

有機栽培トマトにおける土壌からの微量元素の移動

— 第 2 報 : トマトの生長に伴う微量元素量の変動 —

武井早憲、高澤まき子^{*1}、寺田信幸^{*2}

個人研究者

310-0836 茨城県水戸市元吉田町

^{*1} 仙台白百合女子大学人間学部健康栄養学科
981-3107 仙台市泉区本田町 6 番 1 号

^{*2} 山梨大学総合分析実験センター
409-3898 山梨県中巨摩郡玉穂町下河東 1110

1 はじめに

化学肥料と農薬の使用を前提とする集約農法は、有機農法と比較して収量が多くなるという長所があるが、人為的に投入される化学物質は生態系にさまざまな影響を及ぼしている¹⁾。近年、集約農法で栽培された農産物と比較して有機農法で栽培された農産物は品質がよいと言われ、有機農法が見直されている。しかし、有機農法においても農産物の収量を多くするために多量の有機質肥料を使用した場合、農作物の中に人体に有害な硝酸態窒素の含量が多くなることも指摘されている²⁾。

有機農法が集約農法より優れている理由の一つとして、有機農法では植物が栄養を必要とするタイミングに合わせて無機態窒素を堆肥から補給するから³⁾とも言われているが、実際には解明されていない。高澤らは、有機質肥料の施用効果を把握するため、化学肥料及び有機質肥料の構成成分量を同一に施用し、トマト果実の成分を比較した研究^{4,5)}、有機質肥料及び栽培方法を同一とし、異なる栽培地で生育したトマト果実の比較研究⁶⁾を行ってきた。主な結果をまとめると以下の通りである。

- ① 化学肥料及び有機質肥料による生育を比較した結果、果実のビタミン C 含量は有機質肥料の方が多くなる傾向がある。
- ② 栽培地の違いによる果実のビタミン C 含量を比較したところ、すべての栽培地のものが食品成分表値⁷⁾より上回っており、有機質肥料の効果と思われる。
- ③ 同様に、土壌中のカリウム含量が多い栽培地の場合、ビタミン C 含量が多い果実となる。一方、ビタミン C 含量の少ない果実は、気候の違いと考えるよりも、土壌中の硝酸態窒素含量が多かったことと成熟度が大きかったためと考えられる。

有機質肥料から吸収された硝酸態窒素は、植物中の微量元素の働きによりアミノ酸等に還元されることが知られている⁸⁾。すなわち、根から吸収された硝酸態窒素はモリブデン (Mo) を含む硝酸レダクターゼの働きにより亜硝酸に還元され、鉄 (Fe)、硫黄 (S) を含む亜硝酸レダクターゼによりアンモニアに還元される。その後、アンモニアはアミノ酸の一つであるグルタミン酸に転移される。硝酸レダクターゼや亜硝酸レダクターゼは根や葉身に存在

するので、有機栽培された植物体の根や葉における Mo、Fe、S などの元素の動態を把握することは重要である。しかしながら、トマト苗の微量元素量については表 1 に示した程度の報告しかなく、有機栽培されたトマト苗の微量元素量については経時変化も含め満足なデータがない。このため、本研究では、土壌や有機質肥料中の微量元素がトマト苗に吸収、移動する様子を把握しようとした。

具体的な方法として、トマト苗の生育に応じて、PIXE 法で苗の各部位の元素量を求め、数年にわたってデータを蓄積する。特に、本研究では、苗全体を分析する。データを蓄積した後、有機質肥料及び栽培条件を同一とし、異なる栽培地で生育されたトマト苗において、同様な定量分析を行い、果実のビタミン C 等の含量と比較する。この比較から有機質肥料の施用効果をより明確に把握することを予定している。一般に、植物における微量元素の働きについては、肥料中の特定元素の濃度を過剰又は不足の状態にして生育を比較するケースが多いが、本研究では同一の有機質肥料を使用しても土壌の性質等によりその施用効果が異なる点に着目した。

昨年度から開始した研究では、まず、生育に応じて PIXE 分析用試料を調製する方法を確立した。特に、硝酸分解した試料に固形の沈殿物が生じる場合があったため、遠心分離を行った。その結果、遠心分離を行わない場合と比較して、ケイ素の濃度が約 10 分の 1 となった以外、有意に濃度が変化した元素は見られなかった⁹⁾。また、乾物重が約 30~60 mg の試料 3 個を独立に定量分析したところ、元素濃度の誤差は平均 24 % (最大 72 %) であった。さらに、葉身から調製した試料を用いて、PIXE 法及び誘導結合プラズマ発光分光分析法(ICP法)でリン(P)、カリウム(K)、Fe、および銅(Cu)の元素濃度を分析した結果、濃度が乾物重 1g 当たり 10^{-5} ~0.03 g の範囲で、両者の分析値は矛盾していないなどの成果が得られた⁹⁾。

