

## 研究・技術ノート

# 無施肥圃場で栽培したトマトの吸収した窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 分析による由来推定

小田正人・宝川靖和

(国際農林水産業研究センター)

**要旨**：埼玉県富士見市に、無施肥栽培を継続し、地上部作物残渣を全て持ち出しながら標準的な出荷量を実現している圃場がある。圃場の土質は典型的な関東ロームで、作土 pH は 5.5,  $\text{NO}_3\text{-N}$  は検出域以下、可給態 P は  $17\text{ mg L}^{-1}$  (一般圃場並), K は検出域以下であった。この圃場で栽培されるトマトの吸収窒素の由来を、その安定同位体自然存在比 ( $\delta^{15}\text{N}$  値) を使って推定することを試みた。無施肥栽培の対照とした隣接慣行栽培圃場は年一作で、化成肥料 ( $100\text{ g N m}^{-2}$ )、堆肥 ( $45\text{ g N m}^{-2}$ ) が全量元肥で施用されており、肥料の  $\delta^{15}\text{N}$  値は各々  $-1.7$ ,  $+9.3\%$  であった。土壌の  $\delta^{15}\text{N}$  値は、無施肥栽培が上層 (0–20 cm) で  $+7.1\%$ 、下層 (20–35 cm) で  $+7.2\%$ 、慣行栽培が上層で  $+8.9\%$ 、下層で  $+7.5\%$  であったのに対し、トマト葉身のそれは、無施肥栽培 ( $+3.2 \pm 0.4\%$ )、慣行栽培 ( $+3.0 \pm 1.0\%$ ) とともに  $+3\%$  程度と、いずれも土壌と比較して低い値であった。慣行圃場ではこれを  $\delta^{15}\text{N}$  値の低い化学肥料の吸収による希釈として説明できるが、無施肥圃場では人為的投入物はなく、また  $\delta^{15}\text{N}$  値の相対的に高い土壌窒素の吸収からも説明できない。この無施肥栽培圃場で得られた結果は、大気窒素の固定など、相対的に  $\delta^{15}\text{N}$  値の低い窒素の流入が系外から相当量あった可能性を示唆しており、本圃場ではそれにより標準的な出荷量が実現している可能性がある。

**キーワード**： $\delta^{15}\text{N}$ 、窒素収支、トマト、無施肥栽培、野菜。

埼玉県富士見市に 6 年継続して無施肥栽培を実施している農家がある。栽培作目は、トマト、ナス、キュウリ、トウガラシ、シシトウ、ピーマン、オクラ、エゴマ、サイトウ、バレイショ、ネギ、サトイモ、ダイズ (エダマメ)、ササゲ、スイートコーン、ニンジンそして冬作としてハクサイ、ダイコン、スナックエンドウと多岐にわたる。スイートコーンを除き、生育は良好であり、繁茂量は少ないものの収穫指数が高い。栽培法の特徴は無農薬、連作そして自家採種である。その他技術では、例えば作物の整枝・誘引、除草しないしはマルチなどの基本技術が励行されており技術レベルは高い。耕盤破壊のためのサブソイラを毎年実施する一方、表土のロータリー耕は機械の限界まで浅耕に徹している。農地は祖父から耕作権を受け継いだもので、祖父もダイズなどは無施肥で栽培し、どちらかといえば少肥栽培されてきた。無施肥を初めて 4 年目までは「肥料を抜く」ために裏作にエンバクを栽培し、地上部を圃場から持ち出してきた。作物残渣は回収困難な地下部を除き、全量持ち出している。5 年目以降、「肥料は抜けた」としてエンバク栽培を停止している。

無施肥・無農薬の野菜は一定の購買層があり、プレミア価格で取引される上、総収量は 7–8 割だが秀品率が高く出荷量はかわらないので経営的にも見合うという。一般に、減肥により野菜のビタミン C 含量が向上するなど野菜の品質が向上することは知られている (小宮山ら 1999, 注: 松本真悟 1999. 減肥が野菜の収量、品質成分に及ぼす影響。

