実生産に与える影響を慣行施肥と比較するとともに, 養液土耕における施肥窒素利用率を算出し, 各生育時期における適正窒素施肥量の設定を目指した.

2. 試験方法

1)耕種概要

試験は 2002 年と 2003 年に北海道北斗市道南農業試験場のビニールハウス圃場において実施した. 供試圃場は中粒質普通褐色低地土であり, 土壌化学性は表 3-1-1 に示した.

品種は「ハウス桃太郎」を供試した. 播種日は 2002 年は 3 月 19 日, 2003 年は 3 月 18 日とし, 定植日は 2002 年は 5 月 15 日, 2003 年は 5 月 14 日とし, 第 1 花房が 1 ないし 2 花開花した苗を定植した. 整枝は主枝 1 本仕立てとし, 第 7 花房の開花期にその上位の葉 2 枚を残して摘心した. 収穫始めは 7 月中旬であり, 9 月中・下旬に収穫を終了した. 栽植様式はベッド幅 120cm の 2 条植え, 通路 80cm, 株間 30cm で, 栽植密度は 33,300 株 ha^{-1}とした. 灌水チューブは養液土耕区は点滴チューブ(ラム 17 吐出口間隔 30cm), 慣行施肥区は散水チューブ(スミチューブ)を用いた. トマトの株と灌水チューブの位置は図 3-1-1 に示した. 試験規模は 1 区 6～9 ㎡(20～30 株), 2 反復で行った.

表 3-1-1　供試圃場の土壌化学性(栽培前, 0～20cm 深)

年次	pH (H_2O)	EC ($dS\ m^{-1}$)	硝酸態窒素 ($mg\ N\ kg^{-1}$)	熱水抽出性窒素[1] ($mg\ N\ kg^{-1}$)	可給態P[2] ($mg\ P\ kg^{-1}$)	交換性塩基($mg\ kg^{-1}$) K	Ca	Mg
2002年	6.7	0.14	2	49	119	240	3102	331
2003年	6.4	0.15	0	48	119	169	3325	345

1) 熱水抽出性窒素はオートクレーブで105℃, 1時間加熱抽出 (道総研農業研究本部, 2012)
2) 可給態Pはトルオーグ法による

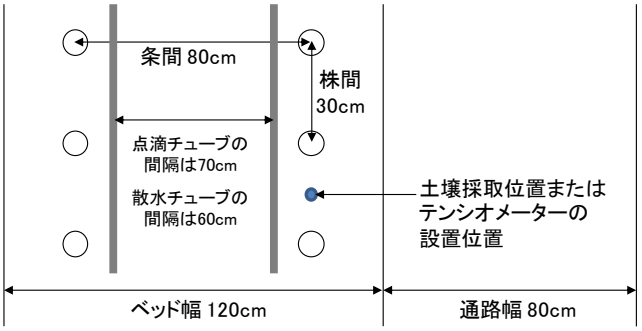


図 3-1-1　トマト株と灌水チューブおよび土壌採取位置

表 3-1-2　各処理区の時期別窒素施肥量および総施肥量

処理区名	日窒素施肥量 (kg N ha^{-1} d^{-1})			総施肥量(kg ha^{-1})					
				2002年			2003年		
	Ⅰ期[1]	Ⅱ期[2]	Ⅲ期[3]	N	P	K	N	P	K
養液土耕標準	1.5	3.0	1.5	230	57	341	233	58	345
養液土耕 0.75-3.0-1.5	0.75	3.0	1.5	211	53	313	215	54	319
養液土耕 3.0 -3.0-1.5	3.0			267	67	396	267	67	396
養液土耕 1.5 -1.5-1.5	1.5	1.5	1.5	158	39	234	155	39	229
養液土耕 1.5 -6.0-1.5		6.0		374	93	554	389	97	576
養液土耕 1.5 -3.0-0	1.5	3.0	0	182	45	270	191	48	282
養液土耕 1.5 -3.0-3.0			3.0	278	69	412	275	68	407
点滴無肥料	0	0	0	0	0	0	0	0	0
慣行施肥	―	―	―	300	87	332	300	87	332

1) Ⅰ期は定植～第1果房肥大期（2002年は5/16～6/9の25日間，2003年は5/15～6/6の23日間）
2) Ⅱ期は第1果房肥大期から摘心（2002年は6/10～7/27の48日間，2003年は6/7～7/28の52日間）
3) Ⅲ期は摘心後約1ヶ月間（2002年は7/28～8/28の32日間，2003年は7/29～8/25の28日間）
摘心1ヶ月後から収穫終了までは灌水のみ

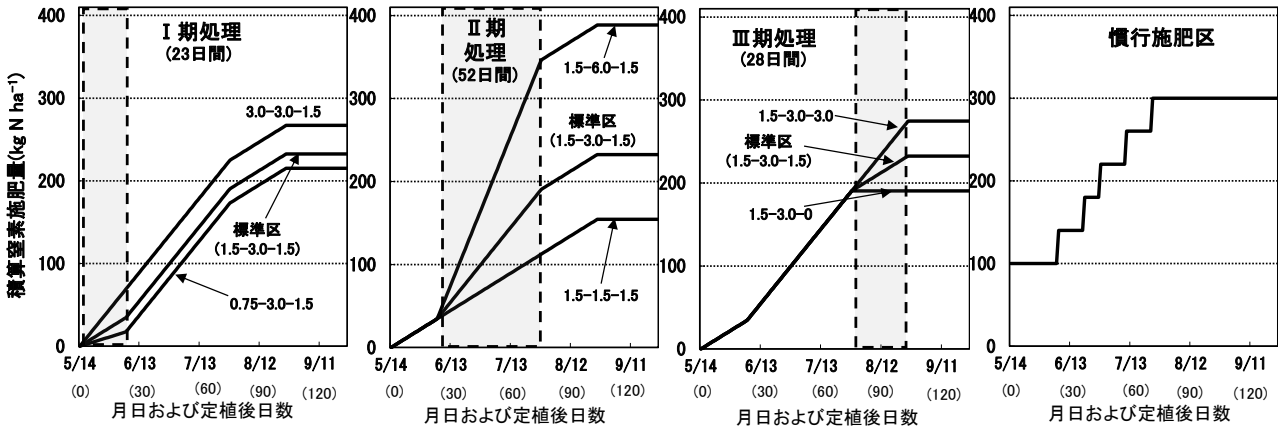


図 3-1-2　養液土耕区および慣行施肥区における積算窒素施肥量の推移(2003 年)
※ 2002 年はⅠ期が 25 日間, Ⅱ期が 48 日間, Ⅲ期が 32 日間である

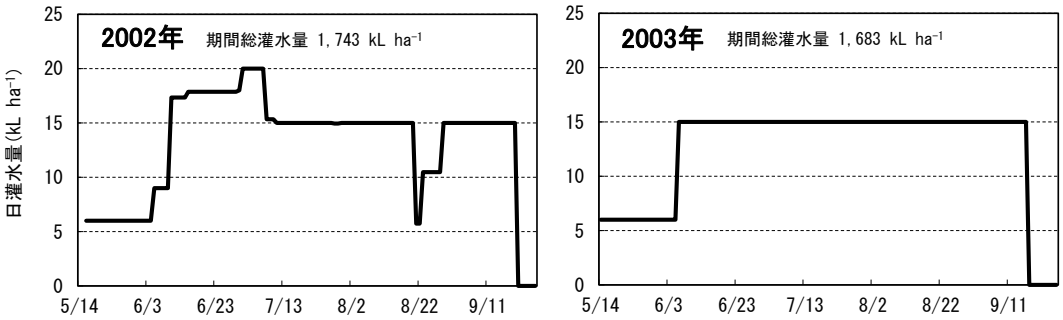


図 3-1-3　養液土耕区における日灌水量の推移

2)試験処理

点滴チューブで液肥を灌水する養液土耕区，点滴チューブで水のみを灌水する点滴無肥料区および基肥を全面全層に施し散水チューブで灌水や追肥を行う慣行施肥区を設けた．各処理区における時期別窒素施肥量および窒素，リン，カリウムの総施肥量を表 3-1-2 に，養液土耕区および慣行施肥区における積算窒素施肥量の推移(2003 年の例)を図 3-1-2 に示した．

トマトの生育時期を，定植から第 1 果房の果実がピンポン球大になった日(以下，第 1 果房肥大期)までを「Ⅰ期」，第 1 果房肥大期から摘心までを「Ⅱ期」，摘心後 1 ヶ月間を「Ⅲ期」と分け，養液土耕区では各期について施肥量を変更する処理を行った．

予備試験において，第 1 果房肥大期(定植後約 20 日)および第 5 果房肥大期(定植後約 70 日)の窒素吸収量は，およそ 30 および 180 kg N ha^{-1}であったことから，養液土耕区の標準区を，Ⅰ期は 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}(期間中約 30 kg N ha^{-1})，Ⅱ期は 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}(期間中約 150 kg N ha^{-1})，Ⅲ期は 1.5kg N ha^{-1} d^{-1}(期間中約 45 kg N ha^{-1})と設定した．また，比較のために，Ⅰ期について 0.75， 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}とした区(それぞれ養液土耕 0.75-3.0-1.5 区，養液土耕 3.0-3.0-1.5 区)，Ⅱ期について 1.5， 6.0 kg N ha^{-1} d^{-1}とした区(それぞれ養液土耕 1.5-1.5-1.5 区，養液土耕 1.5-6.0-1.5 区)，Ⅲ期について 0, 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}とした区(それぞれ養液土耕 1.5-3.0-0 区，養液土耕 1.5-3.0-3.0 区)を設け，合計 7 処理とした(表 3-1-2)．養液土耕区の肥料は期間を通じて OKF-3 (大塚化学，N-P-K：140-35-208 g kg^{-1})を用いた．

慣行施肥区の総窒素施肥量は北海道の施肥標準(北海道農政部 2010)に従い 300kg N ha^{-1}とした.基肥について，窒素は硫安を用いて 100kg N ha^{-1}，リンは重過石を用いて 87kg P ha^{-1} (200kg P_2O_5 ha^{-1})，カリウムは硫加を用いて 166kg K ha^{-1} (200kg K_2O ha^{-1})を施用した．追肥の肥料はハイエキス(日産化学工業，N-P-K：200-0-166 g kg^{-1})を用いて 1 回当たりの窒素およびカリウム追肥量を 40kg N ha^{-1} および 33.2kg K ha^{-1} (40kg K_2O ha^{-1})とした．追肥時期は第 1～5 果房の肥大期毎に合計 5 回行なった．

2002 年の栽培終了後，残存窒素の影響を極力排除するため 2002 年 10 月にライ麦を播種し，翌年の 4 月に刈り取り，圃場外へ持ち出した．

3)灌水量および土壌水分ポテンシャルの測定

養液土耕区および点滴無肥料区における灌水(養液土耕区では同時施肥)は 1 日 1 回，午前 9 時から 11 時の間に行った．日灌水量について 2002 年は定植から第 1 果房肥大期まで 6 kL ha^{-1} d^{-1}とし，以降は 6～20 kL ha^{-1} d^{-1}とした．2003 年の日灌水量は，定植から第 1 果房肥大期まで 6 kL ha^{-1} d^{-1}とし，以降は 15 kL ha^{-1} d^{-1}とした．栽培期間中の総灌水量は 2002 年は 1,743 kL ha^{-1}，2003 年は 1,683 kL ha^{-1} となった(図 3-1-3)．

慣行施肥区の灌水量は週 1 回程度，およそ 67 kL ha^{-1} (ベッド面積換算で 11mm 相当)の灌水を行い，栽培期間中の総灌水量は 2002 年は 1,000 kL ha^{-1} ，2003 年は 1,323 kL ha^{-1} となった．トマト株間中間点にテンシオメータ(Daiki 製)を設置し(図 3-1-1)，深さ 20cm の土壌水分ポテンシャル指示値を週 1～3 回記録した．灌水の指標として土壌水分ポテンシャル- 9.8～- 49.1 kPa を目安に土壌水分管理を行った．

4)調査および分析方法

各処理区中央の 8 株を収量調査株とした．収穫期間は 11 週間とし，週 1 回または 2 回，着色した果実を収穫した．収穫の前期(収穫 1～3 週目)，中期(収穫 4～7 週目)，後期(収穫 8～11 週目)において各 1 回または 2 回，果実糖度(Brix)を測定するとともに，果実を 60～70℃で通風乾燥し，乾物生産量を求めた．

茎葉および樹上果実の養分吸収量は，第 1，第 3，第 5 果房肥大期に一部の区で 2 株を採取，収穫終了時に全処理区で 4 株を採取し，調査した．採取した株を葉，茎および果実に分け，それぞれを 60～70℃で通風乾燥し，乾物生産量を求めた．乾物試料について硫酸－過酸化水素分解(水野ら，1980)を行い，分解液中のアンモニア態窒素をオートアナライザーで測定し，各部位の窒素含有率から窒素吸収量を算出した．

各生育時期に，トマト株間中間点の土壌を採取し，土壌硝酸態窒素を調査した(図 3-1-1)．風乾土中の無機態窒素を 100g L^{-1} 塩化カリウム溶液で抽出し，抽出液中の硝酸態窒素はオートアナライザーで測定した．

3. 結果

土壌水分ポテンシャルの推移について 2002 年の養液土耕区では- 4.9～- 61.8 kPa，同年の慣行施肥区では- 12.3～- 61.8 kPa の範囲で推移し，2003 年の養液土耕区では- 9.8～- 49.1 kPa，同年の慣行施肥区では- 6.2～- 49.1 kPa の範囲で推移した．いずれの年も慣行栽培の土壌水分ポテンシャルは養液土耕区と比べ下降する傾向にあった(図 3-1-4)．

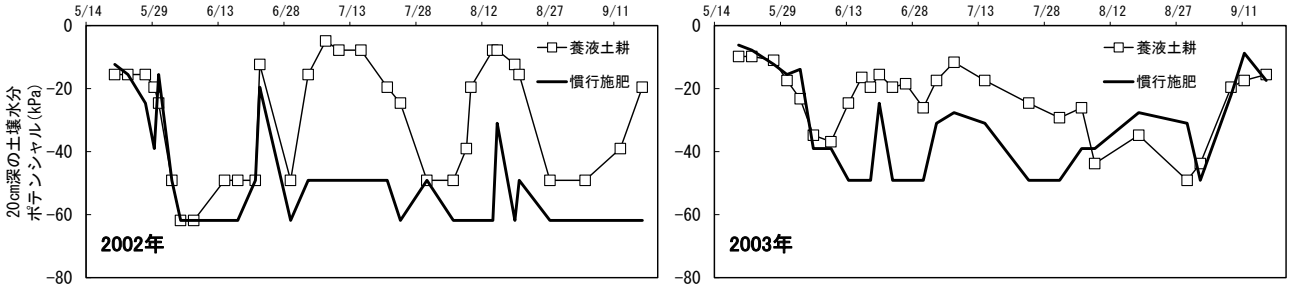


図 3-1-4 養液土耕区と慣行施肥区における土壌水分ポテンシャルの推移

表 3-1-3 養液土耕における時期別施肥処理が果実収量に与える影響

処理区名および総窒素施肥量（括弧の数値 kg N ha^{-1}）	果実収量 (Mg ha^{-1})[1), 2)] 前期	中期	後期	合計[3)]	
2002年					
養液土耕標準[4)] (230)	42 ± 3	64 ± 1	50 ± 5	157 ± 3	(100)
養液土耕 0.75-3.0-1.5 (211)	46 ± 8	53 ± 6	52 ± 2	152 ± 16	(97)
養液土耕 3.0 -3.0-1.5 (267)	53 ± 0	59 ± 1	39 ± 2	151 ± 0	(96)
養液土耕 1.5 -1.5-1.5 (158)	41 ± 2	46 ± 5	37 ± 2	124 ± 9	(79)
養液土耕 1.5 -6.0-1.5 (374)	43 ± 1	67 ± 1	55 ± 6	165 ± 3	(105)
養液土耕 1.5 -3.0-0 (182)	44 ± 4	59 ± 5	41 ± 7	144 ± 6	(92)
養液土耕 1.5 -3.0-3.0 (278)	45 ± 3	62 ± 4	51 ± 0	158 ± 0	(101)
点滴無肥料 (0)	31 ± 2	25 ± 5	30 ± 1	86 ± 8	(55)
慣行施肥 (300)	41 ± 4	61 ± 6	46 ± 3	147 ± 13	(94)
2003年					
養液土耕標準[4)] (233)	47 ± 2	52 ± 10	40 ± 3	139 ± 9	(100)
養液土耕 0.75-3.0-1.5 (215)	39 ± 1	41 ± 2	41 ± 2	121 ± 3	(87)
養液土耕 3.0 -3.0-1.5 (267)	46 ± 4	52 ± 7	35 ± 0	133 ± 2	(95)
養液土耕 1.5 -1.5-1.5 (155)	49 ± 0	25 ± 2	23 ± 8	97 ± 7	(69)
養液土耕 1.5 -6.0-1.5 (389)	40 ± 1	56 ± 10	43 ± 3	138 ± 12	(99)
養液土耕 1.5 -3.0-0 (191)	42 ± 0	62 ± 11	20 ± 4	124 ± 16	(89)
養液土耕 1.5 -3.0-3.0 (275)	41 ± 8	61 ± 14	37 ± 0	139 ± 6	(99)
点滴無肥料 (0)	14 ± 3	14 ± 0	16 ± 0	44 ± 3	(31)
慣行施肥 (300)	35 ± 8	45 ± 2	29 ± 3	109 ± 4	(78)

1) 収穫期間11週間（2002年は7月11日～9月19日，2003年は7月16日～9月22日）
のうち1～3週間目を前期，4～7週間目を中期，8～11週間目を後期とした
2) 収量の数値は，平均±標準誤差
3) 合計収量における括弧内の数値は養液土耕標準区の収量を100とした指数
4) 養液土耕標準区におけるⅠ期-Ⅱ期-Ⅲ期の窒素施肥量は1.5-3.0-1.5kg N ha^{-1} d^{-1}

養液土耕における時期別施肥処理が果実収量に与える影響を表 3-1-3 に示した．養液土耕区における合計果実収量は，2002 年は 124～165 kg N ha^{-1}，2003 年は 97～139 kg N ha^{-1}の範囲にあり，2002 年は 2003 年と比べ収量水準が高かった．総窒素施肥量が標準区を下回る区では，合計果実収量も標準区を下回った．一方，総窒素施肥量が標準区を上回る区で合計果実収量が標準区を上回ったのは，2002 年の 1.5-6.0-1.5 区と 1.5-3.0-3.0 区のみであり，そのほかの処理区では標準区を下回った．慣行施肥区における 2002 年および 2003 年の合計果実収量は養液土耕標準区比で，それぞれ 94%と 78%であった．

養液土耕における時期別施肥処理が乾物生産量および窒素吸収量に与える影響を表 3-1-4 に示した．養液土耕区の乾物生産量および窒素吸収量は総窒素施肥量が多くなるにともない，増加する傾向にあった．養液土耕区における吸収窒素の果実乾物生産効率は総窒素施肥量が多くなるにともない低下する傾向にあった．2003 年は 2002 年と比べ点滴無肥料区の窒素吸収量が少なく，土壌からの窒素供給が少なかったとみられる．養液土耕区の施肥窒素利用率は 2002 年の 0.75-3.0-1.5 区を除くと，2 カ年とも標準区で最も高く，2002 年は 69%，2003 年は 63%であった．慣行施肥区における吸収窒素の果実乾物生産効率は 2 カ年とも養液土耕標準区と比べ低い傾向にあった．

表 3-1-4　養液土耕における時期別施肥処理が乾物生産量および窒素吸収量に与える影響

処理区名および総窒素施肥量 (括弧の数値 kg N ha^{-1})		乾物生産量 (Mg ha^{-1}) 茎葉	乾物生産量 (Mg ha^{-1}) 果実	窒素吸収量 (kg N ha^{-1}) 茎葉	窒素吸収量 (kg N ha^{-1}) 果実	窒素吸収量 (kg N ha^{-1}) 合計	吸収窒素の果実乾物生産効率[2]	施肥窒素利用率(%)[3]
2002年								
養液土耕標準[4]	(230)	4.5 ± 0.1	9.7 ± 0.1	85 ± 2	183 ± 8	268 ± 11	36 ± 1	69 ± 12
養液土耕 0.75-3.0-1.5	(211)	4.3 ± 0.3	9.6 ± 0.8	83 ± 14	193 ± 31	276 ± 45	35 ± 3	79 ± 13
養液土耕 3.0 -3.0-1.5	(267)	4.6 ± 0.1	9.8 ± 0.0	79 ± 13	187 ± 7	266 ± 5	37 ± 1	59 ± 9
養液土耕 1.5 -1.5-1.5	(158)	3.7 ± 0.4	8.0 ± 0.6	66 ± 8	139 ± 11	206 ± 20	39 ± 1	62 ± 1
養液土耕 1.5 -6.0-1.5	(374)	4.8 ± 0.1	10.6 ± 0.1	95 ± 4	212 ± 3	307 ± 2	34 ± 1	53 ± 4
養液土耕 1.5 -3.0-0	(182)	3.7 ± 0.1	9.4 ± 0.4	50 ± 0	158 ± 2	207 ± 3	45 ± 1	54 ± 9
養液土耕 1.5 -3.0-3.0	(278)	4.2 ± 0.1	10.0 ± 0.0	73 ± 0	206 ± 7	279 ± 7	36 ± 1	62 ± 9
点滴無肥料	(0)	2.1 ± 0.6	5.5 ± 0.5	29 ± 9	79 ± 9	109 ± 18	51 ± 4	-
慣行施肥	(300)	4.8 ± 0.6	9.5 ± 0.8	102 ± 14	191 ± 11	293 ± 25	32 ± 0	-
2003年								
養液土耕標準[4]	(233)	2.7 ± 0.8	9.3 ± 0.3	56 ± 20	170 ± 12	226 ± 32	42 ± 5	63 ± 16
養液土耕 0.75-3.0-1.5	(215)	2.1 ± 0.0	8.4 ± 0.1	38 ± 1	157 ± 7	195 ± 8	43 ± 2	54 ± 1
養液土耕 3.0 -3.0-1.5	(267)	2.6 ± 0.0	8.9 ± 0.1	50 ± 4	162 ± 11	212 ± 15	42 ± 4	50 ± 4
養液土耕 1.5 -1.5-1.5	(155)	2.4 ± 0.1	7.0 ± 0.4	42 ± 0	119 ± 8	161 ± 9	44 ± 0	53 ± 2
養液土耕 1.5 -6.0-1.5	(389)	2.9 ± 0.3	9.6 ± 1.0	73 ± 8	190 ± 17	263 ± 25	36 ± 0	48 ± 8
養液土耕 1.5 -3.0-0	(191)	2.7 ± 0.7	8.2 ± 0.8	52 ± 19	141 ± 15	193 ± 34	43 ± 4	60 ± 20
養液土耕 1.5 -3.0-3.0	(275)	2.9 ± 0.5	9.1 ± 0.2	61 ± 17	176 ± 3	236 ± 19	39 ± 2	58 ± 9
点滴無肥料	(0)	1.2 ± 0.0	3.8 ± 0.0	24 ± 1	55 ± 4	78 ± 5	48 ± 4	-
慣行施肥	(300)	2.5 ± 0.3	7.6 ± 0.3	54 ± 7	150 ± 1	204 ± 7	37 ± 2	-

1) 各項目の数値は，平均±標準誤差
2) 吸収窒素の果実乾物生産効率は，果実乾物生産量／合計窒素吸収量 (kg kg^{-1})
3) 施肥窒素利用率は，(合計窒素吸収量－点滴無肥料区の合計窒素吸収量) ／総窒素施肥量×100 (%)
ただし，慣行施肥区は灌水方法が異なるため施肥窒素利用率を算出しない
4) 養液土耕標準区におけるⅠ期-Ⅱ期-Ⅲ期の窒素施肥量は1.5-3.0-1.5kg N ha^{-1} d^{-1}

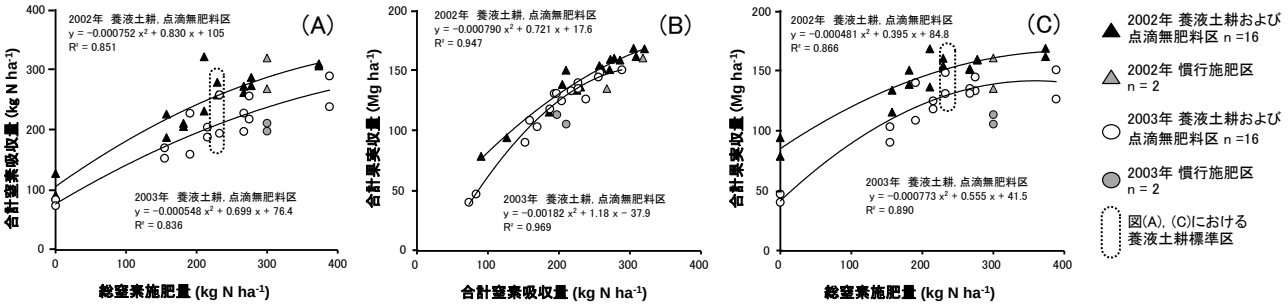


図 3-1-5　各処理区における総窒素施肥量と合計窒素吸収量(A), 合計窒素吸収量と合計果実収量(B)および総窒素施肥量と合計果実収量(C)との関係

総窒素施肥量, 合計窒素吸収量および合計果実収量の三者の関係を図 3-1-5(A, B, C)に示した. 合計窒素吸収量と合計果実収量との間には密接な関係が認められた(図 3-1-5(B)). 養液土耕では慣行施肥と比べ窒素吸収量に対する果実収量が若干高い傾向にあった. 合計果実収量は総窒素施肥量が養液土耕標準区の窒素施肥量である 230 kg N ha^{-1}を超えると頭打ちとなる傾向にあった(図 3-1-5(C)). 養液土耕では慣行施肥と比べ窒素施肥量に対する果実収量は高い傾向にあった.

各生育時期における葉の窒素含有率および土壌硝酸態窒素含量を表 3-1-5 に示した. 第 1 果房肥大期における葉の窒素含有率は慣行施肥区が最も高かった. 慣行施肥区では第 5 果房肥大期にかけて葉の窒素含有率が低下した. 一方, 養液土耕標準区では第 5 果房肥大期葉にかけて葉の窒素含有率は低下せず, 第 5 果房肥大期における葉の窒素含有率は慣行施肥区と比べ高かった(2003 年は有意差あり). また, 収穫終了時の養液土耕標準区における葉の窒素含有率は慣行施肥区と比べ低い傾向にあった.

第 1 果房肥大期における土壌硝酸態窒素含量は各処理区とも 10 mg N kg^{-1}未満であったが, その後第 5 果房肥大期にかけて高まった. 第 5 果房肥大期における土壌硝酸態窒素含量は, 養液土耕 1.5-6.0-1.5 区＞慣行施肥区＞Ⅱ期の日窒素施肥量 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}の群＞養液土耕 1.5-1.5-1.5 区＞無窒素区の順に高い傾向にあった. 栽培終了時の土壌硝酸態窒素含量は各処理区とも 20 mg N kg^{-1}未満であり, 高濃度の残存は認められなかった.

表 3-1-5　各生育時期における葉の窒素含有率および土壌硝酸態窒素含量

処理区名および総窒素施肥量 (括弧の数値 kg N ha^{-1})	葉の窒素含有率 (g 乾物kg^{-1}) 第1果房肥大期	第3果房肥大期	第5果房肥大期	収穫終了時	土壌硝酸態窒素含量(0～20cm深, mg N kg^{-1}) 第1果房肥大期	第3果房肥大期	第5果房肥大期	収穫終了時
2002年								
養液土耕標準[3] (230)	26.8 a	32.5 a	29.3 a	21.8 ab	4 a	3 a	48 abc	2 a
養液土耕 0.75-3.0-1.5 (211)	24.5 a	31.8 a	27.9 a	22.0 ab	2 a	9 a	46 abc	2 a
養液土耕 3.0 -3.0-1.5 (267)	31.7 a	32.1 a	24.5 a	19.9 ab	8 a	22 a	29 bc	10 a
養液土耕 1.5 -1.5-1.5 (158)	―	―	23.8 a	21.3 ab	2 a	1 a	15 bc	1 a
養液土耕 1.5 -6.0-1.5 (374)	―	―	26.6 a	22.6 ab	3 a	49 a	133 a	19 a
養液土耕 1.5 -3.0-0 (182)	―	―	―	15.5 b	2 a	4 a	26 bc	2 a
養液土耕 1.5 -3.0-3.0 (278)	―	―	―	20.6 ab	1 a	4 a	36 bc	3 a
点滴無肥料 (0)	―	―	―	16.4 ab	1 a	0 a	3 c	1 a
慣行施肥 (300)	33.1 a	32.5 a	25.9 a	23.6 a	1 a	33 a	92 ab	18 a
試料採取日	6/10	7/2	7/23	9/25	6/10	7/1	7/22	9/24
2003年								
養液土耕標準[3] (233)	27.9 a	25.5 bcd	27.9 a	25.3 a	4 a	19 b	52 a	3 a
養液土耕 0.75-3.0-1.5 (215)	20.5 b	28.1 abc	28.3 a	25.0 a	0 a	21 b	49 a	5 a
養液土耕 3.0 -3.0-1.5 (267)	32.1 a	28.0 abc	27.4 ab	25.5 a	6 a	39 b	58 a	3 a
養液土耕 1.5 -1.5-1.5 (155)	―	24.8 cd	21.3 c	22.7 a	4 a	4 b	12 a	2 a
養液土耕 1.5 -6.0-1.5 (389)	―	30.0 a	26.5 ab	30.5 a	1 a	144 a	129 a	12 a
養液土耕 1.5 -3.0-0 (191)	―	―	―	23.5 a	3 a	16 b	21 a	3 a
養液土耕 1.5 -3.0-3.0 (275)	―	―	―	26.9 a	2 a	10 b	32 a	5 a
点滴無肥料 (0)	12.2 c	22.8 d	21.2 c	25.1 a	1 a	3 b	4 a	2 a
慣行施肥 (300)	32.5 a	28.9 ab	23.2 bc	28.0 a	4 a	49 b	81 a	9 a
試料採取日	6/6	6/27	7/25	9/25	6/6	6/27	7/25	9/26

1) 同じ英文字間ではTukey-Kramerの検定において有意差がないことを示す(5%水準)
2) 図中の－は試料未採取
3) 養液土耕標準区におけるⅠ期-Ⅱ期-Ⅲ期の窒素施肥量は1.5-3.0-1.5kg N ha^{-1} d^{-1}

表 3-1-6　定植から第１果房肥大期までの窒素施肥量が同時期の窒素吸収量に与える影響

処理区名	定植から第1果房肥大期までの窒素施肥量 (A) 期間中 (kg N ha^{-1})	1日当たり (kg N ha^{-1} d^{-1})	定植から第1果房肥大期までの窒素吸収量 (B) 期間中 (kg N ha^{-1})	1日当たり (kg N ha^{-1} d^{-1})	(B)/(A)比 (%)
2002年					
養液土耕 0.75-3.0-1.5	21.8	0.84	19.5	0.75	90
養液土耕標準	40.5	1.56	27.3	1.05	67
養液土耕 3.0 -3.0-1.5	78.0	3.00	32.7	1.26	42
2003年					
養液土耕 0.75-3.0-1.5	17.3	0.75	9.7	0.42	56
養液土耕標準	34.5	1.50	24.8	1.08	72
養液土耕 3.0 -3.0-1.5	69.0	3.00	29.4	1.28	43

1) 定植から第1果房肥大期までの日数について，2002年は26日，2003年は23日である
2) 2002年は期間最終日のみⅡ期の窒素施肥処理(3.0 kg N ha^{-1} d^{-1})が行われている
3) 定植時の窒素吸収量について，2002年は6.6 kg N ha^{-1}，2003年は4.1 kg N ha^{-1}である

表 3-1-7　第１果房肥大期から第５果房肥大期までの窒素施肥量が同時期の窒素吸収量に与える影響

処理区名	第1果房肥大期から第5果房肥大期までの窒素施肥量 (A) 期間中 (kg N ha^{-1})	1日当たり (kg N ha^{-1} d^{-1})	第1果房肥大期から第5果房肥大期までの窒素吸収量 (B) 期間中 (kg N ha^{-1})	1日当たり (kg N ha^{-1} d^{-1})	(B)/(A)比 (%)
2002年					
養液土耕 1.5 -1.5-1.5	65	1.50	109	2.53	169
養液土耕標準	129	3.00	175	4.06	135
養液土耕 1.5 -6.0-1.5	258	6.00	152	3.52	59
2003年					
養液土耕 1.5 -1.5-1.5	74	1.50	87	1.78	119
養液土耕標準	147	3.00	124	2.53	84
養液土耕 1.5 -6.0-1.5	294	6.00	129	2.64	44

1) 第1果房肥大期から第5果房肥大期までの日数について，2002年は43日，2003年は49日である
2) 第1果房肥大期の窒素吸収量について，2002年は34 kg N ha^{-1}，2003年は29 kg N ha^{-1}である

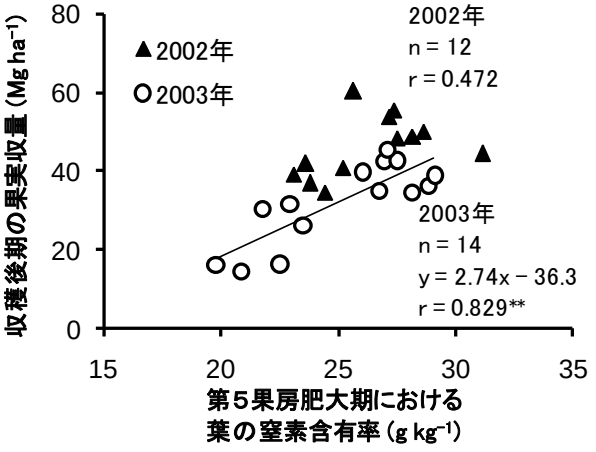


図 3-1-6 第 5 果房肥大期における葉の窒素含有率と収穫後期の果実収量との関係
**は 1%水準で相関が有意であることを示す

収穫前期と中期の間に相当する第 5 果房肥大期について，葉の窒素含有率と収穫後期の果実収量との関係を図 3-1-6 に示した．葉の窒素含有率が高まるにつれ収穫後期の果実収量は増加する傾向にあった．また，2003 年は両者の間に有意な正の相関が認められた．

定植から第 1 果房肥大期までの窒素施肥量が同時期の窒素吸収量に与える影響を表 3-1-6 に示した．定植から第 1 果房肥大期における窒素施肥量の増加に伴い，同時期の窒素吸収量は多くなり，「窒素吸収量/窒素施肥量」比(表中の(B)/(A)比)は低くなる傾向にあった．

第 1 果房肥大期から第 5 果房肥大期までの窒素施肥量が同時期の窒素吸収量に与える影響を表 3-1-7 に示した．第 1 果房肥大期から第 5 果房肥大期における窒素施肥量の増加に伴い同時期の「窒素吸収量/窒素施肥量」比は低くなる傾向にあった．養液土耕標準区は養液土耕 1.5-1.5-1.5 区と比べ窒素吸収量は多い傾向にあった．一方，養液土耕標準区と養液土耕 1.5-6.0-1.5 区との間では窒素吸収量について大きな差はなかった．

4. 考察

1)養液土耕が果実生産に与える影響

池田(2005)によると，根の周辺の養分補給や水分移動が少ないと根の表面に無機要素濃度の低い層が形成されるため，その改善として，根の表面に頻繁に養液を与えることが作物の十分な養水分吸収や効率的な肥培管理を実現できるとしている．多頻度の分施が作物の収量に与える影響について，トマトの点滴灌水栽培では，窒素分施の頻度を増やすことで大果および全体収量が高まったこと(Cook ら，1991)や，露地栽培の葉菜類においても養液土耕で養水分を安定的に供給することで収量および施肥窒素利用率が高まったこと(安・池田，2009；植田ら，2009)が報告されている．本報告においても養液土耕区の果実収量は慣行施肥区と比べ多い傾向にあった(表 3-1-3，図 3-1-5(C))．

果菜類における葉の窒素含有率はシンクとなる果実の肥大期以降低下する傾向にあり(李ら，1991)，本報告の慣行施肥区においても同様に認められる(表 3-1-5)．これは，生殖生長が盛んになってからは，吸収された窒素は葉身で同化されて果実に転流されるほか，作物体内の窒素も果実に優先的に転流される(種村，2010)ためと考えられる．また，シンクの発達時期に根からの窒素供給が不十分であれば葉の窒素含有率は急速に低下する(Ono ら，1996)ことから，果実収量を高めるには，栄養生長と生殖生長が並行する時期に安定した養分供給が不可欠となる．

養液土耕が葉の窒素含有率に与える影響について，養液土耕標準区では第 1 果房肥大期から収穫前期と中期の間にある第 5 果房肥大期にかけて葉の窒素含有率は低下せず，第 5 果房肥大期における葉の窒素含有率は慣行施肥区と比べ高かった(表 3-1-5)．点滴施肥により増収した Locascio ら(1989)の報告においても，点滴施肥区は全量基肥区と比べ定植 60 日および 90 日後の葉の窒素含有率は有意に高まっている．葉の窒素含有率が光合成や果実収量に与える影響について，春季栽培のトマトにおける葉の窒素含有率は 12～38 g kg^{-1}の範囲で光合成速度と正の相関を示す(Scholberg ら，2000)ほか，定植 6～12 週間後の葉の窒素含有率は果実総収量と正の相関を示す(Locascio ら，1997)．本報告においても第 5 果房肥大期(定植後約 70 日)における葉の窒素含有率は収穫後期の果実収量と正の相関が認められた(図 3-1-6)．これらのことから，養液土耕では多頻度の分施により，根の表面に十分な窒素が安定供給されたことで葉の窒素含有率を維持し，光合成を衰えさせずに果実生産を高めたと考えられた．

養液土耕標準区は慣行施肥区と比べ積算窒素施肥量は少なく推移しており(図 3-1-2)，土壌硝酸態窒素含量もまた低く推移している(表 3-1-5)．しかしながら，養液土耕標準区の第 5 果房肥大期における葉の窒素含有率が高い(表 3-1-5)理由は，先述の通り多頻度分施の効果と考えられる．一方，収穫終了時において葉の窒素含有率が慣行施肥区よりも低くなる理由は，収穫後期の果実収量が慣行施肥区よりも多く(表 3-1-3)，吸収窒素の果実への分配が多くなる(収穫終了時における「果実窒素吸収量/合計窒素吸収量」比について養液土耕標準区の 2002 年は 0.68，2003 年は 0.76，慣行施肥区の 2002 年は 0.65，2003 年は 0.74)ことや，養液土耕標準区では慣行施肥区と比べ土壌硝酸態窒素が低

く推移しており(表 3-1-5)摘心以降の窒素供給を必要最小限に制御できたためと考えられる．また，これらのことは養液土耕標準区における吸収窒素の果実乾物生産効率を高める(表 3-1-4)要因と考えられた．吸収窒素の果実乾物生産効率を第 5 果房肥大期以前と以降に分けて算出すると，養液土耕標準区の第 5 果房肥大期における吸収窒素の果実乾物生産効率(2002 年 31 kg kg^{-1}, 2003 年 34 kg kg^{-1})は，慣行施肥区(2002 年 33 kg kg^{-1}, 2003 年 36 kg kg^{-1})とほぼ同等であるが，第 5 果房肥大期から収穫終了時における吸収窒素の果実乾物生産効率(2002 年 56 kg kg^{-1}, 2003 年 56 kg kg^{-1})は，慣行施肥区(2002 年 31 kg kg^{-1}, 2003 年 40 kg kg^{-1})と比べ高まる傾向にあった．

慣行施肥区では養液土耕区と比べ栽培期間の総灌水量が少なく，土壌水分ポテンシャルが- 49.1 kPa 以下(pF 2.7 以上)に遭遇する期間も長かった(図 3-1-4)．土壌水分ストレスがトマトの生育に与える影響について，土壌水分吸引圧が pF2.8 以上(- 61.8 kPa 以下)では茎葉の水分ポテンシャルが極端に低下し果実の収縮が始まること(荒木，1993)や灌水量の削減により果実収量や窒素吸収量が低下し果実糖度が上昇すること(荒木ら，2005)が報告されている．慣行施肥区における果実糖度(Brix)の年平均について 2002 年は 5.45，2003 年は 6.00 であり，養液土耕標準区(2002 年は5.37，2003年は5.78)と比べ若干高めであるが有意差は認められないことや，灌水量や土壌水分ポテンシャルの差が小さい 2003 年の方が果実収量の差が大きいことから，土壌水分ストレスが慣行施肥区の果実収量の低下要因ではないと考えられた．

2)養液土耕における施肥窒素利用率

本報告における養液土耕標準区の 2 カ年の施肥窒素利用率は 63%～69%であった(表 3-1-4)．林ら(2003)はトマトの標準的な窒素施肥量における養液土耕区の施肥窒素利用率は 62%であり，慣行施肥区の 44%よりも高かったと報告しており，國田ら(2004)はトマト養液土耕の収穫中期における重窒素利用率は 52～55%と報告している．本報告の施肥窒素利用率は既往の報告と比べやや高めであるが，無施肥区の窒素吸収量が 109 kg N ha^{-1} (3.27 g N 株$^{-1}$)～78 kg N ha^{-1} (2.34 g N 株$^{-1}$)と，林ら(2003)の 4.08 g N 株$^{-1}$と比べ土壌由来の窒素供給量が少ない条件下での試験であることから，既往の報告と矛盾するものではないと考えられた．本報告では点滴無肥料区との差し引きにより養液土耕区の施肥窒素利用率を算出しているが，供試圃場の土壌可給態リンおよび交換性カリウムは北海道における診断基準値内(87～131 mg P kg^{-1}および 125～249 mg K kg^{-1})(北海道農政部，2010)にあり，点滴無肥料区における地上部全体のリンおよびカリウム含有率(2002 年 4.90 g P kg^{-1}および 31.8 g K kg^{-1}, 2003 年 4.78 g P kg^{-1}および 34.4 g K kg^{-1})は養液土耕標準区(2002 年 4.70 g P kg^{-1}および 31.7 g K kg^{-1}, 2003 年 4.23 g P kg^{-1}および 32.0 g K kg^{-1})と同等であるためリンおよびカリウムの施肥量が生育の制限因子とならないと考えられた．また，本報告では慣行の無窒素区が無いため慣行施肥区の施肥窒素利用率は算出できないが，養液土耕標準区では慣行施肥区に対して 77～78%の窒素施肥量で，91～111%の窒素吸収量を得ていることから(表 3-1-4)，養液土耕の施肥窒素利用率が慣行施肥を上回ることは明らかである．

3)養液土耕における各生育時期の適正窒素施肥量

養液土耕における適正施肥量について，Bar-Yosef(1999)は各生育時期の吸収量に沿った施肥を行うべきと述べている．本報告では栄養生長と生殖生長が並行し始める第 1 果房肥大期と生長点が取り除かれる摘心時を生育の転換点として施肥処理時期の区切りとし(表 3-1-2，図 3-1-2)，予備試験における窒素吸収経過に合わせて標準区を，Ⅰ期は 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}(期間中約 30 kg N ha^{-1})，Ⅱ期は 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}(期間中約 150 kg N ha^{-1})と設定した．

本報告においてⅠ期またはⅡ期の窒素施肥量を少なくした区は養液土耕標準区と比べ果実収量が少ない傾向にあった(表 3-1-3)．たとえば，2003 年は土壌からの窒素供給が少なく，Ⅰ期の窒素施肥量を少なくした養液土耕 0.75-3.0-1.5 区では生育初期における養液の窒素供給不足を補えなかったと考えられた(表 3-1-4，表 3-1-6)．Ⅱ期の窒素施肥量を少なくした養液土耕 1.5-1.5-1.5 区は養液土耕標準区と比べ第1果房肥大期から第5果房肥大期までの窒素吸収量が少なく(表 3-1-7)，同時期の窒素供給が不十分であると考えられた．一方，Ⅰ期またはⅡ期の窒素施肥量を多くした区では養液土耕標準区と比べ果実収量は大きく変わらなかった(表 3-1-3)．Ⅰ期の窒素施肥量を多くした養液土耕 3.0-3.0-1.5 区は養液土耕標準区と比べ定植から第 1 果房肥大期における「窒素吸収量/窒素施肥量」比が低く(表 3-1-6)，施肥窒素利用率が低い傾向にあった(表 3-1-4)．また，Ⅱ期の窒素施肥量を多くした養液土耕 1.5-6.0-1.5 区における第 1 果房肥大期から第 5 果房肥大期の窒素施肥量は同時期の窒素吸収量よりも 100 kg N ha^{-1}以上多く(表 3-1-7)，養液土耕標準区と比べ吸収窒素の果実乾物生産効率や施肥窒素利用率が低い傾向にあった(表 3-1-4)．これらのことから，Ⅰ期およびⅡ期における適正窒素施肥量は 1.5 および 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}程度と考えられた．

7 段取りトマトの慣行施肥では摘心直前となる第 5 果房肥大期を最後の追肥時期としていること(北海道農政部, 2010)や, ミニトマトにおいて摘心後は茎葉への窒素配分が低下し果実に吸収窒素が配分されること(林・元木, 1999)から, 摘心から 1 ヶ月間を養液の供給期間(Ⅲ期)とし残りの期間を灌水のみとすることで極力跡地に硝酸態窒素を残さない施肥法を試みた. しかしながら, 養液土耕 1.5-3.0-0 区では収穫後期の収量が養液土耕標準区と比べ少なくなるほか(表 3-1-3), 施肥窒素利用率も低くなる傾向にあった(表 3-1-4). 一方, 養液土耕 1.5-3.0-3.0 区は養液土耕標準区と比べ窒素吸収量は 10 kg N ha^{-1}程度多いが(表 3-1-4), 果実収量はほとんど増加せず(表 3-1-3), 吸収窒素の果実乾物生産効率や施肥窒素利用率が低下する傾向にあるため(表 3-1-4), Ⅲ期における適正窒素施肥量は 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}と考えられた. 適正窒素施肥量と確認された養液土耕標準区の総窒素施肥量は 230 および 233kg N ha^{-1}であったが, これは 7 段取りトマトの慣行施肥標準(北海道農政部, 2010)である 300 kg N ha^{-1}と比べ 22～23%の減肥となっており, 収量を向上させつつ窒素の減肥が可能であった.