島根県農試だより, 第 89 号.)。カロリー摂取が主目的である穀類とは異なり、野菜類はビタミン・ミネラル摂取が目的であることを考慮すると、無施肥栽培は経営面のみならず作物生産上も妥当性がある。また農家は「無施肥の連作により、3 年目から、ナスのセンチュウ害がみられなくなった」と証言している。土壌病害は農家にとって大きな問題であり、猛毒であるクロロピクリンによる土壌燻蒸以外に有効な手段がないと農家には認識されている (無施肥農法農家の全国集会における農家の発言)。また、昨今話題の地球温暖化対策の面でも、無施肥・無農薬栽培は、肥料や農薬の合成にかかわる  $\text{CO}_2$  の発生、窒素施肥に由来する  $\text{N}_2\text{O}$  の発生をなくすことでプラスとなる。以上のように無施肥・無農薬栽培の価値は多方面にわたる。

しかしながら、無施肥・地上部持ち出し環境下でどうして作物に養分、とりわけ窒素を供給できるのか。またこの農法は長期間持続的に成立可能なのか。これらの点が不明である。本研究では、この無施肥農法が一定の収量水準で 6 年間安定的に成立している圃場を対象に、作物の吸収窒素の由来を安定同位体自然存在比 ( $\delta^{15}\text{N}$  値) を使って推定することにより、窒素収支の視点からこの農法の持続性を検討することを試みた。

## 材料と方法

### 1. 調査圃場

調査圃場は埼玉県富士見市に位置し、土質は典型的な関



第1図 無施肥トマト圃場.

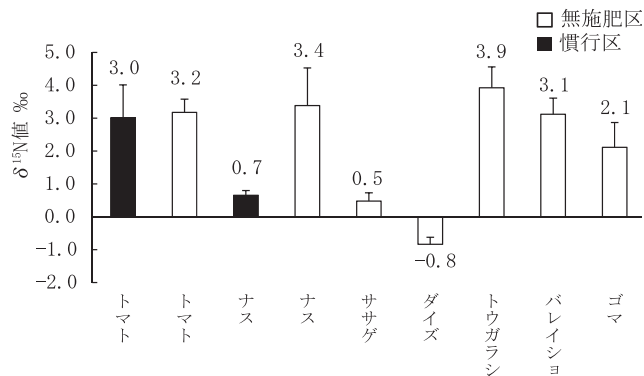
東ロームである(第1図). 2004年より無施肥栽培が継続され, 作物残渣も地上部は全て持ち出されている. 輪作は行われておらず連作である. 2007年11月19日に結球始めのハクサイ圃場において比色試験紙(農大式簡易土壌診断試験紙「みどりくん」)により, 作土を調べたところ, pH5.5,  $\text{NO}_3\text{-N}$ : 検出域以下, P:  $17\text{ mg L}^{-1}$  (一般圃場並), K: 検出域以下であった. 対象として選定した隣接慣行栽培圃場は年一作で, 全量元肥として, 化成肥料(ナス一発スーパー SR コート 17-12-12)が  $600\text{ g m}^{-2}$ , 堆肥(ハイコン有機 1.0~1.5-2.3~2.8-1.0~1.5)が  $3000\text{ g m}^{-2}$  施用されていた.

## 2. 植物体の採取及び調製方法

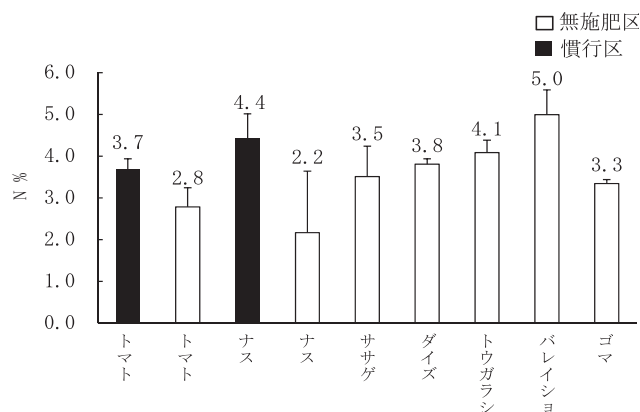
2009年7月29日, 午前11時から12時にかけて, トマト個体の頂端から40 cm下方の位置に最も近い分枝を選び, 付け根から第1葉を各株1枚, 合計20枚を無施肥栽培圃場および隣接慣行栽培圃場よりそれぞれ採取した. その他参考として, 無施肥圃場のナス, ササゲ, ダイズ, トウガラシ, バレイシヨ, エゴマ, 隣接慣行栽培圃場のナスについて各々最新完全展開葉を1株1枚, 合計2枚ずつ採取した. 採取したサンプルはただちに氷を充填したクーラーボックスに保管し, その日のうちに  $105^\circ\text{C}$  で30分間, 酵素を失活させた後,  $80^\circ\text{C}$  で24時間乾燥し, 葉1枚ごとに粉砕してそれぞれ分析に供した.