府県においても夏秋トマトの養液土耕について養水分管理指針が設定されており, 本報告のⅠ～Ⅲ期に相当する時期の窒素施肥量は宮城県ではⅠ期:30 mg 株$^{-1}$ d^{-1}, Ⅱ期:70～150 mg 株$^{-1}$ d^{-1} , Ⅲ期:0～100 mg 株$^{-1}$ d^{-1}(上山ら, 2004), 広島県ではⅠ期:53 mg 株$^{-1}$ d^{-1}, Ⅱ期:95～204 mg 株$^{-1}$ d^{-1} , Ⅲ期:56 mg 株$^{-1}$ d^{-1}(國田ら, 2004), 大分県ではⅠ期:50 mg 株$^{-1}$ d^{-1}, Ⅱ期:80～120 mg 株$^{-1}$ d^{-1} , Ⅲ期:50 mg 株$^{-1}$ d^{-1}(玉井, 2005)となっている. 本報告の施肥量を株当たりに換算すると, Ⅰ期:45 mg 株$^{-1}$ d^{-1}, Ⅱ期:90 mg 株$^{-1}$ d^{-1} , Ⅲ期:45 mg 株$^{-1}$ d^{-1}となり, 既往の報告と比べⅠ期とⅢ期の施肥量は同程度であるがⅡ期の施肥量は少なめである. これは本報告の栽植密度(33,000 株 ha^{-1})が既往の報告(20,000～27,800 株 ha^{-1})と比べ密であることや, 本報告の施肥量は果実の乾物生産効率や施肥窒素利用率を考慮して設定されており, 果実収量を確保するための下限に近いためと考えられた.

5. 要約

養液土耕では作物の生育時期に合わせた施肥量を設定するため, 施肥量が収量や養分吸収量および利用率に与える影響を把握することが重要である. しかし, 施設栽培でしばしば見受けられる土壌からの窒素供給が多い条件では土壌由来の窒素吸収量が多くなり, これらを把握することは難しい.

本節では土壌の硝酸態窒素残存量を少なく抑えたハウスにおいて, 夏秋どりトマトにおける養液土耕が果実生産に与える影響を慣行施肥と比較するとともに, 養液土耕における施肥窒素利用率と各生育時期における適正窒素施肥量を検討した.

1） 養液土耕区では慣行施肥区と比べ果実収量や吸収窒素の果実乾物生産効率が高い傾向にあった.

2) 慣行施肥区では第 1 果房肥大期から第 5 果房肥大期にかけて葉の窒素含有率が低下したが, 養液土耕区では葉の窒素含有率が維持されていたことから, 養液土耕区では多頻度の分施により安定的に窒素が供給されたことが葉の窒素含有率を維持し, 光合成を衰えさせず果実生産を高めたと考えられた.

3) 果実収量は総窒素施肥量が 230 kg N ha^{-1}を超えると頭打ちになり, 施肥窒素利用率は総窒素施肥量210～230 kg N ha^{-1}で最高となった.

4) 以上のことから, トマトの養液土耕における各生育時期の適正窒素施肥量は定植から第 1 果房肥大期までが 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}, 第 1 果房肥大期から摘心までが 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}, 摘心後 1 ヶ月間が 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}と考えられた. この施肥条件における施肥窒素利用率は 63%～69%であった.

第 2 節 葉柄硝酸濃度が窒素栄養および果実収量に及ぼす影響

1.はじめに

養液土耕では，作物の生育に合わせて株元に肥料と水を与えることで，慣行施肥と同等以上の収量を確保しつつ施肥量の節減を可能にしている．養液土耕において過不足のない施肥を行うには，作物の生育時期ごとの養分要求量に合わせた施肥量を設定するとともに作物の栄養状態に合わせた施肥の調節を行うことが重要である．第１節では夏秋どりトマトの養液土耕について施肥窒素利用率を算出し，各生育時期における適正窒素施肥量を設定した．

本節では，夏秋どりトマトの養液土耕について窒素栄養診断基準を設定するにあたり，養液土耕における窒素施肥量が葉柄硝酸濃度に及ぼす影響と葉柄硝酸濃度が果実収量や葉の窒素含有率などに及ぼす影響を検討した．

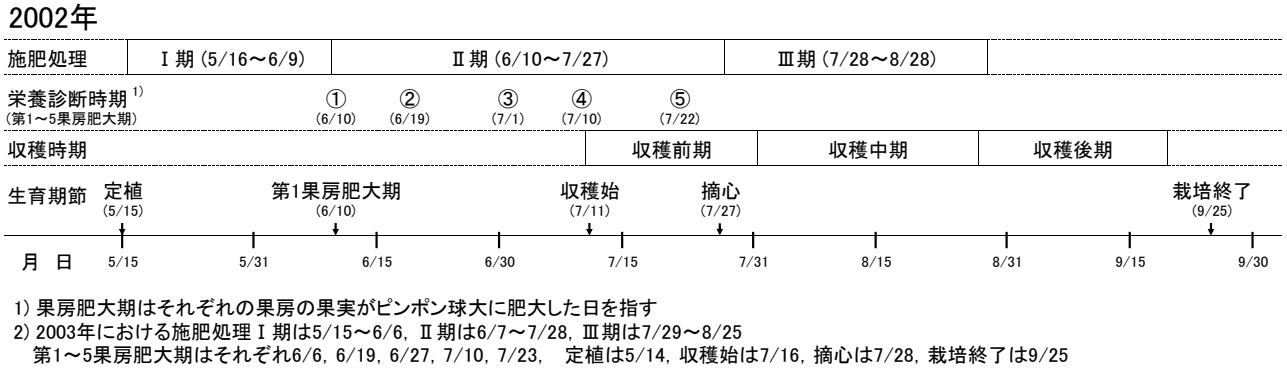
2.材料および方法

1)耕種概要

試験は第１節と同じく，2002 年と 2003 年に北海道北斗市の道南農業試験場のビニールハウス圃場において実施した．土壌化学性は第 1 節(表 3-1-1)の通りである．耕種概要は第 1 節と同じであり，定植後の生育期節等については図 3-2-1 に示した．

2)試験処理

各処理区における時期別窒素施肥量を表 3-2-1 に示した．第１節の処理区のうち，養液土耕でⅠ期，Ⅱ期，Ⅲ期の日窒素施肥量をそれぞれ 1.5 ，3.0，1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}とした標準区を中心に，Ⅰ期について 0.75， 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}とした区(それぞれ 0.75-3.0-1.5 区，3.0-3.0-1.5 区)，Ⅱ期について 1.5， 6.0 kg N ha^{-1} d^{-1}とした区(それぞれ 1.5-1.5-1.5 区，1.5-6.0-1.5 区)および無肥料区を調査対象とした(表 3-2-1)．また，供試肥料および灌水量は第１節と同じである．



1) 果房肥大期はそれぞれの果房の果実がピンポン球大に肥大した日を指す
2) 2003年における施肥処理Ⅰ期は5/15～6/6，Ⅱ期は6/7～7/28，Ⅲ期は7/29～8/25
第1～5果房肥大期はそれぞれ6/6，6/19，6/27，7/10，7/23， 定植は5/14，収穫始は7/16，摘心は7/28，栽培終了は9/25

図 3-2-1 定植後の生育期節と施肥処理，栄養診断時期および収穫時期(2002 年)

表 3-2-1 各処理区における期間別の日窒素施肥量および合計窒素施肥量

処理区名	日窒素施肥量 (kg N ha^{-1} d^{-1})			期間中の合計窒素施肥量(kg N ha^{-1})							
				2002年				2003年			
	Ⅰ期1)	Ⅱ期2)	Ⅲ期3)	Ⅰ期	Ⅱ期	Ⅲ期	全体	Ⅰ期	Ⅱ期	Ⅲ期	全体
標準	1.5	3.0	1.5	38	144	48	230	35	156	42	233
0.75-3.0-1.5	0.75	3.0	1.5	19	144	48	211	17	156	42	215
3.0 -3.0-1.5	3.0			75			267	69			267
1.5 -1.5-1.5	1.5	1.5	1.5	38	72	48	158	35	78	42	155
1.5 -6.0-1.5		6.0			288		374		312		389
無肥料	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1) Ⅰ期は定植～第1果房肥大期（2002年は5/16～6/9の25日間，2003年は5/15～6/6の23日間）
2) Ⅱ期は第1果房肥大期から摘心（2002年は6/10～7/27の48日間，2003年は6/7～7/28の52日間）
3) Ⅲ期は摘心後約1ヶ月間（2002年は7/28～8/28の32日間，2003年は7/29～8/25の28日間）
摘心1ヶ月後から収穫終了までは灌水のみ

3)調査および分析方法

果実収量，作物体の窒素含有率および窒素吸収量，土壌硝酸態窒素の調査・分析方法は第 1 節に示した通りである．葉柄硝酸濃度の測定は，夏秋どりトマトの窒素栄養診断法(第 2 章第 1 節)に則り，第 1～5 果房肥大期(図 3-2-1)の午前 9 時～正午の間に第 1 果房直下葉の先端小葉葉柄を採取した．第 1 果房肥大期は 1.5-1.5-1.5 区，1.5-6.0-1.5 区を除いた 4 処理区，第 2～5 果房肥大期は全ての処理区で葉柄を採取して行った．1 回の採取につき各処理区から 3 株ずつ葉柄を採取し，2 反復分の葉柄を合わせて 1 試料とした(葉柄硝酸濃度の反復なし)．新鮮または凍結した葉柄を乳鉢で磨砕後，蒸留水で希釈抽出し，抽出液についてオートアナライザーを用いて硝酸濃度(新鮮重あたりの硝酸濃度 mg NO_3^- L^{-1})を測定した．

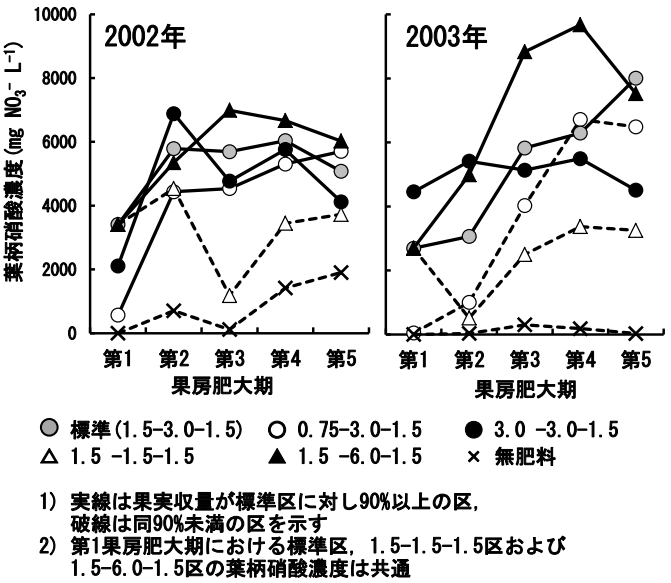


図 3-2-2　各処理区における第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度の推移

表 3-2-2　各果房肥大期における葉柄硝酸濃度と各項目との相関係数

		各果房肥大期における葉柄硝酸濃度(mg NO_3^- L^{-1})					
		第1	第2	第3	第4	第5	n
2002年							
窒素施肥量	Ⅰ期	0.655	0.892 *	0.488	0.622	0.312	6 1)
(kg N ha^{-1})	Ⅱ期	0.658	0.666	0.927 **	0.902 *	0.885 *	6 1)
葉の窒素含有率	第1果房肥大期	0.288	0.768	−0.010	0.354	−0.792	6
	第3果房肥大期	0.320	0.149	0.316	0.314	−0.095	6
(g 乾物kg^{-1})	第5果房肥大期	0.194	−0.087	0.540	0.501	0.630	10 2)
	収穫前期	0.406	0.784 **	0.533	0.649 *	0.503	12 2)
果実収量4)	収穫中期	0.797 *	0.863 **	0.909 **	0.951 **	0.858 **	12 2)
(Mg ha^{-1})	収穫後期	0.439	0.510	0.820 **	0.795 **	0.902 **	12 2)
	総収量	0.668	0.838 **	0.903 **	0.947 **	0.896 **	12 2)
総窒素吸収量(kg N ha^{-1})		0.589	0.815 **	0.885 **	0.930 **	0.902 **	12 2)
施肥窒素利用率(%)		−0.313	−0.303	−0.116	−0.133	0.129	10 3)
「窒素吸収量/窒素施肥量」比		−0.354	−0.500	−0.631	−0.649 *	−0.310	10 3)
葉柄採取月日		6/10	6/19	7/1	7/10	7/22	
2003年							
窒素施肥量	Ⅰ期	0.958 *	0.790	0.518	0.428	0.370	6 1)
(kg N ha^{-1})	Ⅱ期	0.551	0.767	0.978 **	0.975 **	0.832 *	6 1)
葉の窒素含有率	第1果房肥大期	0.902 **	0.938 **	0.903 **	0.727 *	0.654	8
	第3果房肥大期	0.415	0.719 **	0.834 **	0.895 **	0.706 *	12 2)
(g 乾物kg^{-1})	第5果房肥大期	0.438	0.609 *	0.680 *	0.749 **	0.806 **	12 2)
	収穫前期	0.676	0.445	0.542	0.578 *	0.664 *	12 2)
果実収量4)	収穫中期	0.696	0.808 **	0.861 **	0.836 **	0.824 **	12 2)
(Mg ha^{-1})	収穫後期	0.369	0.620 *	0.820 **	0.884 **	0.889 **	12 2)
	総収量	0.639	0.740 **	0.862 **	0.882 **	0.908 **	12 2)
総窒素吸収量(kg N ha^{-1})		0.609	0.754 **	0.920 **	0.919 **	0.883 **	12 2)
施肥窒素利用率(%)		−0.109	−0.215	−0.153	−0.164	0.189	10 3)
「窒素吸収量/窒素施肥量」比		−0.348	−0.703 *	−0.715 *	−0.696 *	−0.312	10 3)
葉柄採取月日		6/6	6/19	6/27	7/10	7/23	

1) 第1果房肥大期においてn = 4　　2) 第1果房肥大期においてn = 8

3) 第1果房肥大期においてn = 6

4) 収穫期間11週間(2002年は7月11日～9月19日，2003年は7月16日～9月22日)のうち
1～3週間目を前期，4～7週間目を中期，8～11週間目を後期とした

5) *は相関が5%水準，**は1%水準で有意であることを示す

3.結果

各処理区における第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度(以下,「葉柄硝酸濃度」は第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度を指す)の推移を図 3-2-2 に示した. 標準区における第 1 果房肥大期の葉柄硝酸濃度について 2002 年は 3,400 mg NO_3^- L^{-1}, 2003 年は 2,700 mg NO_3^- L^{-1} であり, 他の時期と比べ低い傾向にあった. 同区における第 2 果房肥大期以降の葉柄硝酸濃度は 2002 年は 5,000～6,000 mg NO_3^- L-1, 2003 年は 3,000～8,000 mg NO_3^- L^{-1} の範囲を推移した(図 3-2-2). 第 2 果房肥大期以降の葉柄硝酸濃度がおおむね 4,000 mg NO_3^- L^{-1} 以上で推移していた区では, いずれの年も果実収量が標準区の 90%以上となっており, 第 2, 3 果房肥大期に葉柄硝酸濃度が 2,000 mg NO_3^- L^{-1} 未満になった区では果実収量が標準区の 90%未満となった(図 3-2-2)

第 1～2 果房肥大期の葉柄硝酸濃度は I 期の窒素施肥量と高い相関を示し, 第 3～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度は 2 カ年とも II 期の窒素施肥量と有意な高い相関を示した(表 3-2-2). 2003 年において, 各果房肥大期の葉柄硝酸濃度は同果房またはその上下の果房肥大期における葉の窒素含有率と 1%水準で有意な正の相関を示した(表 3-2-2). 収穫前期の果実収量は第 1 または第 2 果房肥大期の葉柄硝酸濃度と最も高い正の相関を示した. 収穫中期の収量は第 2～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度と, 収穫後期の収量は第 3～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度と 1%水準の有意な高い相関を示した. 総収量は第 2～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度と 1%水準の有意な高い相関を示し, 総窒素吸収量もまた同様の相関を示した(表 3-2-2). 葉柄硝酸濃度と施肥窒素利用率の相関は全体的に低かった. 一方, 第 2～4 果房肥大期の葉柄硝酸濃度は「窒素吸収量/窒素施肥量」比と高い負の相関を示した(表 3-2-2).

各果房肥大期における葉柄硝酸濃度と総果実収量との関係を図 3-2-3 に示した. 第 1 果房肥大期では葉柄硝酸がほとんど検出されなかった場合のみ, 総収量が低下した. 第 2～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度が高まるにともない総収量は増加する傾向にあり, 葉柄硝酸濃度 5,000～6,000 mg NO_3^- L^{-1} で総収量は頭打ちになった. 第 2 果房肥大期の葉柄硝酸濃度は 2,000 mg NO_3^- L^{-1}, 第 3～5 果房肥大期では 4,000 mg NO_3^- L^{-1} を下回ると総収量が低下した(図 3-2-3).

各果房肥大期とも葉柄硝酸濃度が高まるにともない, 葉の窒素含有率は高まる傾向にあった. 葉柄硝酸濃度は第 1 果房肥大期では 1,000 mg NO_3^- L^{-1}, 第 3, 5 果房肥大期では 4,000 mg NO_3^- L^{-1} を下回ると葉の窒素含有率が低下した. 一方, 第 3, 5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度は 5,000 mg NO_3^- L^{-1} より高くても葉の窒素含有率は上昇しなかった(図 3-2-4). 第 1, 3, 5 果房肥大期とも葉の窒素含有率が高まるにともない, 収穫前期, 中期, 後期の果実収量は増加した. 両年の各時期とも葉の窒素含有率は 25 g kg^{-1}を下回ると果実収量が大きく低下した(図 3-2-5).

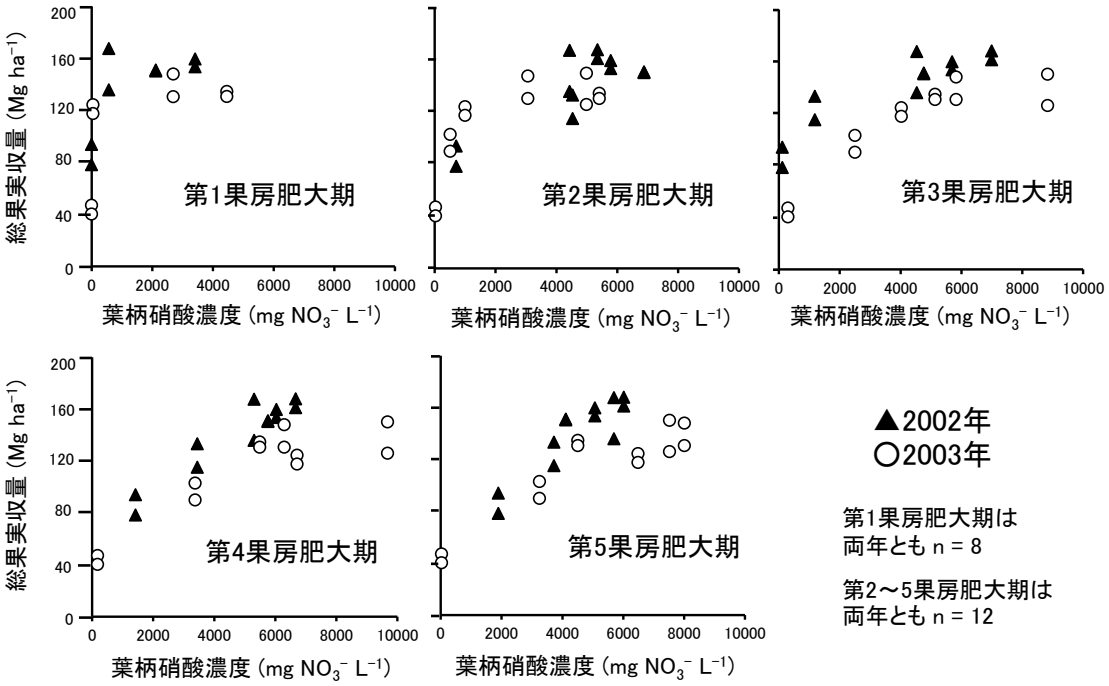


図 3-2-3 各果房肥大期における葉柄硝酸濃度と総果実収量との関係

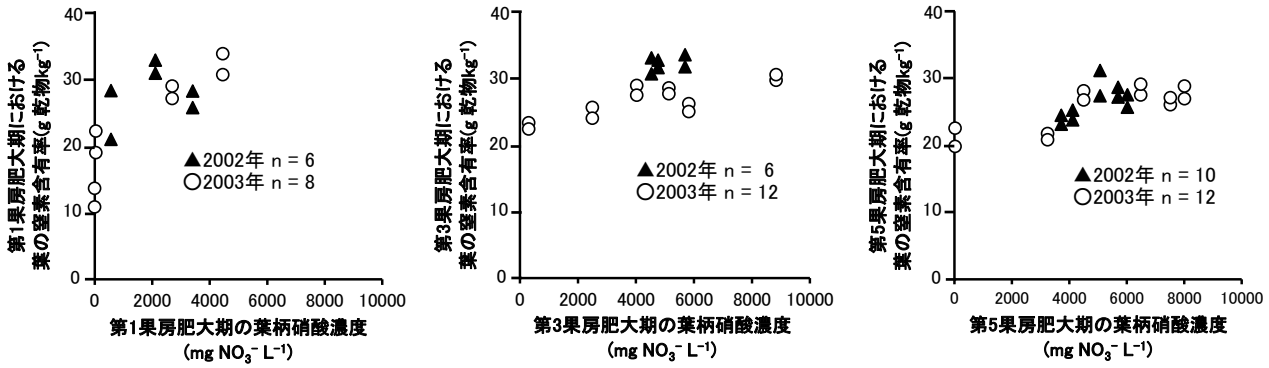
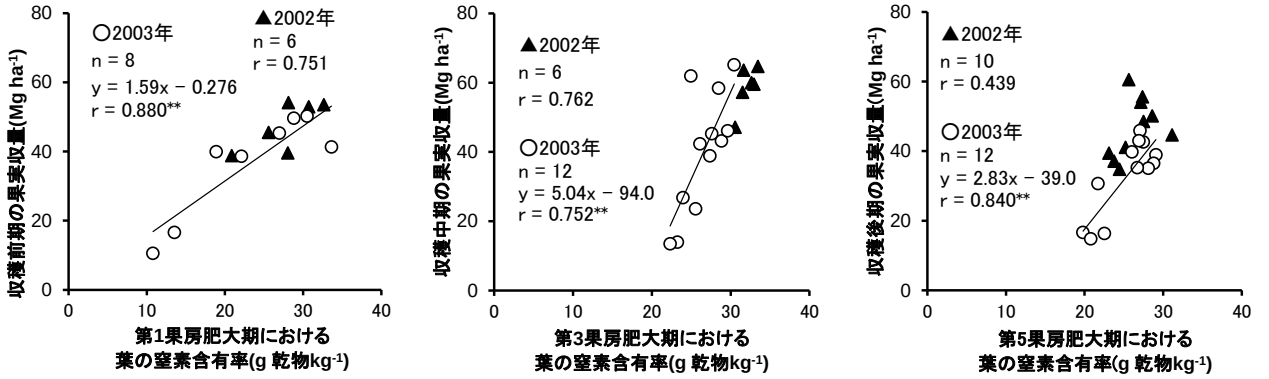


図 3-2-4 第 1, 3, 5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度と同時期における葉の窒素含有率との関係



1) **は1%水準で相関が有意であることを示す

図 3-2-5 第 1, 3, 5 果房肥大期における葉の窒素含有率と収穫前期, 中期, 後期の果実収量との関係

4.考察

1)養液土耕における窒素施肥量および施肥時期が葉柄硝酸濃度に及ぼす影響

第 2 章において，慣行栽培の夏秋どりトマトにおける窒素栄養診断基準値を葉柄硝酸濃度 4,000～7,000 mg NO_3^- L^{-1}とした．これに対し，養液土耕では第 1 果房肥大期の葉柄硝酸濃度は 4000 mg NO_3^- L^{-1}を下回る事例が多かった(図 3-2-2)．これは各処理区における定植から第 1 果房肥大期までの窒素施肥量が 0～75 kg N ha^{-1}であり(表 3-2-1)，慣行栽培の標準基肥窒素量(100 kg N ha^{-1})(北海道農政部，2010)よりも少ないためと考えられた．また，第 1 果房肥大期では他の時期に比べ葉柄硝酸濃度が低くても収量を確保できた(図 3-2-3)理由としては，第 1 果房肥大期は他の時期と比べ低い葉柄硝酸濃度でも葉の窒素含有率が高まること(図 3-2-4)と葉の窒素含有率の低下に対する収量の低下の幅が小さい(図 3-2-5)ためと考えられる．果菜類では果実生産が盛んになると，吸収した窒素や作物体内の窒素が果実に優先的に分配される(福徳ら，2000；種村，2010)ことから，果実生産が盛んになる前の第 1 果房肥大期ではそれ以降の時期と比べ吸収窒素の葉への分配割合が高く，葉の窒素含有率が高まりやすいと考えられた．

第 2 果房肥大期以降において，果実収量が標準区の 90%以上を得た区の葉柄硝酸濃度はおおむね 4,000 mg NO_3^- L^{-1}以上で推移した(図 3-2-2)ことや，同時期の葉柄硝酸濃度が 4,000 mg NO_3^- L^{-1}を大きく下回ると収量が低下する(図 3-2-3)ことは，慣行栽培(第 1 節)の場合と同様であった．

北海道における夏秋どりトマトの慣行栽培では，第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度は葉柄採取時における積算窒素施肥量や土壌硝酸態窒素含量と高い相関を示した(第 1 節)．養液土耕では各果房肥大期の葉柄硝酸濃度は直近の窒素施肥量と高い相関を示した(表 3-2-2)．Ⅱ期の窒素施肥処理は第 1 果房肥大期に始まるが，その 20 日後以降にあたる第 3～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度はⅡ期の窒素施肥量と有意な正の相関を示した(表 3-2-2)．また，第 2 果房肥大期の葉柄硝酸濃度が第 3～5 果房肥大期と比べⅠ期の窒

素施肥量との相関係数が高く，Ⅱ期の窒素施肥量との相関係数がやや低いことから，葉柄硝酸濃度は採取前 20 日間程度の累積窒素施肥量を反映していると考えられた．

2)葉柄硝酸濃度，葉の窒素含有率および果実収量の相互関係

葉柄硝酸濃度と葉の窒素含有率との関係について調査した結果，葉柄硝酸濃度は葉柄採取時における葉の窒素含有率と高い相関を示した(表 3-2-2，図 3-2-4)．Locascioら(1997)の報告においても，定植 4～8 週間後の葉柄硝酸濃度は同時期における葉の窒素含有率と最も高い相関を示すことから，トマトの葉柄硝酸濃度は葉柄採取時における作物の窒素栄養状態を反映すると考えられた．一方，第 3，5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度が5,000 mg NO_3^- L^{-1}以上で葉の窒素含有率が横ばいになった(図 3-2-4)ことは，この範囲では施肥などの窒素供給を増加させても葉緑体の形成に寄与せず，硝酸態窒素を作物体内に蓄積させていると考えられた．

葉の窒素含有率と果実収量との関係について，トマトにおける葉の窒素含有率は光合成速度(Tanaka ら，1974；Scholbergら，2000)や果実の総収量(Locascioら，1997)と正の相関を持つことが報告されている．2003年の第1，3，5 果房肥大期(それぞれ6月 10 日，6月 30 日，7月 20 日頃)における葉の窒素含有率は収穫前期，中期，後期(それぞれ 7 月中旬～8 月上旬，8 月上旬～下旬，8 月下旬～9 月中下旬)(図 3-2-1)の果実収量と有意な正の相関を示した(図 5)．2002 年は葉の試料採取点数が少なく有意な相関は得られなかったが，プロットは 2003 年の回帰直線の近辺にあることから 2003 年と同様の傾向を示すと考えられた(図 3-2-5)．

第 1，3，5 果房肥大期における葉の窒素含有率は 25 g kg^{-1}を下回ると果実収量が低下するが，その傾向は栄養生長と生殖生長が並行する第 3，5 果房肥大期でより顕著であった(図 3-2-5)．前述したように，生殖生長が盛んになってからは，根から吸収された窒素や作物体内の窒素は果実に優先的に転流される(福徳ら，2000；種村，2010)ことや，シンクの発達時期に根からの窒素供給が不十分であると葉の窒素含有率は急速に低下すること(Onoら，1996)から，果実生産が盛んな時期に葉の窒素含有率を低下させると後の収量を大幅に減少させると考えられた．トマトの養液土耕では，多頻度の分施により窒素を安定供給することによって葉の窒素含有率が維持され，慣行栽培と比べ果実収量は高くなった(本章第 1 節)．果実収量を確保するためには，栄養生長と生殖生長が並行する期間における葉の窒素含有率を 25 g kg^{-1}以上に保つ必要があると考えられた．

各果房肥大期の葉柄硝酸濃度と果実収量との関係について調査した結果，第2果房肥大期(6月 20 日頃)は収穫中期(8 月上～下旬)，第 3～5 果房肥大期(6 月 30 日～7 月 20 日頃)は収穫中期(8 月上～下旬)および後期(8 月下旬～9 月中下旬)(図 3-2-1)の果実収量と有意な相関を示すこと(表 3-2-2)から，葉柄硝酸濃度は葉の窒素含有率と同様に葉柄採取時より約 30～60 日後の果実収量に及ぼす影響が大きいと考えられた．

宍戸ら(1991)は，トマトにおける花房のシンク活性は開花を機に高まりはじめ，果実肥大の盛期である開花 4 週間後に最も高まると報告している．本報告では第1花房の開花から収穫始めまで約 60 日を要している(図 3-2-1)．各栄養診断時期の葉柄硝酸濃度は葉柄採取後 30～60 日における果実収量と高い相関を示すことから，葉柄硝酸濃度は開花期(シンク活性の高まり始め)から果房肥大盛期(シンク活性が最も高い時期)にあたる果房の収量を予測する指標になると考えられた．

一方，第 2～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度が 5,000～6,000 mg NO_3^- L^{-1}で総収量は頭打ちになった(図 3-2-3)ことは，これ以上葉柄硝酸濃度を高めても葉の窒素含有率が高まらないため(図 3-2-4)と考えられた．

3)養液土耕における葉柄硝酸濃度の適正範囲

葉柄硝酸濃度と総果実収量との関係について，第 1 果房肥大期は 500 mg NO_3^- L^{-1}，第 2 果房肥大期は 2,000 mg NO_3^- L^{-1}，第 3～5 果房肥大期は 4,000 mg NO_3^- L^{-1}を下回ると果実総収量は標準区比の 90%(2002 年は 141 Mg ha^{-1}，2003年は125 Mg ha^{-1})を下回った(図3-2-3)．一方，葉の窒素含有率が 25 g kg^{-1}を下回ると果実収量が大きく低下する(図 3-2-5)ことから，葉の窒素含有率を 25 g kg^{-1}以上に維持するための葉柄硝酸濃度を図 4 から判断すると，第 1 果房肥大期では 1,000 mg NO_3^- L^{-1}，第 3，5 果房肥大期では 4,000 mg NO_3^- L^{-1}以上が必要と考えられた．第 2 果房肥大期における葉の窒素含有率の数値は得られていないが，第 2 果房肥大期は第 3，5 果房肥大期と同様に栄養生長と生殖生長が並行し，窒素栄養状態の維持が重要な時期であることから，収量を確保するための葉柄硝酸濃度の下限値は第 1 果房肥大期は 1,000 mg NO_3^- L^{-1}，第 2 果房肥大期以降は 4,000 mg NO_3^- L^{-1}と考えられた．

葉柄硝酸濃度が下限値を下回った場合の対応について，慣行栽培では直ちに窒素 40 kg N ha^{-1}を追肥し，5 日後に再度窒素 40 kg N ha^{-1}を追肥することとした(第 2 章)．養液土耕における標準施肥条件下では，葉柄硝酸濃度が下限値を下回ることは少ないと考えられるが，液肥混入器の不調などにより施肥が設計通りに行われなかった場合には葉柄

硝酸濃度が下限値を下回ることも想定される．標準区における各果房肥大期間の積算窒素施肥量は 24～39 kg N ha^{-1}であるため，葉柄硝酸濃度が下限値を下回った場合は速やかに窒素栄養状態を回復させるため，次の診断時期まで(約 10 日間)の窒素施肥量を指針の倍量(標準の 3 kg N ha^{-1} d^{-1}に不足の最大見積もり分 3 kg N $ha^{-1}d^{-1}$を追加)を与えることが望ましい．

作物の窒素吸収が窒素同化よりも相対的に速い場合に葉柄硝酸濃度は高まると考えられる．本報告では葉柄硝酸濃度には「見かけの施肥窒素利用率」と「窒素吸収量/窒素施肥量」のどちらの影響が大きいのかを比較した(表 3-2-2)．施肥窒素利用率は 2002 年は 0.75-3.0-1.5 区，2003 年は標準区で最も高く(本章第 1 節)，これらの区では葉柄硝酸濃度はおおむね適正値を推移していた(図 3-2-2)．それに対し，施肥量が多く葉柄硝酸濃度が高まる 1.5-6.0-1.5 区や，施肥量が少なく葉柄硝酸濃度が下限値を下回る 1.5-1.5-1.5 区では，標準区と比べ施肥窒素利用率が低かった(本章第 1 節，図 3-2-2)．これらのことが葉柄硝酸濃度と施肥窒素利用率の相関が低い要因と考えられた(表 3-2-2)．一方，「窒素吸収量/窒素施肥量」比は葉柄硝酸濃度と負の相関関係にあった(表 3-2-2)．この傾向は慣行栽培トマト(第 2 章，山田ら，1995)や高設栽培イチゴ(日笠ら，2009)においても示されている．また，養液土耕トマトの葉柄硝酸濃度は窒素施肥量や土壌硝酸態窒素量と連動して高まる(林ら，2003；上山ら，2004)一方で，葉柄硝酸濃度が低く窒素不足と見なされた区では施肥窒素利用率は低下した(林ら，2003)ことから，葉柄硝酸濃度は見かけの施肥窒素利用率よりも窒素の同化と供給のバランスを反映するものと考えられた．

第 2～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度は 5,000～6,000 mg NO_3^- L^{-1}で果実収量が頭打ちになることや(図 3-2-3)，葉柄硝酸濃度と「窒素吸収量/窒素施肥量」が負の相関関係にあること(表 3-2-2)から，過剰な施肥を避ける必要がある．窒素減肥が葉柄硝酸濃度に及ぼす影響について調査した結果，第 1 果房肥大期以降の窒素施肥量を標準より半減させた 1.5-1.5-1.5 区では，次の診断時期にあたる第 2 果房肥大期の葉柄硝酸濃度が標準区(1.5-3.0-1.5)と比べ 1,300 ないし 2,600 mg NO_3^- L^{-1}低くなった(図 3-2-2)．過剰な施肥を避ける一方で，減肥による減収のリスクも回避しなければならないことから，葉柄硝酸濃度の上限値は 7,000 mg NO_3^- L^{-1}が妥当と考えられた．慣行栽培では葉柄硝酸濃度が上限値を超えた場合，追肥を省略することとしている(第 2 章)が，養液土耕では多頻度分施で必要とするだけの養分供給を行うため，慣行施肥と比べ土壌硝酸態窒素含量が低く推移する(表 3-1-5)ことから，窒素施肥を全量削減すると減収する恐れがあると考えられた．これらのことから，養液土耕において葉柄硝酸濃度が上限値を超えた場合には，次の診断時期までの窒素施肥量を指針から半減させることが望ましい．

5.要約

養液土耕において過不足のない施肥を行うには，作物の生育時期に合わせた窒素施肥量を設定するとともに，作物の栄養状態に合わせた施肥の調節を行うことが重要である．本報告では夏秋どりトマトの養液土耕について窒素栄養診断基準を設定するにあたり，窒素施肥量が葉柄硝酸濃度に及ぼす影響と葉柄硝酸濃度が果実収量や葉の窒素含有率に及ぼす影響について検討した．

1） 葉柄硝酸濃度は直近の窒素施肥量と高い相関を示しており，葉柄採取前 20 日間程度の累積窒素施肥量を反映すると考えられた．

2) 葉柄硝酸濃度は葉柄採取時における葉の窒素含有率や葉柄採取後 30～60 日間における果実収量と高い正の相関を示した．このことから，葉柄硝酸濃度は葉柄採取時における作物の窒素栄養状態を反映し，開花から果房肥大盛期にあたる果房の収量を予測する指標になると考えられた．

3) 葉の窒素含有率を維持し収量を確保するためには，葉柄硝酸濃度の下限値は第 1 果房肥大期では 1,000 mg NO_3^- L^{-1}，第 2 果房肥大期以降は 4,000 mg NO_3^- L^{-1}と考えられた．また，過剰な施肥を避ける観点から葉柄硝酸濃度の上限値は 7,000 mg NO_3^- L^{-1}と考えられた．

第 3 節 養液土耕を導入した生産者圃場における土壌硝酸態窒素の蓄積と葉柄硝酸濃度の推移

1.はじめに

北海道の七飯町と北斗市において 2002 年から養液土耕のシステムが 14 戸の生産者に導入されており，トマトやカーネーションなどが栽培されている．カーネーションについて養液土耕を導入した生産者圃場では，収量や品質を維持しつつ減肥が可能であったことや灌水作業の省力化が確認された（福川ら，2012）．本節では，養液土耕を導入したトマト生産者圃場おいて，定植時の土壌硝酸態窒素や施肥量がトマトの生育や葉柄硝酸濃度などに与える影響を調査した．

2.材料および方法

調査は 2002 年と 2003 年に北海道北斗市の生産者圃場で行った．調査地点数は 2002 年，2003 年ともに 2 戸，4 筆であり，いずれも灰色低地土であった．

各調査圃場における栽培前土壌を深さ 20 cm ごとに 60 cm 深まで採取し硝酸態窒素含量を測定した．また，基肥窒素量，定植後の窒素施肥量および可販果収量について生産者から聞き取り調査を行った．2003 年のみ収穫終了時にトマト株間中間の土壌を深さ 20 cm ごとに 60 cm 深まで採取し土壌硝酸態窒素含量を測定した．葉柄硝酸濃度の測定について，第 1～5 果房肥大期に第 1 果房直下葉の先端小葉を採取し葉柄をを乳鉢で磨砕後，蒸留水で希釈抽出した．抽出液について 2002 年は小型反射式光度計，2003 年はオートアナライザーを用いて硝酸濃度（新鮮重あたりの硝酸濃度 mg NO_3^- L^{-1}）を測定した．

3.結果

生産者 A，B 圃場は 3 月下旬～4 月上旬定植の半促成作型であり，生産者 A は 7 段収穫に対し，生産者 B は 11～12 段収穫の長期どりであった（表 3-3-1，3-3-2）．栽培前の土壌について，2002 年の A-1 を除く圃場で表層（0～20 cm）の硝酸態窒素含量が 50 mg N kg^{-1}以上残存していた．また，2003 年の B-3 を除く圃場では下層（20～40，40～60 cm）に硝酸態窒素含量が 50 mg N kg^{-1}以上残存する層が認められた（表 3-3-1）．養液土耕を初めて導入した 2002 年は生産者の慣例に沿って基肥窒素が 100～150 kg N ha^{-1}施用された．2002 年における定植後の窒素施肥量については測定しなかった（表 3-3-1）．2003 年の基肥窒素量は 0～45 kg N ha^{-1}で 2002 年と比べ減少し，合計窒素施肥量も 19～70 kg N ha^{-1}に抑えられた（表 3-3-1）．生産者圃場における葉柄硝酸濃度は 2002 年において第 1 果房肥大期は 6,450～8,600 mg NO_3^- L^{-1}を示し，第 2 果房肥大期以降は 8,850～12,000 mg NO_3^- L^{-1}を推移した．2003 年においても葉柄硝酸濃度は大半の時期で 7,000 mg NO_3^- L^{-1}を上回って推移した（表 3-3-2）．2002 年の生産者圃場ではトマトの草勢が強めに推移しており特に生産者 A の圃場では第 1 果房肥大期の茎径が 11.8～13.3 mm となり，生産者 B の圃場と比べ茎径が太く，草勢が強かった．2003 年は 2002 年と比べ茎径はやや細くなった（表 3-3-2）．トマト 1 段当たりの可販果収量（可販果収量÷収穫段数）は生産者 A は 10 Mg ha^{-1}程度，生産者 B は 12 Mg ha^{-1}弱であり，2 カ年の収量水準はほぼ同等であった（表 3-3-2）．栽培終了時における土壌硝酸態窒素含量は生産者 A の圃場では各層とも栽培前と比べて低くなった．生産者 B の圃場では 0～20 cm 層は低くなったが，20～40 cm 層は高まった（図 3-3-1）．

表 3-3-1 生産者圃場の栽培前土壌硝酸態窒素，窒素施肥量など

生産者圃場	栽培前土壌硝酸態窒素 (mg N kg^{-1})			窒素施肥量[1] (kg N ha^{-1})			定植日	収穫期間
	0-20cm	20-40cm	40-60cm	基肥	定植後	合計	(月/日)	
2002年								
A-1	38	40	94	141	－	－	3/27	5月下旬～
A-2[2]	118	263	235	100	－	－	3/27	8月上旬
B-1	625	191	83	150	－	－	4/ 3	5月下旬～
B-2	143	316	159	133	－	－	4/ 4	10月上旬
2003年								
A-2[2]	298	188	108	44	24	68	3/27	5月下旬～
A-3	593	405	160	45	25	70	3/27	8月中旬
B-3	155	18	9	0	19	19	4/ 3	5月下旬～
B-4	361	82	124	0	19	19	4/ 3	9月下旬