## 3. 土壌の採取及び調製方法

2009年8月24日, トマト圃場のトマトの株元より通路側へ約10 cmの位置の土壌を, 無施肥圃場および慣行栽培圃場について各3点を深さ35 cmまで内径17 mmのソイルサンプラーで採取し, 表層0-20 cmと下層20-35 cmとに分け, 圃場ごとに各3点の試料を混合し混合試料とした. 同様に, 収穫後にロータリー耕(耕起深約10 cm)されたバレイシヨ圃場および定植前のロータリー耕(耕起深約10

第2図 作物の葉身の $\delta^{15}\text{N}$ 値.

図中の縦棒は標準誤差(トマトは  $n=20$ , 他は  $n=2$ )を示す.



第3図 作物の葉身の全窒素含量.

図中の縦棒は標準誤差(トマトは  $n=20$ , 他は  $n=2$ )を示す.

cm)が施されたハクサイ圃場について, 圃場ごとに6点の土壌試料から各混合試料を得た. 土壌試料は風乾後に粉砕して分析に供した. 施用された化成肥料の残りと施用された有機肥料の同製品も風乾後に粉砕して分析した.

## 4. 分析方法

全窒素および $\delta^{15}\text{N}$ 値は, 粉砕試料を安定同位体比測定用質量分析計(DELTA plusXP, サーモフィニガン社, 英国)で定量した.

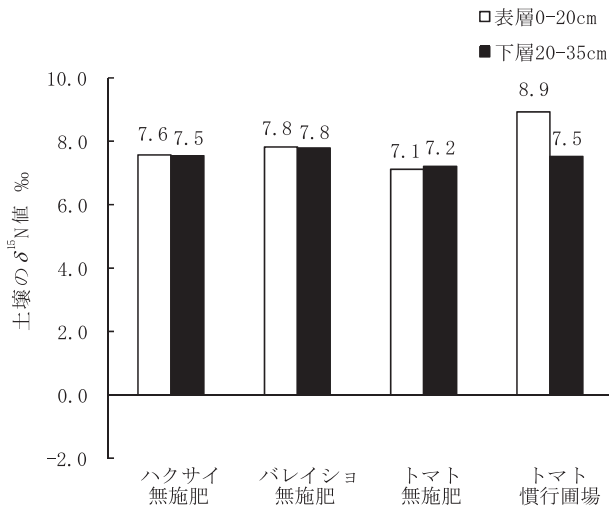
## 結果

### 1. 肥料中の $\delta^{15}\text{N}$ 値

慣行栽培圃場で施用された化学肥料の $\delta^{15}\text{N}$ 値は $-1.7\%$ , 有機肥料のそれは $+9.3\%$ であった. なお, 全窒素は化学肥料で $18.4\%$ , 有機肥料は $1.8\%$ と分析され, いずれも表示成分(化学肥料 $17\%$ , 有機肥料 $1\sim1.5\%$ )より若干高めの値であった.

### 2. 作物の $\delta^{15}\text{N}$ 値

第2図に作物の $\delta^{15}\text{N}$ 分析結果を示す. 無施肥栽培圃場と慣行栽培圃場のトマト葉身の平均値は共に $+3\%$ 程度

第4図 土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値。

ハクサイ、バレイショは収穫直後に耕起された圃場の6地点の混合試料。トマトは栽培期間中の畝でサンプリングした3地点の混合試料。

で、有意差は見られなかった。ただし、慣行栽培圃場ではばらつきが大きい傾向にあった。参考に調べたナスでは慣行栽培圃場が低かった。これは化学肥料を主に吸収した結果と思われる。他の作物については窒素固定植物であるダイズが $-0.8\%$ 、ササゲが $+0.5\%$ と低かったことを除き、概ねトマトと同様であった。