1）窒素施肥量は生産者への聞き取りによる
2）2002年と2003年のA-2は同一圃場
3）表中の－は欠測

表 3-3-2 生産者圃場における栽培期間中の土壌硝酸態窒素，葉柄硝酸濃度など

生産者圃場	葉柄硝酸濃度 (mg NO_3^- L^{-1})		茎径(mm)[1]		収穫段数	可販果[2] 収量 (Mg ha^{-1})
	第1果房肥大期	第2～5果房肥大期 (最小～最大)	第1果房肥大期	収穫始期		
2002年						
A-1	7450	10200～11150	11.8	13.1	7	70
A-2[3]	8600	10150～11050	13.3	14.5	7	70
B-1	8550	8850～12000	9.3	11.7	12	140
B-2	6450	10050～11800	8.9	10.7	12	140
2003年						
A-2[3]	6753	9727～11885	10.0	14.1	7	70
A-3	8012	6994～ 9605	10.1	12.1	7	70
B-3	7494	8165～10140	9.3	10.5	11	130
B-4	6996	7242～10524	7.8	9.2	11	130

1) 茎径の測定位置は第1果房直下
2) 可販果収量は生産者への聞き取りによる
3) 2002年と2003年のA-2は同一圃場

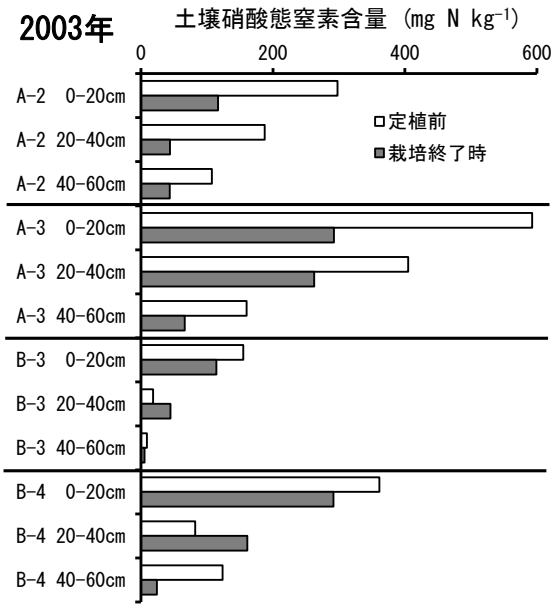


図 3-3-1 生産者圃場における栽培前と栽培終了時の層位別土壌硝酸態窒素含量(2003 年)

4.考察

1) 生産者圃場における栽培前の残存硝酸態窒素量

生産者圃場では表層，下層ともに栽培前の土壌硝酸態窒素が残存していた(表 3-3-2)．トマトのような深根性の作物では深さ60 cmまでの土壌硝酸態窒素を追肥窒素と同様に評価できる(林ら，2009)．土層の容積重を 1.0 Mg m^3とした場合，各生産者圃場において栽培前に 0～60 cm 層に残存する硝酸態窒素は 344～2,316 kg N ha^{-1}と見積もられた．一方，生産者Ａ圃場とＢ圃場における可販果収量はそれぞれ 7 Mg ha^{-1}および 13～14 Mg ha^{-1}である(表 3-3-2)ことと，北海道の夏秋どりトマトにおける規格内収量 1 Mg あたりの窒素吸収量は 2.0 kg N 前後である(八木ら，2008；林，2011)ことから，生産者Ａ圃場とＢ圃場におけるトマトの窒素吸収量はそれぞれ 140 kg N ha^{-1}程度，260～280 kg N ha^{-1}程度と見積もられた．これらのことから，本調査における生産者圃場の硝酸態窒素の残存量は，いずれもトマト 1 作分の窒素吸収量を上回っていた．

各生産者圃場における2003 年の窒素施肥量は2002 年と比べ少なかったが，トマト 1 段あたりの可販果収量は同等であった．作土からの土壌窒素供給量が作物 1 作分以上蓄積した圃場における養液土耕の報告では，促成トマトについて養液土耕 50%減肥区で慣行施肥区と同等の収量が得られている(荒木ら，2005)ほか，促成ナスについて点滴無肥料区で慣行施肥区以上の収量が得られている(満田ら，2005)．土壌の硝酸態窒素を評価し施肥を調節することは作物を適切に生育させる面と環境負荷低減の面で重要である．

2) 栽培前の残存硝酸態窒素が養液土耕トマトの葉柄硝酸濃度等におよぼす影響

生産者圃場では葉柄硝酸濃度は第 1 果房肥大期の時点で 7000 mg NO_3^- L^{-1}を上回る事例が半数以上であり，第 2 果房肥大期以降はほぼ全てにおいて 7000 mg NO_3^- L^{-1}を上回った(表 3-3-2)．このような葉柄硝酸濃度の挙動は，土壌硝酸態窒素が蓄積した慣行栽培圃場(図 2-2-2，図 2-2-5)と同様であった．

茎葉の生育について，2002 年は各圃場とも 100 kg N ha^{-1}以上の基肥窒素が施用されたほか，定植後に灌水や養液供給が行われたことから草勢が強くなり，生産者Ａの圃場では第 1 果房肥大期における茎径が 11.8～13.3 mm となった(表 3-3-2)．窒素施肥量や灌水量が多く茎葉の生育が

旺盛な圃場ではチャック果や窓あき果の発生が多くなる(中村ら，2001)ことから，土壌硝酸態窒素が蓄積した圃場では茎葉を過剰生育させないことが重要である．2002 年は草勢が強く推移したことを踏まえ，2003 年は基肥窒素量や養液量を抑えたことにより，茎径は 2002 年と比べ細く，草勢は中庸となった．

これらのことから，土壌硝酸態窒素が蓄積した条件下において，葉柄硝酸濃度は診断基準値上限の 7000 mg NO_3^- L^{-1}を超えることは避けられないが，茎葉の過剰生育を防ぐことは可能と考えられた．養液土耕において事前に茎葉の過剰生育を回避するには，定植前の土壌診断による施肥対応と，第 1 果房肥大期よりも前にトマトの窒素栄養状態を判定する基準が必要と考えられた．

5.要約

養液土耕システムを導入した生産者圃場について，定植時の土壌硝酸態窒素や窒素施肥量がトマトの生育や葉柄硝酸濃度などに与える影響を調査した．

1） いずれの生産者圃場も定植前の表層および下層土の硝酸態窒素が蓄積しており，葉柄硝酸濃度が診断基準値よりも高く推移した．

2) 100 kg N ha^{-1}以上の窒素基肥が行われた 2002 年は茎径が太く，草勢が強くなった．窒素施肥量を少なくした 2003 年は草勢を中庸に抑えることができ，果実収量は 2002 年と同水準であった．

3） 養液土耕において事前に茎葉の過剰生育を回避するには，定植時における土壌硝酸態窒素の診断基準と第 1 果房肥大期より前にトマトの栄養状態を判定する基準が必要と考えられた．

第 4 節　土壌無機態窒素が残存した圃場における養液土耕の窒素施肥対応

1.はじめに

養液土耕による肥培管理について，本章の第 1 節では作物の生育時期ごとの養分要求量に合わせた施肥量を設定し，第 2 節では養液土耕における生育時期ごとの作物栄養診断基準を設定した．第 1，2 節では養液土耕における施肥と養分吸収の関係や施肥が葉柄硝酸濃度に与える影響を正確に把握するため，土壌硝酸態窒素の残存量を少なく押さえたハウスで試験を実施している．しかし，施設栽培では残存する硝酸態窒素など土壌からの窒素供給が潤沢な場合が少なくない．

第 3 節では，生産者圃場は定植時における土壌硝酸態窒素が多く残存し，葉柄硝酸濃度は診断基準値を上回った．また，土壌硝酸態窒素が蓄積した圃場では定植時に窒素施肥を行うと草勢が強くなり，茎葉の生育過剰が懸念された．本節では，土壌硝酸態窒素の残存を想定したトマト養液土耕の窒素施肥対応について検討した．

2.材料および方法

試験は 2003 年に北海道北斗市の道南農業試験場のビニールハウス圃場において実施した．圃場の土壌化学性および耕種概要は第 3 章第 1 節に示した通りである．試験処理は残存窒素に見立てた基肥を全面全層に施し，点滴チューブで水または液肥を灌水する基肥+養液区を設けるとともに，比較として養液土耕標準区と慣行施肥区を設けた．各処理区における積算窒素施肥量の推移は図 3-4-1 の通りである．

基肥+養液区について基肥窒素を 100 kg N ha^{-1}施用し残存窒素に見立てた．定植から第 1 果房肥大期まで点滴チューブで灌水のみ行い，第 1 果房肥大期以降 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}の窒素施肥を 50 日間行った区（基肥 100+養液 150 区）と 67 日間行った区(基肥 100+養液 201 区)を設けた．基肥窒素は硫安を用いた．また，基肥のリンは重過石を用いて 87 kg P ha^{-1} (200 kg P_2O_5 ha^{-1})，カリウムは硫加を用いて 166 kg-K ha^{-1} (200 kg K_2O ha^{-1})を施用した．第 1 果房肥大期以降の施肥には期間を通じて ORF-3(大塚化学,N-P-K: 140-35-208 g kg^{-1})を用いた．施肥期間以降は灌水のみとした．養液土耕標準区では基肥を施用せず，定植から第 1 果房肥大期までの日窒素施肥量を 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}，第 1 果房肥大期から摘心までの日窒素施肥量を 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}，摘心後 1 ヶ月間の日窒素施肥量を 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}とした．慣行施肥区は基肥窒素を 100 kg N ha^{-1}施用し，第 1～5 果房の肥大期毎に 40 kg N ha^{-1}の窒素追

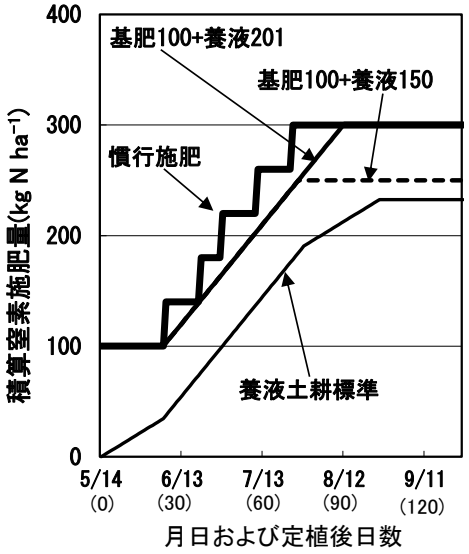


図 3-4-1　各処理区における積算窒素施肥量の推移

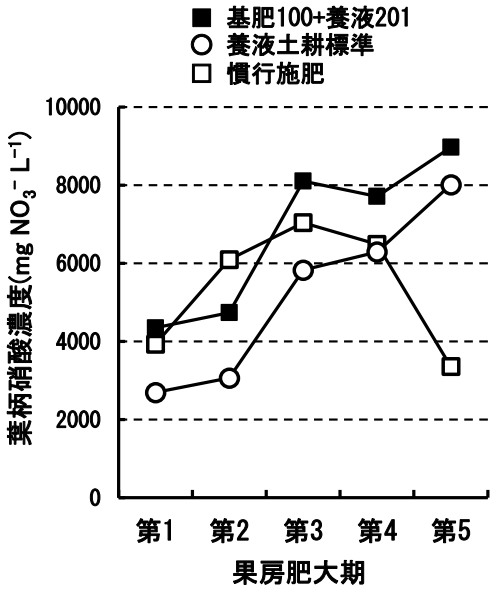


図 3-4-2　各処理区における葉柄硝酸濃度の推移

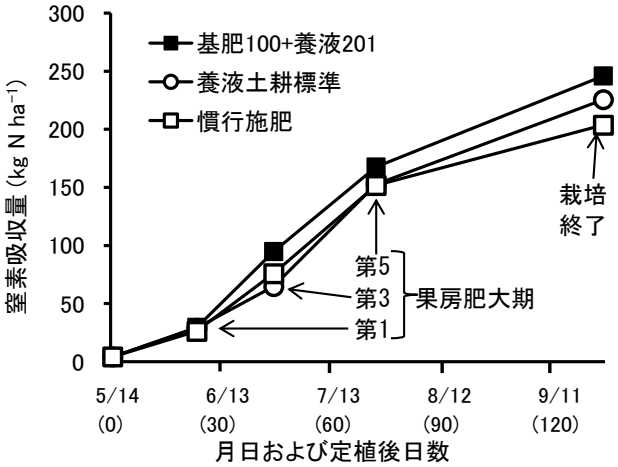


図 3-4-3　各処理区における窒素吸収量の推移

表 3-4-1 各処理区における果実収量，乾物生産量および収穫指数

処理区名および総窒素施肥量（括弧内の数値 kg N ha^{-1}）	果実収量[1)] ($Mg\ ha^{-1}$) 前期	中期	後期	合計[2)]	乾物生産量 ($Mg\ ha^{-1}$) 茎葉	果実	収穫指数 (%)[3)]
基肥100+養液150 (250)	45	66	24	136 (98)	3.3	9.2	73
基肥100+養液201 (301)	44	66	27	137 (98)	3.3	9.2	74
養液土耕標準 (233)	47	52	40	139 (100)	2.7	9.3	78
慣行施肥 (300)	35	45	29	109 (78)	2.5	7.6	76

1) 収穫期間11週間のうち，1～3週間目を前期，4～7週間目を中期，8～11週間目を後期とした
2) 合計収量における括弧内の数値は養液土耕標準区の収量を100とした指数
3) 果実乾物生産量／茎葉と果実の合計乾物生産量×100(%)

表 3-4-2 各処理区における窒素吸収量，窒素利用率および果実乾物生産効率

処理区名および総窒素施肥量（括弧内の数値 kg N ha^{-1}）	窒素吸収量 ($kg\ N\ ha^{-1}$) 茎葉	果実	合計	施肥窒素利用率 (%)[1)]	吸収窒素の果実乾物生産効率[3)]
基肥100+養液150 (250)	64	172	236	63	39.1
基肥100+養液201 (301)	67	179	246	56	37.2
養液土耕標準 (233)	56	170	226	63	41.7
慣行施肥 (300)	54	150	204	—[2)]	37.2

1) 施肥窒素利用率は，（合計窒素吸収量-無施肥区の合計窒素吸収量）／総窒素施肥量×100(%)
無施肥区の合計窒素吸収量は78 kg N ha^{-1}(第3章第1節)
2) 慣行施肥区は灌水方法が異なるため施肥窒素利用率を算出しない
3) 吸収窒素の果実乾物生産効率は，果実乾物生産量／合計窒素吸収量 ($kg\ kg^{-1}$)

肥を行った．養液土耕標準区および慣行施肥区における施肥の詳細は第3章第1節に記載した通りである．果実収量，作物体の窒素含有率および窒素吸収量，土壌硝酸態窒素の調査・分析方法は第3章第1節に，葉柄硝酸濃度の測定方法は第3章第2節に記載した通りである．

3.結果

基肥100+養液201区の葉柄硝酸濃度は第1果房肥大期は 4,000 mg NO_3^- L^{-1}程度，以降は 5,000～9,000 mg NO_3^- L^{-1}程度を推移し，養液土耕標準区と比べ常に1,000～2,000 mg NO_3^- L^{-1}高い値を示した．慣行施肥区の葉柄硝酸濃度は第5果房肥大期を除き4,000～7,000 mg NO_3^- L^{-1}を推移した(図 3-4-2)．

第1果房肥大期における窒素吸収量はいずれの区も30 kg N ha^{-1}弱であったが，基肥100+養液201区では第3果房肥大期以降の窒素吸収量が他の区と比べ多い傾向で推移した(図 3-4-3)．

基肥100+養液150および201区の合計果実収量は養液土耕標準区とほぼ同水準であり，慣行施肥区と比べ多い傾向にあった．また，基肥100+養液150および201区は養液土耕標準区と比べ中期の収量が多く，後期の収量が低い傾向にあった(表 3-4-1)．基肥100+養液150および201区は養液土耕標準区と比べ茎葉の乾物生産量が多い傾向にあり，収穫指数が低くなる傾向にあった(表 3-4-1)．基肥100+養液150および201区は養液土耕標準区と比べ合計窒素吸収量はそれぞれ10, 20 kg N ha^{-1}多かったが，果実の収量および乾物生産量は同等であることから，果実乾物生産効率は低くなった(表 3-4-1, 3-4-2)．基肥 100+養液150 区の施肥窒素利用率は 63%で養液土耕標準区と同等であったが，基肥 100+養液 201 区では施肥窒素利用率が56%に低下した(表 3-4-2)．

基肥 100+養液 201 区における葉の窒素含有率は第 3 果房肥大期までは慣行施肥区と同等であったが第5果房肥大期は慣行施肥区よりも高い傾向にあった(表 3-4-3)．基肥+養液区における土壌硝酸態窒素含量は慣行施肥区と比べ低めに推移した(表 3-4-3)．

表 3-4-3 各処理区における葉の窒素含有率と土壌硝酸態窒素含量の推移

処理区名および総窒素施肥量（括弧内の数値 kg N ha^{-1}）	葉の窒素含有率（g 乾物kg^{-1}）				土壌硝酸態窒素含量（0～20cm深，mg N kg^{-1}）			
	第1果房肥大期	第3果房肥大期	第5果房肥大期	収穫終了時	第1果房肥大期	第3果房肥大期	第5果房肥大期	収穫終了時
基肥100+養液150 (250)	－	－	－	25.1	5	38	30	6
基肥100+養液201 (301)	32.3	28.6	26.1	24.2	3	38	66	6
養液土耕標準 (233)	27.9	25.5	27.9	25.3	4	19	52	3
慣行施肥 (300)	32.5	28.9	23.2	28.0	4	49	81	9

1）表中の－は試料未採取

4.考察

1）土壌無機態窒素が残存した圃場におけるトマト養液土耕の果実生産

基肥+養液区は慣行施肥区と比べ窒素吸収量と果実収量が多い傾向にあった(表 3-4-1). 養液土耕による多頻度分施が収量や施肥窒素利用率を高めることは，既往の報告（Cook ら，1991；安・池田，2009；植田ら，2009）や，本章第 1 節で示している. これらの報告では，基肥を施用した慣行施肥区と基肥を施用しない養液土耕区との比較となっているが，本節では，同量の窒素基肥を施用した条件においても，養液土耕による多頻度分施が窒素吸収量や果実収量が増加させることを示した. 基肥 100+養液 150 区は果実収量が基肥 100+養液 201 区と同等であり，施肥窒素利用率および果実乾物生産効率が高い傾向にあることや，基肥 100+養液 201 区では第 3～5 果房肥大期の葉柄硝酸濃度が基準値の上限(7000 mg NO_3^- L^{-1}，本章第 2 節)を上回ることから，基肥窒素を 100 kg N ha^{-1}施肥した条件においても慣行施肥と比べ 50 kg N ha^{-1}程度の窒素減肥が可能と考えられた.

基肥+養液区の収量は養液土耕標準区とほぼ同等であったが，収穫指数と果実乾物生産効率が低い傾向にあった(表 3-4-1，表 3-4-2). トマトは栄養成長と生殖生長が並行する作物(相馬，1987)であるが，窒素施肥量や灌水量が多いと，栄養生長が強くなり，茎葉の生育が旺盛になる(相馬ら，1977；中村ら 2001). 基肥 100+養液 201 区では養液土耕標準区と比べ葉柄硝酸濃度が高く推移した(図 3-4-2). また，第 3 果房肥大期における茎葉の窒素吸収量は基肥 100+養液 200 区では 51 kg N ha^{-1}と，養液土耕標準区の 33 kg N ha^{-1}と比べ多い傾向にあった(データ省略). これらのことから，トマトの養液土耕では定植時の土壌に無機態窒素が残存していると，栄養生長が旺盛になりやすいことが示された. 生育初期に養液土耕標準区よりも多く窒素を供給しても，収量向上には寄与せず施肥窒素利用率や果実乾物生産効率を低下させることは本章第 1 節で確認されている(表 3-1-3，表 3-1-4)ことから，トマトの養液土耕では定植前の土壌無機態窒素は極力低く抑えることが望ましいと考えられた.

2）養液土耕における定植時の土壌窒素診断基準値

基肥+養液区では定植から第 1 果房肥大期まで灌水のみとしている. 仮に，土壌無機態窒素が残存した圃場で定植直後から養液を供給すると，トマトは与えられた養液の他に土壌に蓄積していた無機態窒素を吸収し，茎葉が過繁茂になることが想定される. 土壌に無機態窒素が残存している場合は定植後の窒素施肥を省略する必要がある. しかし，無機態窒素残存量が少ない条件で窒素施肥を省略すると，果実収量が低下する恐れがあるため，土壌診断基準値を設定する必要がある.

北海道施肥ガイド(北海道農政部，2010)では施設園芸作物の土壌窒素診断指標として 0～20 cm 層の硝酸態窒素が用いられている. 基肥+養液区では定植時の土壌無機態窒素が 100 kg N ha^{-1}存在している. また，土壌の容積重を 1.0 Mg m^{-3}として，100 kg N ha^{-1}の無機態窒素を深さ 20 cm 以内に混和すると，0～20 cm 深の土壌無機態窒素含量は 50 mg N kg^{-1}となる. 定植前における土壌硝酸態窒素含量が 50 mg N kg^{-1}以上の場合，定植から第1果房肥大期までは窒素施肥を行わず灌水のみで十分な生育を確保できると考えられた. 土壌硝酸態窒素含量が 50 mg N kg^{-1}未満の場合は窒素施肥を省略すると減収する恐れもあるため，定植後 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}の窒素施肥を行うこととし，茎葉の過剰生育への対策として，生育の初期における窒素栄養診断法を確立する必要があると考えられた.

5.要約

土壌無機態窒素が残存した圃場におけるトマト養液土耕の窒素施肥法を検討するため，窒素 100 kg N ha^{-1}を定植前に施用した基肥+養液区を設け，慣行施肥区および養液土耕標準区と窒素吸収および果実収量を比較した．

1） 基肥+養液区は慣行施肥区と比べ窒素吸収量と果実収量が多い傾向にあり，多頻度分施による効果と考えられた．

2) 基肥+養液区の果実収量は養液土耕標準区とほぼ同等であったが，収穫指数と果実乾物生産効率は低い傾向にあった．基肥+養液区では窒素栄養状態が高まり栄養生長が旺盛になったため，収穫指数や果実乾物生産効率が低下したと考えられた．

3) 養液土耕では定植前の残存無機態窒素はない方が望ましく，定植前土壌の硝酸態窒素含量が 50mg N kg^{-1}以上の場合，定植から第 1 果房肥大期までの窒素施肥は不要と考えられた．

第 5 節　生育初期における窒素栄養診断基準の設定

1.はじめに

本章第 2 節で設定した窒素栄養診断基準では初回の診断は第1果房肥大期に行われるが，養液土耕では第1果房肥大期の時点で窒素栄養状態に極端な過不足が認められた場合，第 3 節で見られた茎葉の過剰生育のように，生育の制御が難しくなることから，なるべく早く作物の窒素栄養状態を把握するための診断法が必要と考えられた．

本節では，第 1 果房肥大期より早い時期における窒素栄養診断法について検討した．

2.材料および方法

調査は 2003 年に北海道北斗市の道南農業試験場のビニールハウス圃場および北斗市の生産者圃場 2 戸，3 筆において実施した．試験場内のハウス圃場では定植から第 1 果房肥大期までの日窒素施肥量を 0, 0.75, 1.5, 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}とした区と，基肥窒素を 100 kg N ha^{-1}施用した区を設けた．また，生産者圃場では本章第 3 節の A-2, B-3 および B-4 圃場を調査対象とした．供試圃場の土壌硝酸態窒素含量は試験場内ハウスでは 0 mg N kg^{-1}, 生産者圃場では 155～361 mg N kg^{-1}であった(表 3-5-1).

葉柄硝酸濃度の測定葉位について，予備調査で第 1 果房より下 1～7 枚目の葉における葉柄硝酸濃度を定植時から 1 週間ごとに測定したが，定植時を除き各葉位の葉柄硝酸濃度に大きな差は認められなかったことから測定葉位は他の時期と同様に第 1 果房直下葉とした．

試験場内ハウスの各施肥処理区および生産者圃場において，トマトの定植時から第 1 果房肥大期にかけて 1 週間ごとに第 1 果房直下葉の先端小葉を採取した(表 3-5-2). 葉柄硝酸濃度についてはオートアナライザーを用いて測定した．

表 3-5-1　各処理区または圃場における土壌硝酸態窒素および窒素施肥量

処理区または圃場名	土壌硝酸態窒素含量[1)] (mg N kg^{-1})	基肥窒素量 (kg N ha^{-1})	日窒素施肥量[2)] (kg N ha^{-1} d^{-1})
場内ハウス			
0　kg N ha^{-1} d^{-1}	0	0	0
0.75 kg N ha^{-1} d^{-1}	0	0	0.75
1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}	0	0	1.5
3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}	0	0	3.0
基肥100kg N ha^{-1}	0	100	0
生産者圃場			
A-2	298	44	0
B-3	155	0	0
B-4	361	0	0

1) 定植前の土壌（深さ0～20cm）
2) 定植から第1果房肥大期までの施肥処理

3.結果

試験場内の定植時苗における第 1 果房直下葉葉柄硝酸濃度(以下,「葉柄硝酸濃度」は第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度を指す)は 500 mg NO_3^- L^{-1}弱であった．定植 6 日後の 5 月 21 日は無施肥である 0 kg N ha^{-1} d^{-1}区を除き葉柄硝酸濃度が上昇したが，5 月 28 日の第 2 花房開花始めでは 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}区を除き横ばいか低下に転じた．この時期における葉柄硝酸濃度は 0, 0.75 kg N ha^{-1} d^{-1}区ではほとんど検出されず，1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}区は約 700 mg NO_3^- L^{-1}, 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}区は約 6,000 mg NO_3^- L^{-1}, 基肥 100 kg N ha^{-1}区は約 1,600 mg NO_3^- L^{-1}であった(図 3-5-1). 第 1 果房肥大期における葉柄硝酸濃度は 0, 0.75 kg N ha^{-1} d^{-1}区ではほとんど検出されず，1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}区は約 2,700 mg NO_3^- L^{-1}, 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}区は約 4,500 mg NO_3^- L^{-1}, 基肥 100 kg N ha^{-1}区は約 3,900 mg NO_3^- L^{-1}であった(図 3-5-1)

A-2, B-3, B-4 圃場の定植時苗において葉柄硝酸濃度はほとんど検出されなかった．定植後は各圃場とも葉柄硝酸濃度は上昇し，4 月 17 日の第 2 花房開花始における葉柄硝酸濃度は 5,000～6,000 mg NO_3^- L^{-1}を示した．また，4 月 24 日の第 1 果房肥大期における葉柄硝酸濃度は各圃場とも 7,000 mg NO_3^- L^{-1}前後を示した(図 3-5-2).

表 3-5-2　各圃場における葉柄硝酸濃度の調査月日

	定植時(苗)	定植1週後	定植2週後	定植3週後	定植4週後
場内ハウス	5/15	5/21	○5/28	◎6/ 6	
生産者圃場A	3/27	4/ 4	4/10	○4/17	◎4/24
生産者圃場B	4/ 4	4/10	○4/17	◎4/24	

○は第2花房開花期　◎第1果房肥大期を指す

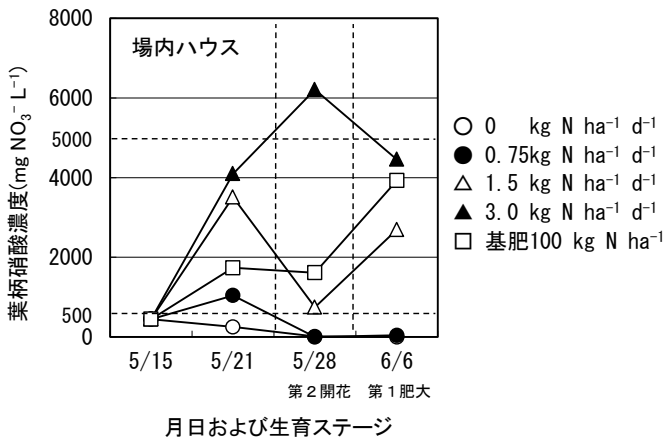


図 3-5-1 試験場内ハウスの各処理区における第１果房直下葉葉柄硝酸濃度の推移

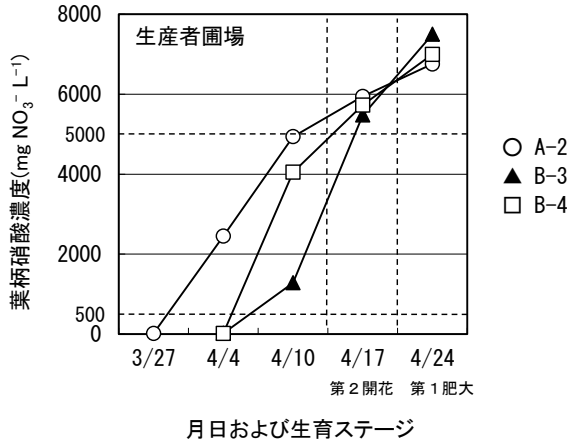


図 3-5-2 各生産者圃場における第１果房直下葉葉柄硝酸濃度の推移

4.考察

養液土耕では定植後，株元に肥料と水を与えるため効率的な施肥が行える反面，土壌硝酸態窒素が残存する圃場では茎葉の過剰生育を招く恐れがある．茎葉の過剰生育を防ぐため，なるべく早い時期に作物体の窒素栄養状態を把握できることが望ましい．試験場における定植時苗の葉柄硝酸濃度は 500 mg NO_3^- L^{-1}弱であったが，生産者の定植時苗では葉柄硝酸がほとんど検出されなかった(図 3-5-1，図 3-5-2)．これは育苗時の肥培管理に依存すると考えられた．試験場内ハウスにおける定植約 1 週間後の葉柄硝酸濃度は施肥量に応じて増減し，250～4,000 mg NO_3^- L^{-1}の範囲にあった(図 3-5-1)．一方，生産者圃場はいずれも土壌硝酸態窒素が過剰に蓄積しているが，定植約 1 週間後の葉柄硝酸濃度は 1,000～4,000 mg NO_3^- L^{-1}と幅があり(図 3-5-2)，試験場内の基肥 100 kg N ha^{-1}区(土壌無機態窒素含量 50 mg N kg^{-1}相当)の 1,700 mg NO_3^- L^{-1}と比べても必ずしも高い値ではなかった．定植 1 週間後の葉柄硝酸濃度は育苗時の肥培管理の影響を受けやすく，栄養診断時期としては早すぎると考えられた．いずれの生産者圃場においても第 2 花房開花始には葉柄硝酸濃度が高まること，試験場内では第 2 花房開花始に養液土耕標準である 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}区と倍量施肥の 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}区で葉柄硝酸濃度の差が大きくなることから，生育初期における作物体の窒素栄養状態を判断するには第2花房開花始が適当と考えられた．

第2花房開花始における葉柄硝酸濃度の基準値について，本章第 1 節の窒素施肥処理により果実収量にやや差があった 0.75 kg N ha^{-1} d^{-1}区と 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}区(それぞれ果実収量 121 Mg ha^{-1}，139 Mg ha^{-1})との葉柄硝酸濃度から下限値は 500 mg NO_3^- L^{-1}が適当と考えられた．土壌硝酸態窒素が高い生産者 A-2，B-3，B-4 圃場や，試験場内の 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}区のように必要以上の施肥があった場合，第 2 果房開花始時の葉柄硝酸濃度は 5,000 mg NO_3^- L^{-1}を超えることから第 2 果房開花始の葉柄硝酸濃度の上限は 5000 mg NO_3^- L^{-1}が適当と考えられた．

5.要約

トマトの養液土耕において第 1 果房肥大期の時点で草勢が強く，生育の制御が難しくなる事例があることから，より早い段階における作物窒素栄養診断法について検討した．

1) 定植時苗の葉柄硝酸濃度は 0～500 mg NO_3^- L^{-1}であり，定植後，葉柄硝酸濃度は窒素施肥量や土壌無機態窒素量に応じて変動した．

2) 生育初期における窒素栄養状態の診断時期は第 2 花房開花始が適当と考えられた．

3) 第 2 花房開花始における葉柄硝酸濃度の下限値は 500 mg NO_3^- L^{-1}，上限値は 5,000 mg NO_3^- L^{-1}が適当と考えられた．

第4章 総 合 考 察

施設栽培において過剰な施肥が行われると塩類集積を引き起こし，生理障害を発生させる恐れがある．施設土壌で作物を持続的に生産するためには，土壌の塩類集積を防ぐ必要がある．本研究では，作物の栄養生理に見合った肥培管理法を確立するため，トマトについて作物窒素栄養診断法を検討した．また，効率的な肥培管理法である養液土耕について，トマトにおける適正施肥量と窒素栄養診断基準を設定し，栄養診断に基づく養液土耕栽培法の確立を目指した．

1．葉柄硝酸濃度を指標としたトマトの窒素栄養診断法

作物の窒素栄養状態を判断するために，水稲(北海道農政部，1992)や小麦(建部ら，2006)では葉緑素計(SPAD)による葉色診断が用いられる．これは葉の窒素含有率が高まると葉緑素含量も高まり，葉の緑色が濃くなることを利用している．しかし，トマトでは生育初期を除き，葉色値(SPAD)と葉の窒素含有率に有意な相関が認められない(日笠，2000)ことから，葉柄汁液の硝酸濃度を指標とした窒素栄養診断法を検討した．

葉柄硝酸濃度は採取する葉の葉位によって大きく異なるため，葉柄汁液を用いた窒素栄養診断では採取部位の選定は最も重要である．本研究(第 2 章第 1 節)では土壌からの窒素供給の影響を抑えるため，クリーニングクロップを用い土壌硝酸態窒素含量を低く抑えた。この条件では窒素施肥量と葉柄硝酸濃度との相関が高い葉位がトマトの窒素栄養状態を反映し，診断部位に適すると考えた．本研究では上位葉の葉柄硝酸濃度は窒素施肥量の多少に係わらず低い値を示したため，栄養診断に適しないと考えられた．一方，第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度は積算窒素施肥量や土壌硝酸態窒素と高い相関を示したことから，第 1 果房直下葉を診断部位とした．第 3 章第 2 節では，養液土耕においても第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度が窒素施肥量を反映するとともに，各果房肥大期における葉柄硝酸濃度が同時期における葉の窒素含有率と有意な正の相関関係にあることを示した(表 3-2-2)．これらのことから第 1 果房直下葉の葉柄硝酸濃度はトマトの窒素栄養状態を反映すると考えられた．

トマトの窒素栄養診断における採取部位について，景山ら(1961)は極端な多窒素条件にのみ葉柄硝酸の含有を認める上位葉は栄養診断部位に適さないと述べており，本研究も景山らと同様の見解である．一方，海外では一番若い成葉を診断部位とする事例が多く，国内では肥大期果房の直下葉を診断部位とする事例が多い．山田ら(1995)は下位葉は土壌養分に対する反応が敏感ではないことから，養分吸収が旺盛な部位を測定することが合理的であると述べている．トマトの葉の光合成産物は近接する果房に転流する(田中・藤田，1972；吉岡・高橋，1984)ことや，果房のシンク活性は果実肥大期に最も高まる(宍戸ら，1991)ことから，若い成葉や果実肥大期の果房直下葉は代謝が活発な部位と考えられる．若い成葉を診断部位とした報告のうち，冬期に栽培した事例(Coltman,1988)では葉柄硝酸濃度が窒素施肥量を反映し，夏期に栽培した事例(Locascio ら，1997；Andersen ら，1999)では生育中盤になると葉柄硝酸濃度が窒素施肥量を反映しなくなることや，山田ら(1995)の報告において促成栽培(栽培期間 9 月～翌 2 月)の葉柄硝酸濃度は半促成栽培(栽培期間 3 月～7 月)と比べ高く推移することから，日照時間が短く肥大果房のシンク活性が比較的弱い冬期の栽培であれば，若い葉についても葉柄に硝酸が蓄積しやすい環境にあり，栄養診断部位として利用可能と推察された．

2．葉柄硝酸濃度と果実生産および窒素の需給バランスとの関係

葉柄硝酸濃度と果実収量の関係について，慣行栽培(第 2 章第 1 節)では，合計果実収量は葉柄硝酸濃度が 6,000 mg NO_3^- L^{-1} 程度で最大となり，4,000 mg NO_3^- L^{-1} 以下では大きく減少した(図 2-1-3)．養液土耕(第 3 章第 2 節)では葉柄硝酸濃度は葉柄採取後 30～60 日間の果実収量と高い正の相関を示した(表 3-2-2)．葉柄硝酸濃度が果実収量に反映される要因は，葉柄硝酸濃度が葉の窒素含有率と有意な正の相関関係にあるため(表 3-3-2)と考えられる．作物への窒素供給が不十分であると，葉柄硝酸濃度の低下(図 2-1-2，図 3-2-2)とともに，葉の窒素含有率も低下した(表 3-1-5)．葉の窒素含有率は光合成速度(Tanaka ら，1974；Scholberg ら，2000)や果実収量と正の相関関係にある(図 3-2-5)ことから，高い収量水準を確保するには，栄養生長と生殖生長が並行する間，葉の窒素含有率を一定の水準以上に維持することが重要と考えられた．養液土耕(第 3 章第 2 節)では栄養生長と生殖生長が並行する期間における葉の窒素含有率を 25 g kg^{-1} 以上に保つため，葉柄硝酸濃度の下限値を第 1 果房肥大期は 1,000 mg NO_3^- L^{-1}，第 2 果房肥大期以降は 4,000 mg NO_3^- L^{-1} とした．慣行栽培(第 2 章第 1 節)では，葉柄硝酸濃度と合計果実収量との関係(図 2-1-3)から，葉柄硝酸濃度の下限値を 4,000 mg NO_3^- L^{-1} とした．慣行栽培と養液土耕で第 1 果房肥大期における葉柄

硝酸濃度の下限値が異なる要因は，慣行栽培では第 1 果房肥大期までの生育を確保するため 100 kg N ha^{-1} の基肥窒素を施用するが，養液土耕では同目的のための窒素施肥量が 35～38 kg N ha^{-1} にとどまるためと考えられた．

葉柄硝酸濃度は「窒素吸収量/窒素施肥量」比と負の相関関係にあった(図 2-1-4，表 3-2-2)．，葉柄硝酸濃度が高まるに伴い栽培跡地土壌の硝酸態窒素含量が高まった(図 2-1-5)．このことは，葉柄硝酸濃度は作物の窒素栄養状態のほかに，作物の窒素同化量と施肥および土壌からの窒素供給量とのバランスも反映していると考えられた．本研究では施肥窒素の利用率向上と栽培跡地の硝酸態窒素低減の観点から窒素栄養診断基準の上限を設定した．過剰な施肥を避ける一方，減肥による減収リスクも考慮し，葉柄硝酸濃度の上限値を慣行栽培，養液土耕ともに 7,000 mg NO_3^- L^{-1} とした．

3. 生産者圃場における葉柄硝酸濃度の挙動と窒素栄養診断の検証

生産者圃場におけるトマトの肥培管理について，以前は生産者が草勢を観察し，追肥の可否を判断することが多かった．しかし，適切な施肥を行うには多くの経験が必要であり，生産者によっては安易に追肥を行い，土壌に硝酸態窒素などの養分を蓄積させる事例も少なくない．

場内試験における葉柄硝酸濃度は慣行栽培(第 2 章第 1 節)では葉柄採取時までの積算窒素施肥量，養液土耕(第 3 章第 2 節)では葉柄採取前 20 日間程度の累積窒素施肥量と高い相関関係にあった．これらの結果は，定植前土壌の硝酸態窒素を 0～2 mg N kg^{-1} に抑えた条件で得たものである．一方，生産者圃場では定植前土壌の硝酸態窒素含量が高い事例が多く(第 2 章第 2 節，第 3 章第 3 節)，このような圃場では栽培期間を通じて葉柄硝酸濃度が診断基準値(7000 mg NO_3^- L^{-1})を上回った．作付け前の土壌に硝酸態窒素が残存する場合，作土(深さ 0～20cm)の硝酸態窒素は基肥窒素，下層土(深さ 20～60cm)の硝酸態窒素は追肥窒素と同様に利用される(林ら，2009)．このことから，トマト 1 作分の窒素施肥量を超える土壌硝酸態窒素が残存している圃場では，窒素が必要以上に供給される状況にあるため，窒素施肥量の多少にかかわらず葉柄硝酸濃度が基準値を上回ると考えられた．

第 2 章第 2 節では生産者圃場で窒素栄養診断を実践し，慣行以上の果実収量を確保するとともに減肥と栽培跡地土壌の硝酸態窒素含量を低減できた．栄養診断に基づく施肥対応は施設土壌の塩類集積回避に有効であった．一方，土壌硝酸態窒素が多量に蓄積した圃場では，栽培期間を通じて葉柄硝酸濃度は基準値を上回り，追肥が一度も要らないと判定された．また，葉柄硝酸濃度が常に基準値を上回る圃場では栽培跡地の土壌硝酸態窒素が 100 mg N kg^{-1} 以上残存しているため(第 2 章第 2 節，第 3 章第 3 節)，トマトの栄養状態に合わせた肥培管理を行うには，前作以前から施肥基準を遵守することが基本となる．

4. 効率的な施肥法としての養液土耕

第 3 章第 1 節における養液土耕区は慣行施肥区と比べ果実収量は多い傾向にあった．本研究における収量向上の要因について多頻度分施による窒素の安定供給が葉の窒素含有率を維持させたためと考えられた．他の要因について中野ら(2001)は根圏土壌の塩類ストレス軽減による生理障害の軽減を挙げている．養液土耕では主に硫酸根などの副成分を含まない肥料が用いられており，本研究においても使用している．また，副成分を含まない肥料を用いた施肥による土壌の塩類ストレス軽減効果は全面全層施肥においても実証されている（小野・藤井，1994)．本研究の養液土耕標準区における栽培期間中の土壌 EC は 0.10～0.18 dS m^{-1} であり，慣行施肥区(0.20～0.40 dS m^{-1})と比べ低く推移しており，塩類ストレス軽減を確認できた．土壌 EC が高まるとトマトの初期生育が劣る(小野・藤井，1994)ほか，尻腐れ果が発生しやすくなる(中野ら，2001)が，本研究の慣行施肥区ではこれらの症状は助長されなかった．本研究における慣行施肥区の土壌 EC が既往の報告と比べ低く推移したためと考えられた．

第 3 章第 1 節における養液土耕標準区の総窒素施肥量は 230～233 kg N ha^{-1} であり，慣行施肥(300 kg N ha^{-1})と比べ 22～23%の減肥となった．根の周辺の養分補給や水分移動が少ないと根の表面に無機要素濃度の低い層が形成される(池田,2005)ことから，労力的に灌水や追肥の回数が限られる慣行施肥では，初期生育を確保するため基肥を必要とする．また，追肥を行う際にも，次の追肥時期までに養分不足にならない十分量の養分を施用する必要がある．それに対し，養液土耕では 1 日 1 回以上の頻度で株元に養液が施用されるため，基肥を必要としない．また，トマトが必要とする分だけの養分を毎日与えるため，慣行施肥と比べ窒素施肥量を削減できると考えられた．また，養液土耕では根の周辺に必要最小限の養分を与えるため土壌硝酸態窒素は慣行栽培と比べ低く管理できる(表 3-1-5)．生育期間中の土壌硝酸態窒素を低く管理することにより，土壌については栽培跡地に硝酸態窒素を残さない肥培管理が可能になり，作物体については摘心以降の窒素供給を制御することで吸収窒素の果実への分配を高め，果実の乾物生産効率を高めることができた(表 3-1-4)．