### 3. 作物の全窒素

作物の葉身の全窒素は、慣行栽培のトマト、ナスがそれぞれ $3.7\%$ 、 $4.4\%$ であったのに対し、無施肥栽培は $2.8\%$ 、 $2.2\%$ とともに低かった(第3図)。無施肥栽培の作物間では、ナスの $2.2\%$ からバレイショの $5.0\%$ までばらつきが大きかった。

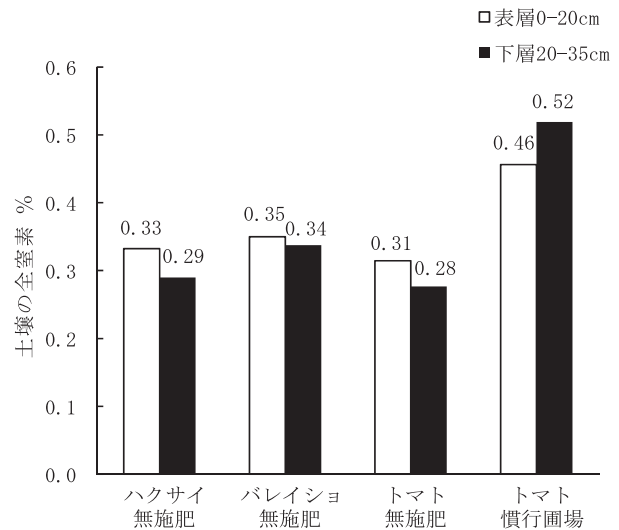
### 4. 土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値

トマト圃場の土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、慣行圃場の表層が $+8.9\%$ 、下層が $+7.5\%$ で表層がやや高く、無施肥栽培圃場はそれぞれ $+7.1\%$ と $+7.2\%$ で殆ど差がなかった(第4図)。他の無施肥圃場も表層と下層でよく揃っていた。下層の $\delta^{15}\text{N}$ 値は慣行圃場も含め $+7.1\sim+7.8\%$ の間に分布し、大きな差は無かった。

畜糞堆肥を使用しない関東の畑土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値はほぼ $+6.0\%$ である(徳永ら2002, 米山ら2002)との報告があり、本対象圃場の値はほぼ標準的な値であった。慣行圃場の表層が $+8.9\%$ と高いのは、 $+9.3\%$ の有機肥料の影響と思われる。

### 5. 土壌の全窒素

トマト圃場の全窒素は、慣行圃場で表層が $0.46\%$ 、下層が $0.52\%$ とやや下層が高い傾向を示したのに対し、無

第5図 土壌の全窒素。  
第4図に同じ。

施肥圃場では表層が平均 $0.31$ 、下層が $0.28\%$ と表層が高く、逆の傾向を示した(第5図)。この傾向は栽培作物によらず無施肥圃場に共通していた。全窒素のレベルは無施肥圃場で慣行圃場より明瞭に低かった。

## 考 察

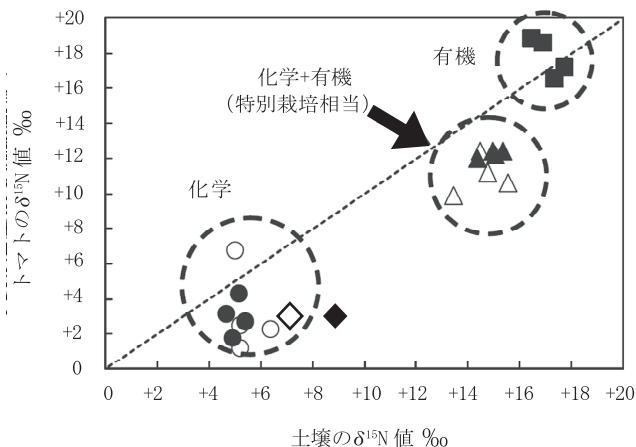
### 1. 土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値と作物の $\delta^{15}\text{N}$ 値