5. 窒素栄養診断に基づくトマトの養液土耕技術

第 3 章第 1 節ではトマトの養液土耕について果実生産と施肥窒素利用率の関係から各生育時期における適正窒素施肥量を表 4-1 の通りに設定した．第 3 章第 2 節では葉柄硝酸濃度が葉の窒素含有率や果実収量に与える影響を検討し，各果房肥大期における窒素栄養診断基準を表 4-2 の通りに設定した．第 3 章第 3 節では硝酸態窒素が多く残存する生産者圃場において茎葉の過剰生育を起こす事例があったため，第 3 章第 4 節では土壌無機態窒素が残存した圃場におけるトマト養液土耕の窒素施肥法を検討した．基肥+養液区では養液土耕標準区と比べ葉柄硝酸濃度が高く推移し(図 3-4-2)，収穫指数や果実乾物生産効率が低い傾向を示した(表 3-4-1，表 3-4-2)ことから，養液土耕における定植前土壌の硝酸態窒素含量の基準を 50 mg N kg^{-1}未満とし，基準を超える場合，定植から第 1 果房肥大期までの窒素施肥は不要とした．第 3 章第 5 節では生育のより早い段階における窒素栄養診断法を検討した．生育初期の診断時期は第 2 花房開花始とし，診断基準値を葉柄硝酸濃度 500～5,000 mg NO_3^- L^{-1}とした(表 4-2)．

これらの基準を組み合わせ，窒素栄養診断に基づくトマトの養液土耕技術のフローを図 4-1 の通り策定した．定植前の土壌硝酸態窒素含量が 50 mg N kg^{-1} 未満の場合，第 2 花房開花始までの窒素施肥量を 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}とし，第 2 花房開花始以降は窒素栄養診断を行い，葉柄硝酸濃度が基準値を上回る場合は次回栄養診断時までの窒素施肥を基準量から半減し，基準値を下回る場合は窒素施肥を基準の倍量与えることとする．一方，定植前の土壌硝酸態窒素含量が 50 mg N kg^{-1} 以上の場合は初期生育に十分以上の窒素が残存しているため，第 1 果房肥大期までの窒素施肥を省略する．第 1 果房肥大期以降は窒素栄養診断を行い，葉柄硝酸濃度が基準値を上回る場合は依然として土壌硝酸態窒素は十分にあると考えられるため，次回の栄養診断時まで窒素施肥を省略する．葉柄硝酸濃度が基準値に入った場合は土壌硝酸態窒素残存量が減少したと判断できるため，上段の対応表に従って窒素施肥量を調節する．土壌診断と窒素栄養診断を利用した養液土耕技術により，作物の窒素栄養状態に合わせた肥培管理で収量を確保するとともに，栽培跡地への硝酸態窒素の残存を極力少なく抑えられると考えられる．

表 4-1 夏秋どりトマトの養液土耕における窒素施肥基準

生育時期	1日当たりの窒素施肥量
定植～第1果房肥大期	1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}
第1果房肥大期～摘心	3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}
摘心後1ヶ月間	1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}
摘心1ヶ月後以降	無施肥

表 4-2 夏秋どりトマトの養液土耕における窒素栄養診断基準

診断時期：第2花房開花始および各果房肥大期（摘心位下方3段目まで）		
採取部位：第1果房直下葉の先端小葉葉柄		
窒素栄養診断基準：	第2花房開花始	500～5,000 mg NO_3^- L^{-1}
（葉柄硝酸濃度）	第1果房肥大期	1,000～7,000 mg NO_3^- L^{-1}
	第2果房肥大期以降	4,000～7,000 mg NO_3^- L^{-1}

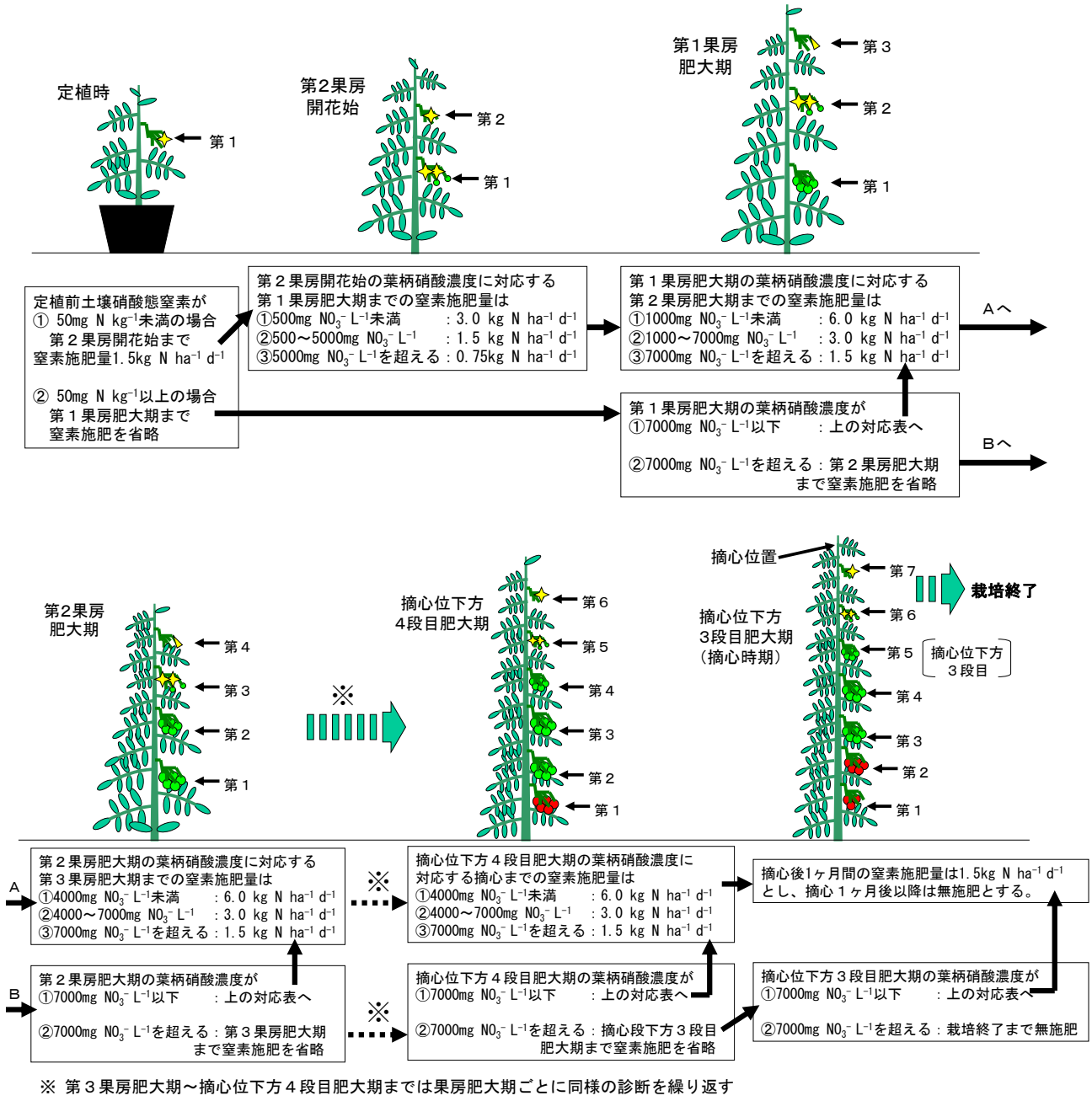


図 4-1 窒素栄養診断に基づくトマトの養液土耕技術のフロー図(7 段収穫の例)

第5章 摘 要

施設栽培において過剰な施肥が行われると土壌の塩類集積を引き起こし，生理障害の発生させる恐れがある．施設土壌で作物を持続的に生産するためには，施肥量を作物が必要とする分にとどめ，土壌の塩類集積を防ぐ必要がある．そこで，施設土壌における塩類集積を回避する手段として，代表的な施設野菜であるトマトについて窒素栄養生理に基づいた肥培管理技術を構築した．

本研究では，トマトについて葉柄汁液の硝酸濃度から作物の窒素栄養状態を把握する栄養診断法を設定するとともに，生産者圃場における実践で収量性や減肥の効果を検証した．次に，効率的な施肥法である養液土耕について，トマトの窒素栄養生理に基づいた施肥管理法を確立するため，各生育時期における適正施肥量と窒素栄養診断基準を設定した．また，土壌硝酸態窒素が蓄積した圃場への対策として定植前土壌の窒素診断基準と生育初期の窒素栄養診断基準を設定した．

研究結果の概要は以下の通りである．

1．ハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断法

1）葉柄汁液を用いた窒素栄養診断法の確立

北海道において代表的な施設栽培野菜の一つであるトマトについて窒素栄養診断法を設定した．

(1)下位葉の葉柄硝酸濃度は上位葉と比べ高く，積算窒素施肥量との相関も高いためトマトの窒素栄養状態を反映していた．特に，第1果房直下葉の葉柄硝酸濃度は積算窒素施肥量と常に高い相関を示し，窒素栄養診断の採取葉位として最適であった．

(2)2000 年は 1999 年に比べ全体的に収量および窒素吸収量が高く，葉柄硝酸濃度は低かった．これは根から吸収された硝酸が速やかに同化され，葉柄に蓄積する硝酸の量が減ったためと考えられた．また，2 カ年における光条件の差がそれぞれの窒素吸収量と葉柄硝酸濃度に影響を与えていると考えられた．

(3)収量は 2 カ年とも葉柄硝酸濃度 6,000mg NO_3^- L^{-1}程度で最大となり，4,000mg NO_3^- L^{-1}以下では大きく減少した．

(4)葉柄硝酸濃度が高まるに伴って窒素吸収量/窒素施肥量比が低下し，跡地の硝酸態窒素含量が高まったことから，葉柄硝酸濃度は施肥窒素の利用率を反映していた．

(5) 以上のことから第1果房直下葉を窒素栄養診断の採取葉位とした．収量，窒素吸収量/窒素施肥量比および跡地の残存窒素を考慮し，栄養診断基準値を葉柄硝酸濃度 4,000～7,000mg NO_3^- L^{-1}と設定した．

2）窒素栄養診断法の有効性実証

現地においてハウス夏秋どりトマトの窒素栄養診断を実践し，収量の向上や減肥について実証した．

(1)実証試験圃における2カ年の結果は，①土壌診断および栄養診断によって 68%ないし 33%の窒素減肥が図られ，栽培跡地の土壌硝酸態窒素が低く，環境への負荷が軽減された．②栄養診断に基づいて減肥しても，慣行と同等以上の果実収量が得られた．③栄養診断圃場では慣行と比べ果実の生産額が高く，肥料コストが削減され，経済性の面においても優位であった．

(2)青年農業者クラブにおける取り組みでは，トマト栽培の経験がないクラブ員が栄養診断を行った結果，他のクラブ員に比べ果実収量は同等以上となり，栽培跡地の土壌硝酸態窒素が低かった．

(3)以上のことから，栽培初心者であっても栄養診断技術を用いることで適切な施肥管理を行うことができた．

2．栄養診断に基づく夏秋どりトマトの養液土耕技術

1）果実生産と施肥窒素利用率からみた生育時期別の適正施肥量

夏秋どりトマトにおける養液土耕が果実生産に与える影響を慣行施肥と比較するとともに，養液土耕における施肥窒素利用率と各生育時期における適正窒素施肥量を検討した．

(1)養液土耕区では慣行施肥区と比べ果実収量や吸収窒素の果実乾物生産効率が高い傾向にあった．

(2)慣行施肥区では第 1 果房肥大期から第 5 果房肥大期にかけて葉の窒素含有率が低下したが，養液土耕区では葉の窒素含有率が維持されていたことから，養液土耕区では多頻度の分施により安定的に窒素が供給されたことが葉の窒素含有率を維持し，光合成を衰えさせず果実生産を高めたと考えられた．

(3)果実収量は総窒素施肥量が 230 kg N ha^{-1}を超えると頭打ちになり，施肥窒素利用率は総窒素施肥量210～230 kg N ha^{-1}で最高となった．

(4)これらのことから，トマトの養液土耕における各生育時期の適正窒素施肥量は定植から第 1 果房肥大期までが 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}，第 1 果房肥大期から摘心までが 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1}，摘心後 1 ヶ月間が 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1}と考えられた．この施肥条件における施肥窒素利用率は 63%～69%であった．

2）葉柄硝酸濃度が窒素栄養および果実収量に及ぼす影響

夏秋どりトマトの養液土耕について窒素栄養診断基準を設定するにあたり，窒素施肥量が葉柄硝酸濃度に及ぼす影響と葉柄硝酸濃度が果実収量や葉の窒素含有率に及ぼす影響について検討した．

(1)葉柄硝酸濃度は直近の窒素施肥量と高い相関を示しており，葉柄採取前 20 日間程度の累積窒素施肥量を反映すると考えられた．

(2)葉柄硝酸濃度は葉柄採取時における葉の窒素含有率や葉柄採取後 30～60 日間における果実収量と高い正の相関を示した．このことから，葉柄硝酸濃度は葉柄採取時における作物の窒素栄養状態を反映し，開花から果房肥大盛期にあたる果房の収量を予測する指標になると考えられた．

(3)葉の窒素含有率を維持し収量を確保するためには，葉柄硝酸濃度の下限値は第 1 果房肥大期では 1,000 mg NO_3^- L^{-1}，第 2 果房肥大期以降は 4,000 mg NO_3^- L^{-1} と考えられた．また，過剰な施肥を避ける観点から葉柄硝酸濃度の上限値は 7,000 mg NO_3^- L^{-1} と考えられた．

3）養液土耕を導入した生産者圃場における土壌硝酸態窒素の蓄積と葉柄硝酸濃度の推移

養液土耕システムを導入した生産者圃場について，定植時の土壌硝酸態窒素や窒素施肥量がトマトの生育や葉柄硝酸濃度などに与える影響を調査した．

(1)いずれの生産者圃場も定植前の表層および下層土の硝酸態窒素が蓄積しており，葉柄硝酸濃度が診断基準値よりも高く推移した．

(2)100 kg N ha^{-1}以上の窒素基肥が行われた 2002 年は茎径が太く，草勢が強かったが，窒素施肥量を少なくした 2003 年は草勢を中庸に抑えることができた．

(3)養液土耕において事前に茎葉の過剰生育を回避するには，定植時における土壌硝酸態窒素の診断基準と第 1 果房肥大期より前にトマトの栄養状態を判定する基準が必要と考えられた．

4）土壌無機態窒素が残存した圃場における養液土耕の窒素施肥対応

土壌無機態窒素が残存した圃場におけるトマト養液土耕の窒素施肥法を検討するため，窒素 100 kg N ha^{-1}を定植前に施用した基肥+養液区を設け，慣行施肥区および養液土耕標準区と窒素吸収および果実収量を比較した．

(1)基肥+養液区は慣行施肥区と比べ窒素吸収量と果実収量が多い傾向にあり，多頻度分施による効果と考えられた．

(2)基肥+養液区の果実収量は養液土耕標準区とほぼ同等であったが，収穫指数と果実乾物生産効率は低い傾向にあった．基肥+養液区では窒素栄養状態が高まり栄養生長が旺盛になったため，収穫指数や果実乾物生産効率が低下したと考えられた．

(3)養液土耕では定植前の残存無機態窒素はない方が望ましく，定植前土壌の硝酸態窒素含量が 50 mg N kg^{-1}以上の場合，定植から第 1 果房肥大期までの窒素施肥は不要と考えられた．

5）生育初期における窒素栄養診断基準の設定

トマトの養液土耕において第 1 果房肥大期より早い段階における作物窒素栄養診断法について検討した．

(1)定植時苗の葉柄硝酸濃度は 0～500 mg NO_3^- L^{-1}であり，定植後，葉柄硝酸濃度は窒素施肥量や土壌無機態窒素量に応じて変動した．

(2)生育初期における窒素栄養状態の診断時期は第 2 花房開花始が適当と考えられた．

(3)第 2 花房開花始における葉柄硝酸濃度の下限値は 500 mg NO_3^- L^{-1}，上限値は 5,000 mg NO_3^- L^{-1}が適当と考えられた．

謝　辞

本研究をとりまとめるにあたり，北海道大学 大学院農学研究院 生物共生科学講座教授 大崎 満博士には終始懇切なるご指導を賜り，本稿のご校閲と多くのご配慮を頂いた．同じく生物共生科学講座准教授 渡部敏裕博士，地域環境学講座教授 波多野隆介博士には本稿のご校閲を賜り，ご指導を頂いた．ここに深甚なる謝意を表する．

本研究は北海道立道南農業試験場 元土壌肥料科長 日笠裕治博士のご指導とご援助で開始したものであり，研究のきっかけを与えていただくとともに，終始ご助言を頂いた．同じく，元主任研究員 坂本宣崇博士，同 大村邦男博士，元管理科長 川原祥司氏，元園芸環境科長 中住晴彦博士，元土壌肥料科 林 哲央博士からは土壌肥料および園芸研究にかかる基礎を教わった．同じく元園芸環境科 福川英司氏，同 阿部珠代氏，同 細淵幸雄氏，同 高品純氏，同 八木哲生氏には共同作業や有益な議論をともにした．

現地調査および試験では，大野町(現北斗市)開発地区 畠山良一氏(現 JA 新はこだて組合長)，同 畠山 誠氏をはじめ，大野町(現北斗市)4H クラブ，大野町(現北斗市)の生産者の方々にはトマトの窒素栄養診断または養液土耕栽培を実践して頂くとともに，試料採取にご協力頂いた．JA 新はこだて大野支店，渡島中部地区(現渡島農業改良普及センター本所)をはじめ，渡島，檜山，後志管内の農業改良普及センターには多大なる協力を頂いた．また，北海道立道南農業試験場元技術普及部長 熊谷秀行氏，同元主任専門技術員 竹腰曜通氏，同 川岸康司博士には現地調査にかかる便宜を図って頂いた．

本稿の取りまとめについて，元北海道立上川農業試験場長 菊地治己博士，同 元研究部長 紙谷元一博士，元主任研究員 奥村正敏博士，元栽培環境科長 柳原哲司博士，同 五十嵐俊成博士には特段の配慮と便宜を図って頂いた．北海道立(現北海道立総合研究機構)中央農業試験場 元農業環境部長 能代昌雄氏，元同 志賀弘行博士，現同 加藤 淳博士には本稿の主要部分執筆にあたり，ご校閲とご助言を頂いた．

本稿を執筆する間，北海道立上川農業試験場栽培環境科では，楠目俊三氏，植野玲一郎氏，二門 世氏，佐々木亮氏，熊谷 聡氏，北海道原子力環境センターでは，主任研究員 鳥越昌隆氏，農業研究科長 奥村 理氏，同 藤倉潤治氏，農業研究科主任 高橋幸広氏，北海道立総合研究機構中央農業試験場栽培環境グループでは，古館明洋主査，鈴木慶次郎研究主査，研究主任 櫻井道彦氏，同 杉川陽一氏と有益な議論をともにするとともに，執筆への配慮を頂いた．また，中央農業試験場水田農業グループ研究主幹 中村隆一博士には執筆にかかる多くの助言と励ましの言葉を頂いた．

この他にも，多くの方々の励ましや，協力を得て研究の取りまとめを行うことができた．ここに，記して，各位のご厚情に厚く感謝の意を表する．

引 用 文 献

安東赫・池田英男 2009. 根域への積極的な水分管理は露地土耕においても作物の生育，収量と肥料利用効率の向上に役立つ. 園学研，8,439-443.

Andersen, P.C., Rhoads, F.M., Olson, S.M., and Brodbeck, B.V. 1999. Relationships of nitrogenous compounds in petiole sap of tomato to nitrogen fertilization and the value of these compounds as apredictor of yield. *HortScience,* 34,254-258.

荒木雅登・林田達也・井手治・満田幸恵・山本富三・柴田靖志 2005. 促成トマトの養液土耕栽培における窒素施用量とかん水量の違いが収量，品質に及ぼす影響. 福岡県農総試研報，24,16-22.

荒木陽一 1993. トマトの体内水分と器官間水分競合との関係. 園学雑，62,121-128.

荒木陽一 2003. 養液土耕栽培による夢とゆとりのある施設園芸の実現. 農及園，78,447-452.

荒木陽一 2007. 多頻度給液方式による養液土耕栽培の減肥効果の向上. 農及園，82,476-481

Bar-Yosef, B., 1977. Trickle irrigation and fertiligation of tomatoes in sand dunes: water, N, and P distributions in the soil and uptake by plants. *Agron. J.*, 69,486-491.

Bar-Yosef.B 1999. Advances in fertigation. *Adv. Agron.,* 65,1-65.

Coltman, R.R. 1988. Yields of greenhouse tomatoes managed to maintain specific petiole sap nitrate levels. *Hort Science,* 23,148-151.

Cook, W.P., and Sanders, D.C. 1991. Nitrogen application frequency for drip-irrigated tomatoes. *HortScience,* 26,250-252.

道南農試・渡島中部普及セ・JA 新はこだて. ハウストマト栄養診断マニュアル，http://www.agri.hro.or.jp/dounan/publication/manual/tomato_diagnosis.pdf.

Fonseka, H.D., Asanuma, K., and Ichii, M. 1997. Changes in nitrare reductase activity of leaf and nitrogen distribution with growth in potato plants. *Jpn.J.Crop Sci.,*66,669-674.

福川英司・相川宗嚴・坂口雅己 2012. カーネーションの養液土耕栽培における施肥及びかん水作業の実態調査とその導入効果. 北農,79,14-21.

福徳康雄・寺岡裕子・児藤俊一・久保研一 2000. 養液栽培におけるアールスメロン(*Cucumis melo L.*)の生育時期別の窒素吸収と分配，土肥誌，71, 72-81.