非窒素固定植物の $\delta^{15}\text{N}$ 値は、土壌窒素を窒素源としている場合、土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値を反映している(Yoneyamaら1986)。植物によって利用される土壌窒素の多くは、硝酸態もしくはアンモニア態であると考えられており、それらは有機態窒素の無機化により生じ、土壌中でのマスフローにより植物根に達する。それらの過程においても同位体分別が起こる(Karamanosら1977)が、その程度は小さい(米山1987)。したがって、作物が土壌由来の窒素のみを吸収すると仮定すれば、土壌窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値と作物体窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値はほぼ同じとなるはずである。化学肥料を施用すると、土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値より $\delta^{15}\text{N}$ 値の低い窒素を作物が吸収するため、作物の $\delta^{15}\text{N}$ 値はその分希釈されて低下する。第6図は、両者の関係を示した中野(2008)のデータに今回の調査結果を重ね合わせたものである。

調査圃場の表層0-20 cm土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値とトマト葉身の $\delta^{15}\text{N}$ 値の関係をみると、慣行圃場はそれぞれ、 $+8.9\%$ と $+3.0\%$ 、無施肥圃場は $+7.1\%$ と $+3.2\%$ であった(第4図)。いずれも土壌窒素より $\delta^{15}\text{N}$ 値の低い窒素を作物が吸収していたことを示している。

慣行圃場の表層の $\delta^{15}\text{N}$ 値は $+8.9\%$ であった。化学肥料無施用であればトマトの $\delta^{15}\text{N}$ 値も表層とほぼ同じになると予想されるが、実際には $-1.7\%$ の化学肥料で希釈されて $+3.0\%$ になったと考えられる(第6図)。一方、無施肥圃場の表層は $+7.1\%$ であり、トマトの $\delta^{15}\text{N}$ 値はほぼ





第6図 栽培土壌とトマト果実の $\delta^{15}\text{N}$ 値との関係.

○：CDU 化成，●：即効性化学肥料，▲：牛糞堆肥 + CDU 化成，△：鶏糞堆肥 + CDU 化成，■：牛糞堆肥 + 鶏糞堆肥，◇：無施肥（葉），◆：慣行（葉）.

（中野 2008）に無施肥および隣接慣行圃場の本調査結果（凡例中に下線）を追記.

+7‰になることが予想されるが，実際には+3.2‰と低かった．下層も+7.2‰と表層にほぼ等しく，仮に無施肥栽培の特性として，慣行栽培より根が深く張って下層の窒素を吸収していたとしても，トマトの $\delta^{15}\text{N}$ 値の低下を説明することはできない．したがって，無施肥圃場のトマトは土壌窒素以外の窒素を吸収したと考えられる．

## 2. 窒素の由来

固定窒素を唯一の窒素源として生育させたダイズの $\delta^{15}\text{N}$ 値は，-2～0‰程度であることが知られている（Yoneyama ら 1986, Daniel ら 1980, Bergersen ら 1985）．本無施肥圃場のダイズの $\delta^{15}\text{N}$ 値は-0.8‰，ササゲの $\delta^{15}\text{N}$ 値は+0.5‰であり，いずれも固定窒素を主な窒素源としていたと考えられる．他の作物は+2.2～5.0‰と高く，固定窒素以外の窒素を吸収していることは明らかである（第2図）．

$\delta^{15}\text{N}$ 値の2ソースモデル（和田，2002）により，作物の葉身の窒素が土壌窒素およびその他窒素源に由来した割合を推定することを試みた．

$$fs + ff = 1 \quad (\text{式 1}) \quad \delta p = fs \times \delta s + ff \times \delta f \quad (\text{式 2})$$

ただし  $fs$ ,  $ff$  はそれぞれ土壌とその他の窒素源の割合  
 $\delta p$ ,  $\delta s$ ,  $\delta f$  はそれぞれ作物の葉身，土壌，その他の窒素源の $\delta^{15}\text{N}$ 値

その他の窒素源は慣行栽培では主に肥料である．しかし，無施肥栽培では，肥料が施用されていない．そこで仮に，窒素固定のみが「その他の窒素源」であり，固定窒素の $\delta^{15}\text{N}$ 値はダイズもしくはササゲ植物体の $\delta^{15}\text{N}$ 値と等しいと仮定して2通りの計算を行った結果が第1表である．なお，土壌の $\delta^{15}\text{N}$ 値は無施肥圃場の上層下層の平均値を用いた．

土壌窒素の寄与率はダイズ基準で見積もった場合で0.35～0.57に分布し，平均で0.48，ササゲ基準で見積もると0.23～0.49に分布し，平均で0.38となった．このように，無施肥栽培においては地力窒素以外の窒素源の寄与が大きいことが示唆された．

## 3. 土壌の全窒素量の検討

$\delta^{15}\text{N}$ 値は，慣行圃場の下層と無施肥圃場ではほぼ同じであった（第4図）．これに対し全窒素は，慣行圃場の下層が0.52‰であったのに対し，無施肥圃場は0.28～0.35‰と相対的に低かった（第5図）．この結果が地力窒素の消耗を表しているとするれば，地力窒素以外の窒素源からの窒素供給が大きいとは言え，無施肥栽培の持続性が懸念される．しかし，本無施肥栽培農家によれば，本無施肥圃場での収量は3年目に底を打ち現在は増加傾向にあるとのことであった．このような経過は，無施肥栽培を実践する多数の農家の報告に一致している．

加藤ら（2001）は，東京都の黒ボク土において，春作キャベツと秋作ダイコンの交互作を21年間にわたって続けた．この圃場試験中の無窒素区において，土壌の全窒素は当初0.35‰であったが，次第に低下し5年目で最低の0.27‰になった．しかし，その後上昇に転じて10年目には試験前の水準を回復し，18年目には0.37‰に達した．本無施肥圃場でも収量の回復が見られたように，その土壌の全窒素の推移も加藤らの試験と同様の経過をたどっているとするれば，少なくとも圃場の窒素収支の観点からは無施肥栽培

第1表 無施肥栽培圃場の土壌窒素の寄与率.

作物	$\delta^{15}\text{N}$		土壌窒素の寄与率	
	作物	土壌	ダイズ基準	ササゲ基準
ダイズ	-0.8	7.5	0.00	
ササゲ	0.5	7.5		0.00
トマト	3.2	7.5	0.48	0.38
ナス	3.4	7.5	0.51	0.41
トウガラシ	3.9	7.5	0.57	0.49
パレイショ	3.1	7.5	0.47	0.38
ゴマ	2.1	7.5	0.35	0.23
平均	3.1	7.5	0.48	0.38

に持続性があると言える。

窒素の給源として、都市部では窒素酸化物の降下の可能性も指摘できよう。しかしその流入速度はそれほど高くない。青井・池田（2002）によれば、それは高速道路のインターチェンジ周辺でも年間  $2.7 \text{ gN m}^{-2}$  程度である。

無施肥栽培農家の圃場で何が起きているのか、それが持続的といえるのか。本調査結果から、相対的に  $\delta^{15}\text{N}$  値の低い窒素の流入が系外から相当量あった可能性が示唆され、それにより標準的な出荷量が実現しているものと考えられた。今後、より詳細な養分収支が解明され、その持続性についての議論が深まることを期待する。

**謝辞：**本研究に協力していただいた、無施肥栽培農家の関野幸生氏ならびに隣接農家の正木隆雄氏に心より御礼申し上げます。また、 $\delta^{15}\text{N}$  分析に際し協力して下さった飛田哲氏、藤枝健地氏、図表の浄書等にご助力いただいた梅澤亜未氏、そして本原稿に対して専門家の視点からコメントを下さった安藤象太郎氏、飯泉佳子氏に心より感謝申し上げます。