林 哲央・元木征治 1999. 施設栽培におけるミニトマトの窒素施肥法. 道立農試集報，76,1-8

林 哲央・日笠裕治・坂本宣崇 2009. 北海道のハウス栽培における層位別の土壌養分，とくに硝酸態窒素の実態と下層土診断の有効性，土肥誌，80, 14-22

林 哲央 2011. 寒冷地の施設栽培における土壌診断と肥培管理法に関する研究. 道総研農試報告，129,1-89

林 康人・新妻成一・久保省三 2003. 灌水施肥（養液土耕）栽培の肥効は高いのか-施肥量を段階的に変えた場合のトマトの施肥窒素利用率. 土肥誌，74,175-182.

林 康人・新妻成一・久保省三 2003. 灌水施肥（養液土耕）栽培における基肥の必要性-基肥窒素がトマトの初期生育に及ぼす影響. 土肥誌，74, 813-816.

He, Y., Terabayashi, S., and Namiki, T. 1998. The Effects of leaf position and time of sampling on nutrient concentration in the petiole sap from tomato plants cultured hydroponically. *J.Jpn.Soc.Hot.Sci.,*67,331-336.

Hikasa, Y. 1997. Diagnostic technique for nitrogen nutrition of cabbage to increase sugar concentration; in Plant nutrition for sustainable food production and environment, ed. T.Ando et al., Kluwer Academic Publishers,Japan,p.369-370.

日笠裕治 2000. 露地および施設野菜における診断技術と施肥管理. 北海道土壌肥料研究通信，46,43-56.

日笠裕治・大宮知・福川英司・中住晴彦 2009. 高設・夏秋どりイチゴの養液管理および窒素栄養診断技術. 土肥誌，80,534-537.

平岡潔志・松永俊朗・米山忠克 1990. 平板電極式携帯用イオンメータによる土壌および作物体中の硝酸イオンとカリウムの分析. 土肥誌，61,638-640.

北海道農政部 2010. 北海道施肥ガイド 2010，p.1～235.

北海道農政部 1992. 平成４年普及奨励ならびに指導参考事項，p.247-251.

北海道農業協同組合中央会 2013. 北海道野菜地図(その36)，p15-20.

北海道立総合研究機構農業研究本部 2012. 土壌・作物栄養診断のための分析法 2012，p.88～89.

池田英男 2005. 植物の根と周辺の無機要素の分布と流れからみた根域の養水分管理. 養液土耕と液肥・培地管理，

p.7-27. 博友社, 東京.

伊藤裕朗・河井弘康 2005. 夏秋トマトの養液土耕, 長段栽培における生育ステージ別施肥・かん水管理指針の作成. 愛知農総試研報, 37,73-79.

伊藤純雄・荒木浩一 1985. 施設栽培における均衡かん水施肥に関する研究. 野菜試報告 A, 13,109-124.

景山美葵陽・石原正道・巽 穣・西村周一 1961, そ菜の窒素栄養に関する研究(第1報)窒素栄養の診断について. 農業技術研究所報告, E9,161-183.

上山啓一・小野寺康子・大沼 康 2004. 夏秋トマトの養液土耕栽培における栄養診断に基づいた養水分管理方法. 宮城農園総研報, 73,41-47.

加藤淳・奥山昌隆・竹内晴信・中津智史 2009. インゲンマメ(金時類)に対する適正な窒素施肥管理のための土壌および作物栄養診断法. 土肥誌, 80, 626-629.

國田丙午・宮地勝正・伊藤純樹 2004. 養液土耕栽培における夏秋トマトの窒素の栄養と土壌診断に基づいた養水分管理法. 広島農技セ研報, 76,75-84.

李 光植・喩 景権・太田勝巳・若月利之・松井佳久 1991. 水耕栽培トマト中の無機元素濃度の経時変化. 土肥誌, 62,606-613.

李 光植・喩 景権・松井佳久 1991. 果実収穫期の水耕栽培トマトにおける無機元素の器官別・節位別分布. 土肥誌, 62,461-468.

Locascio, S.J., Hochmuth, G.J., Rhoads, F.M., Olson, S.M., Smajstrla, A.G., and Hanlon, E.A. 1997. Nitrogen and potassium application scheduling effects on drip-irrigated tomato yield and leaf tissue analysis. *Hort Science,* 32,230-235.

Locascio, S.J., Smajstrla, A.G., and Alligood, M.R. 1996. Nitrogen requirements of drip-irrigated tomato. *Proc. Fla. State Hort. Soc.*, 109,146-149.

Locascio, S.J. Olson, S.M. and Rhoads, F.M. 1989. Water quantitiy and time of N and K application for trickle-irrigated tomatoes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 114,265-268.

Miller, R., Rolston, D. E., Rauschkolb, R. S., and Wolfe, D. W. 1976. Drip application of nitrogen is efficient. *Calfornia Agric.* 30(11), 16-18.

満田幸恵・山本富三・荒木雅登 2005. 促成ナスの点滴かん水施肥(養液土耕)栽培における生育および収量と窒素の動態. 土肥誌, 76,9-14.

満田幸恵・荒木雅登・山本富三 2006. 促成ナスの点滴かん水施肥(養液土耕)栽培が土壌の物理性および根の形態に及ぼす影響. 福岡県農総試研報, 25,29-32.

水野直治・南 松雄 1980. 硫酸－過酸化水素による農作物中の N, K, Mg, Ca, Fe, Mn 定量のための迅速前処理法, 土肥誌, 51, 418～420.

中村隆一, 大久保進一, 平井剛 2001. 水田輪換畑におけるトマトの障害果(チャック果, 窓あき果)発生要因とその対策. 北海道立農試集報, 80,31-38.

中野明正・上原洋一・山内章 2001. 養液土耕法による根圏ストレスの軽減がトマトの尻腐れ果発生を抑制する. 土肥誌, 72,385-393.

農林水産省. 園芸用施設及び農業用廃プラスチックに関する調査, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/engei/index.html.

岡本昌広・北畠晶子・深山陽子・深澤知恵妙・吉田誠・渡邊清二・奥村一・浅田真一・小林正伸・小清水正美・阿久津四良・植草秀敏・北 宜裕・佐々木皓二 2001. 施設トマトにおける環境保全型栽培の実証. 神奈川県農総研研報, 142,17-35.

Ono, K., Terashima, I. and Watanabe, A. 1996. Interaction between nitrogen deficit of plant and nitrogen content in the old leaves. *Plant Cell Physiol.,*37,1083-1089.

小野信一・藤井義晴 1994. ハウス栽培における土壌の塩類集積とその回避対策. 土肥誌, 65,65-65.

大村邦男・坂本宣崇 2000. 施設花き栽培における硝酸態窒素の流出と環境負荷の軽減対策. 北海道立農試集報, 79,59-66.

六本木和夫 2007. 野菜・花・果樹 リアルタイム診断と施肥管理, p.1-143,農文協, 東京.

六本木和夫・加藤俊博 2000. 野菜・花卉の養液土耕, p.1-215,農文協, 東京.

六本木和夫 1991. 果菜類の栄養診断に関する研究(第1報)葉柄汁液の硝酸態窒素に基づくキュウリの窒素栄養診断. 埼玉園試研報, 18,11-15.

六本木和夫 1992. 果菜類の栄養診断に関する研究(第2報)葉柄汁液の硝酸態窒素に基づくイチゴの窒素栄養診断. 埼玉園試研報, 19,19-29.

六本木和夫 1992. 果菜類の栄養診断に関する研究(第 3 報)葉柄汁液の硝酸態窒素に基づくナスの窒素栄養診断. 埼玉園試研報, 20,19-26.

坂口雅己・日笠裕治・中住晴彦・大村邦男 2003a. ハウストマト窒素栄養診断マニュアルの作成. 農及園, 78,1196-1200.

坂口雅己 2003b. 北海道・畠山誠, ハウス夏秋どりトマト. 農業技術体系土壌施肥編 第 8 巻. 北海道・畠山 1-10,

農文協. 東京.

坂口雅己・日笠裕治・中住晴彦 2004a. ハウス夏秋どりトマトにおける窒素栄養診断法. 土肥誌, 75,29-35.

坂口雅己・畠山誠・中住晴彦・大村邦男 2004b. ハウストマト窒素栄養診断の現地実証, 農及園.79,52-57.

坂口雅己・日笠裕治・中住晴彦 2013. 夏秋どりトマトの点滴灌水施肥(養液土耕)における果実生産と施肥窒素利用率からみた生育時期別の適正窒素施肥量. 土肥誌, 84,11-20.

Scholberg, J.S., McNeal, B.L., Boote, K.J., Jones, J.W., Locascio, S.J., and Olson, S.M. 2000. Nitrogen stress effects on growth and nitrogen accumulation by field-grown tomato. *Agron. J.,* 92,159-167.

宍戸良洋・尹 千鍾・湯橋 勤・施山紀男・今田成雄 1991. トマトにおける葉の光合成, 転流・分配の経時的変化と果実肥大に対する葉位別寄与度. 園学雑, 59,771-779.

相馬暁・岩淵晴郎 1977. トマトの生育・品質におよぼす環境要因の影響Ⅲ. 水分条件と窒素用量が生育・収量・異常果の発生に及ぼす影響. 道立農試集報, 37,35-44.

相馬暁 1987. 北海道における野菜畑土壌の現状と各種野菜の特性に対応した肥培管理法. 道立農試報告, 56.1-126.

Stark, J.C., Jarrel, W.M., Letey, J., and Valoras, N. 1983. Nitrogen use efficiency of trickle-irrigated tomatoes receiving continuous injection of N. *Agron. J.*,75,672-676.

杉山直儀・高橋和彦 1958. 蔬菜の窒素栄養の診断法としての硝酸態窒素の検定について. 農及園, 27,161-170.

建部雅子・米山忠克 1995. 作物栄養診断のための小型反射式光度計システムによる硝酸および還元型アスコルビン酸の簡易測定法. 土肥誌, 66,155-158.

建部雅子・細田洋一・笠原賢明・唐澤敏彦 2001. バレイショの葉柄汁液を用いた栄養診断. 土肥誌, 72,33-40.

建部雅子・岡崎圭毅・唐澤敏彦・渡辺治郎・大下泰生・辻博之 2006. パン用秋まき小麦「キタノカオリ」に対する葉色診断と施肥対応. 土肥誌, 77, 293-298.

玉井光秀・大西健二 2002. キュウリ・トマトのかん水施肥栽培技術. 土肥誌, 73,311-314.

玉井光秀 2005. トマトのかん水施肥栽培および杉バーク培地による隔離床栽培. 養液土耕と液肥・培地管理, p.65-94. 博友社, 東京.

Tanaka, A., Fujita, K., and Kikuchi, K. 1974. Nutrio-physiological studies on the tomato plant. Ⅲ. Photosynthetic rate of individual leaves in relation to the dry matter production of plants. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 20, 173-183.

田中明・藤田耕之輔 1972. トマトの果実生産におけるSourseとSinkの相対的意義の解析(第2報)異なる葉位の葉からの 14C の移行. 土肥誌, 43,77-80.

田中寛幸・矢澤 進・並木隆和・小島洋一・高嶋四郎 1980. つけ菜の硝酸態ちっ素(NO_3-N)蓄積に関する研究(第3報)光の強さが NO_3-N 蓄積, 吸収量に及ぼす影響. 園学要旨, 昭 55 春,312-313

田中哲司 2003. トマトの養液土耕栽培における葉柄汁液中硝酸イオン濃度を用いた生育診断指標の策定. 愛知農総試研報, 35,73-78.

種村竜太 2010. キュウリにおける窒素の吸収と移行. 農及園, 85,609-616.

植田稔宏・池羽智子・安東赫・加藤一幾・河野隆・松本英一 2009. 葉菜類の露地栽培における点滴灌水施肥(養液土耕)栽培が収量・品質と施肥効率に及ぼす影響. 土肥誌, 80,477-486.

八木哲生・坂口雅己・日笠裕治 2008. 有機質資材を用いたハウス夏秋どりトマトの無化学肥料栽培指針. 土肥誌, 79, 203-208.

山田良三・山田俊博・井戸 豊・関 稔・早川岩夫 1995. リアルタイム土壌・栄養診断に基づくトマトの効果的肥培管理(第1報)葉柄汁液の硝酸濃度に基づく診断基準の作成. 愛知県農総試研報, 27,205-211.

山田良三・加藤俊博・関 稔・早川岩夫 1996. リアルタイム土壌・栄養診断に基づくトマトの効果的肥培管理(第2報)持続的生産のための施肥管理技術. 愛知県農総試研報, 28,133-140.

山田良三・川嶋和子・今川正弘 2005. 即時制御灌水システムを導入した隔離床栽培トマトの養液土耕栽培マニュアル. 愛知県農総試研報, 37,61-66.

山本二美・松丸恒夫 2005. 施設トマトにおける施肥前の土壌中硝酸態窒素量が栄養診断に基づく施肥量に及ぼす影響. 土肥誌, 76,825-831.

山本二美・松丸恒夫 2006. 施設トマトにおける汁液栄養診断に基づく追肥法の現地実証. 土肥誌, 77,413-418.

山﨑晴民 2002. 果菜類の養液土耕栽培による養水分の適正管理技術. 農及園, 77, 64-70.

山﨑晴民・六本木和夫 2002. 養液土耕(灌水同時施肥)による半促成ナス栽培における効率的施肥技術. 埼玉農総研研報, 2,36-42.

山﨑晴民・六本木和夫 1992. 葉柄汁液中の硝酸態窒素によるトマトの栄養診断. 土肥要旨集, 38, 82.

吉岡 宏・高橋和彦 1984. 果菜類における光合成産物の

動態に関する研究Ⅶ. トマトにおける Source-Sink 単位. 野菜試報告, A12,1-8.

吉岡 宏・高橋和彦・新井和夫・長岡正昭 1977. 果菜類における光合成産物の動態に関する研究Ⅰ. トマトの 14C同化産物の転流・蓄積に及ぼす夜温, 地温並びに生育中の照度, N濃度処理の影響. 野菜試報告, A3,31-41

Diagnostic technique for nitrogen nutrition and drip fertigation based on nitrogen nutritional physiology of tomato

Masami SAKAGUCHI

Summary

In greenhouse culture, salt accumulation of soil occurs due to excessive fertilization, there is a risk to the occurrence of physiological disorders of crops. In order to produce crops sustainably in greenhouse culture, it is necessary to keep application rate to the amount of crop needs and to prevent salt accumulation of soil. Therefore, as means to avoid salt accumulation of soil, fertilization management techniques that ware based on the nitrogen (N) nutritional physiology of tomato (one of typical vegetables of greenhouse culture) was established.

In this study, diagnostic technique for N nutrition of tomato to understand the N nutritional status of crop from the petiole sap nitrate concentration was established, and demonstration experiment of diagnostic technique was carried out in farm greenhouse fields, to evaluate the effectiveness of improve fruit yield and reduce fertilizer. Next, in order to establish a fertilizer management method under drip fertigation, the optimal N fertilizer application at different growth stages and diagnostic criteria of N nutrition under drip fertigation were established. In addition, diagnostic standard of soil nitrate-N at planting and that of crop N nutrient in early stage of growth were established for the field soil nitrate-N was accumulated.

1. Diagnostic technique for N nutrition of summer to autumn harvest greenhouse tomato

1) Establishment of diagnostic technique using leaf petiole sap

Greenhouse tomato was grown on summer to autumn harvest schedule to examine diagnostic technique for N nutrition.

(1) Petiole sap nitrate concentration of lower leaves was higher than that of higher leaves, and was strongly correlated with N application rates. The leaf petiole just below first truss was optimum part to use for diagnosis of N nutrition.

(2) In 2000, fruit yield and N uptake were higher than those in 1999, and petiole sap nitrate concentration was lower than that in 1999. It was considered that the absorbed nitrate was assimilated immediately and accumulation in petiole was decreased. Difference of light condition between in 1999 and 2000 influenced N uptake and petiole sap nitrate concentration in each year.

(3) In each year, fruit yield was maximized with petiole sap nitrate concentration was about 6000 mg NO_3^- L^{-1} and decreased with lower than 4000 mg NO_3^- L^{-1}

(4) As petiole sap nitrate concentration increased, N uptake/application rate was decreased and nitrate-N concentration of cultured soil increased. Petiole sap nitrare concentration was considered to indicate N recovery rate.

(5) In view of fruit yield, N uptake/application rate and soil nitrate-N concentration at the end of harvest, the reference value of petiole sap nitrate concentration was 4000 to 7000mg NO_3^- L^{-1}

2) Demonstrated effectiveness of N nutrition diagnosis of greenhouse tomato

Demonstration experiment of diagnostic technique for N nutrition of tomato was carried out in farm greenhouse fields, to evaluate the effectiveness of improve fruit yield and reduce fertilizer.

(1) Results of two-year demonstration in farm greenhouse field were as follows.

①. N fertilizer and soil nitrate-N at the end of harvest was able to be reduced by use of crop N nutritional diagnosis and soil nitrate-N diagnosis.

②. Even reducing N fertilizer based on nutrient diagnosis, fruit yield was not less than the conventional field.

③. Compared with conventional field, production value of fruit was improved and cost of fertilizer was reduced in demonstration field.

(2) Efforts in the young farmers club, in the field of club members have no experience of tomato cultivation that practice the nutrition diagnosis, fruit yield was equal to or more and soil nitrate-N at the end of harvest was lower than the field of the other members.

(3) Even for novice farmer, it was possible to perform appropriate fertilizer management by using the nutritional diagnosis.

2. Drip fertigation based on diagnosis for N nutrition of summer to autumn harvest greenhouse tomato

1) Optimal N fertilizer application at different growth stages with respect to fruit production and N utilization

Tomato was grown on a summer to autumn harvest schedule in greenhouse fields with lowered soil nitrate-N to evaluate fruit yield, N utilization, and the optimum rate of N fertilizer application at three stages of growth under drip fertigation.

(1) Compared with conventional application (periodic application of inorganic N fertilizer), drip fertigation tends to improve fruit yields and fruit production efficiency.

(2) Leaf N concentration was maintained during fruit development in the 1st to 5th truss stages with drip fertigation, whereas it decreased with conventional application. A stable N supply with frequent application under drip fertigation maintained the leaf N concentration and photosynthetic rate and thereby increased the fruit yield.

(3) The fruit yield reached a maximum when total N application exceeded 230 kg N ha^{-1}, and apparent N recovery peaked at total N application rates in the range 210–230 kg N ha^{-1}.

(4) In view of fruit yield and N utilization, the optimal rate of N fertilizer application was 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1} in Stage I (from planting to fruit development stage of the 1st truss), 3.0 kg N ha^{-1} d^{-1} in Stage II (from fruit developmental stage of the 1st truss to topping), and 1.5 kg N ha^{-1} d^{-1} in Stage III (until 1 month after topping). The apparent N recovery in drip fertilized tomato was 63% to 69%.

2) Effects of petiole sap nitrate concentration in drip-fertilized greenhouse tomato to crop N nutrition and fruit yield

Tomato was grown on a summer to autumn harvest schedule in greenhouses and drip-fertilized to evaluate the effects of the N application rate on petiole sap nitrate concentration, and to evaluate the relationships between petiole sap nitrate concentration and fruit yield and leaf N concentration.

(1) The petiole sap nitrate concentration was strongly correlated with the N application rate, and reflected the amount of accumulated N in the 20 days before sampling.

(2) Petiole sap nitrate concentration was also strongly correlated with leaf N concentration at sampling, and fruit yield at 30–60 days after sampling. The petiole sap nitrate concentration reflected the N nutrient conditions of the crop, and was a reliable predictor of fruit yield from trusses from the flowering

to fruit development stages.
(3) The minimum concentration of petiole sap nitrate required to maintain optimum leaf N content and to ensure a good fruit yield was 1,000 mg NO_3^- L^{-1} at the fruit development stage of the first truss, and 4,000 mg NO_3^- L^{-1} during and after the fruit development stage of the second truss. To prevent excess fertilization, the maximum concentration of petiole sap nitrate was 7,000 mg NO_3^- L^{-1} at each stage.

3) Accumulation of soil nitrate-N and petiole sap nitrate concentration of tomato in farm greenhouse introducing drip fertigation

This study was carried out in farm greenhouse fields introducing drip fertigation, to evaluate the effects of soil nitrate-N at planting and N application rate on petiole sap nitrate concentration and growth of tomato.
(1) Nitrate-N in the topsoil and subsoil before planting were accumulated in any field, and petiole sap nitrate concentration remained higher than the diagnostic reference value.
(2) In 2002, stem diameter was thick and plant vigor was strong then basal N application rate was more than 100 kg N ha^{-1}. In 2003, basal N application was reduced and plant vigor was able to keep moderate.
(3) In order to avoid over luxuriant growth under drip fertigation, diagnostic standard of soil nitrate-N at planting and that of crop N nutrient in early stage of growth were necessary.

4) N fertilizer application under drip fertigation corresponding to the field of soil inorganic-N was accumulated

Tomato was grown in greenhouse with 100 kg N ha^{-1} of basal application to examine the method of N fertilizer application under drip fertigation in the field of soil inorganic-N was accumulated.
(1) Compared with conventional application, basal + fertigation (drip fertigation with 100 kg N ha^{-1} of basal application) tend to improve N uptake and fruit yield, by the effect of frequent application under drip fertigation.
(2) Compared with fertigation, basal + fertigation tend to decline harvest index and fruit production efficiency. N nutrition and vegetative growth became excess in basal + fertigation and thereby decline harvest index and fruit production efficiency.
(3) It was desirable for drip fertigation that inorganic N before planting was lowered. In the case soil nitrate-N was 50 mg N kg^{-1} or more before planting, N fertilization was not required from planting to development stage of the 1st truss.

5) Diagnostic standard of N nutrition at the early stage of growth of tomato

Tomato was grown in greenhouse to develop the diagnostic technique for crop N nutrition in the early stage than fruit development stage of the 1st truss under drip fertigaiton.
(1) Petiole sap nitrate concentration was 0 to 500 mg NO_3^- L^{-1} at planting, and varied depending on soil inorganic N content and N application rate after planting.
(2) Flowering stage of the 2nd truss was an appropriate time to diagnose N nutrition at the early stage of growth of tomato.
(3) The appropriate range of petiole sap nitrate was 500 to 5,000 mg NO_3^- L^{-1} at the flowering stage of the 2nd truss.