## 引用文献

- 青井透・池田正芳 2003. 群馬県西部の降雨中窒素濃度の年間変動と低公害車が排出するアンモニア態窒素の関与. 日本水環境学会 37 : 5.
- Bergersen, F.J., Turner, G.L., Gault, R.R., Chase, D.L., and J. Brockwell 1985. The natural abundance of  $^{15}\text{N}$  in an irrigated soybean crop and its use for the calculation of nitrogen fixation. *Aust. J. Agric. Res.* 36 : 411–423.
- Daniel H. Kohl and Georgia Shearer 1980. Isotopic Fractionation Associated With Symbiotic  $\text{N}_2$  Fixation and Uptake of  $\text{NO}_3^-$  by Plants. *Plant Physiol.* 66 : 51–56.
- Karamanos, R.E. and D.A. Rennie 1977. Nitrogen Isotope Fractionation during Ammonium Exchange Reactions with Soil Clay. *Can. J. Soil Sci.* 58 : 53–60.
- 加藤哲郎・米田和夫 2001. 堆肥の長期連用が黒ボク土の理化学性ならびにキャベツとダイコンの収量に及ぼす影響. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.* 87 : 3–7.
- 小宮山誠一・古館明洋・目黒孝 1999. 夏どりキャベツのビタミンC含有率の実態と変動要因. 北海道立農試集報, 77 : 65–68.
- 中野明正 2008. 同位体比等による農産物の原産地および施肥・栽培履歴の推定. *RADIOISOTOPES* 57 : 189–198.
- 徳永哲夫・木村靖 2003. 堆肥または化学肥料を施用した雨よけトマト栽培での作物体と土壌無機態Nの $\delta^{15}\text{N}$ 値の変動. *土肥誌* 74(3) : 323–331.
- 和田英太郎 2002. 窒素安定同位体比と負荷源の特定. 植物栄養・肥料の事典編集委員会, 植物栄養・肥料の事典. 朝倉書店, 東京. 632–634.
- Yoneyama, T., Fujita, K., Yoshida, T., Matsumoto, T., Kambayashi, I. and J. Yazaki 1986. Variation in Natural Abundance of  $^{15}\text{N}$  among Plant Parts in  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  Fractionation during  $\text{N}_2$  Fixation in the Legume-Rhizobia Symbiotic System. *Plant Cell Physiol.* 27 : 791–799.
- 米山忠克 1987. 土壌－植物系における炭素, 窒素, 酸素, 水素, イオウの安定同位体自然存在比. *土肥誌* 58(2) : 252–268.
- 米山忠克・森田明雄・山田裕 2002. 土壌－植物系における炭素, 窒素, 酸素, イオウ動態解析のための安定同位体自然存在比の利用 : 1994年以降の研究の展開. *土肥誌* 73(3) : 331–342.

**Estimation of the Origin of Nitrogen in Tomato Cultivated under an Unfertilized Condition :** Masato ODA and Yasukazu HOSEN (*Japan International Research Center for Agricultural Sciences, Owashi 1-1 Tsukuba Ibaraki 305-8686, Japan*)

**Abstract :** There is a field in Fujimi, Saitama, Japan (unfertilized; UF) where an ordinary amount of crop is produced for marketing without applying any fertilizer or returning above-ground crop residues. We aimed to clarify the source of N in the leaves of tomato cultivated in this field, using the  $\delta^{15}\text{N}$  method. In an adjacent conventional single cropping tomato field (conventionally fertilized; CF), chemical fertilizer and compost ( $100$  and  $45 \text{ g N m}^{-2}$ , and  $\delta^{15}\text{N}$  of  $-1.7$  and  $+9.3\text{‰}$ , respectively) had been applied as basal fertilizers. In UF, the  $\delta^{15}\text{N}$  values of soils were  $+7.2\text{‰}$  in the  $0-20 \text{ cm}$  surface soil and  $+7.1\text{‰}$  in the  $20-35 \text{ cm}$  deep subsoil; the corresponding values in CF were  $+8.5$  and  $+7.5\text{‰}$ , respectively. Compared with those soils,  $\delta^{15}\text{N}$  values in tomato leaves were much lower, around  $+3\text{‰}$  in both UF ( $+3.2 \pm 0.4\text{‰}$ ) and CF ( $+3.0 \pm 1.0\text{‰}$ ) fields. These values in tomato in CF, it may be explained by dilution with absorbed chemical fertilizers; but those in UF, without artificial input, cannot be explained by the absorption of the soil N, which has relatively high  $\delta^{15}\text{N}$  values. The results obtained from the UF field suggest that the field had received a substantial amount of N with relatively low  $\delta^{15}\text{N}$  values like atmospheric N from the outside of the field-plant system and that it allowed the ordinary crop production in the UF field.

**Key words :**  $\delta^{15}\text{N}$ , Nitrogen balance, Tomato, Vegetables, Unfertilized cultivation.