本年度は、特定の地区(茨城・八郷町)で栽培したトマト苗において、生育に応じた元素濃度や元素量を把握し、土壌中の元素濃度との関係を調べることにした。

ところで、ガラス室内で水耕栽培された果実収穫開始時期のトマト苗の元素濃度等については、李氏ら^{10,11)}により詳細に報告されている(表 1)。李氏らは苗全体を 6 個の部位に分け、ICP 法により元素濃度を分析したが、李氏らと本研究の結果を比較することにより本研究の妥当性や土耕栽培の特長が明らかになると考えられる。

なお、特に断らない限り、元素濃度は、PIXE 法、ICP 法などの全量分析で得られた元素の濃度を表し、化学形態別の濃度と区別することとした。

表 1 トマト苗の微量元素の分析状況と本研究との比較

項目		文献 10	文献 11	文献 11	本研究
栽培方法		水耕	水耕	土耕	土耕
肥料		化学肥料	化学肥料	化学肥料	有機質肥料
部位	根, 果柄	○	×	×	○
	茎, 葉柄, 葉身, 果実	○	○	○	○
分析対象	Mg, P, S, K, Ca	○	○	○	○
	Mn, Fe, Cu, Zn, Sr	○	×	×	○
	Rb	×	×	×	○
	B	○	×	×	×
	C, N, Na, Cl, 硝酸態窒素	○	○	○	×
分析用苗の採取回数		1	10	10	4

注) ○: 分析実施、×: 分析未実施

2 実験方法

2.1 栽培概要

トマトは茨城県新治郡八郷町で、すでに 10 年以上も前から有機栽培に切り替えている圃場で栽培した。実験圃場の大きさは長さ 10.4m、幅 1.0m で、ビニルハウス内に設けた。有機質肥料は牛糞、藁を主原料とする完熟堆肥(堆肥を作ってから約 1 年自然発酵させ、アンモニア臭が無くなったもの)とし、定植の約 1 ヶ月前に通路を除く畝に施用した。この有機質肥料の成分は、窒素(N)0.30%、リン酸(P₂O₅)0.42%、カリウム(K₂O)0.18%で、施肥量を 7 t/10 a とした。また、肥料は全量を元肥のみとし、栽培期間中の追肥は行わず、果実の生育促進のためのトマトーン、その他一切の農薬、消毒剤の散布は行わなかった。土壌中の水分蒸発を防ぐための藁は敷かず、適宜灌水を行った。

トマトの品種として、自家採種できるポンテローザ(家庭園芸用)を選定した。種子は 2002 年秋より同圃場で自家採種を繰り返したものを使用した。2004 年 3 月 28 日にビニルハウス内の土壌を細かく篩って苗床を作り、285 粒の種子(F4)を播種した。本葉展開後の 4 月 25 日(播種後 28 日目)、発芽した苗 153 本のうち生育状態の良い苗 32 本を直径 10 cm 位のビニールポットに移植した。ビニールポットには、ハウス内の土壌と前述の有機質肥料を目分量で 1 対 1 の割合で混ぜたものを使用した。有機質肥料は約 3.5t/10 a 施用した。播種後 49 日目(5 月 16 日)、生育状態の良い苗 15 本を畝に定植した。

本研究では根を含めて元素分析を行うことを目的として、根を採取するとき他の根を傷つけないために、図 1 に示すように長さ 10.4m、幅 1.0m の畝を、PIXE 分析用苗を生長させるブロック 2 個、及び完熟果実用苗を生長させるブロックを 1 個、合計 3 種類のブロックに分画した。完熟果実用苗ブロックの苗に対して PIXE 分析を実施しなかった理由は、完熟果実を全て保管する適当な方法が見つからなかったこと、枯れた葉身や葉柄を全て採取できなかったからである。また、土壌の化学組成の経時変化を調べるために有機質肥料のみを施用した無栽培ブロック 1 個を完熟果実用苗ブロックに隣接して設けた。

PIXE 分析用苗ブロック(A,B)及び完熟果実用苗ブロックでは、作業性を考え、苗の間隔が 70 cm となるように各ブロック 5 本ずつ苗を植えた。これらのブロックにおける栽植密度は 100 m² 当たり 179 本に相当する。

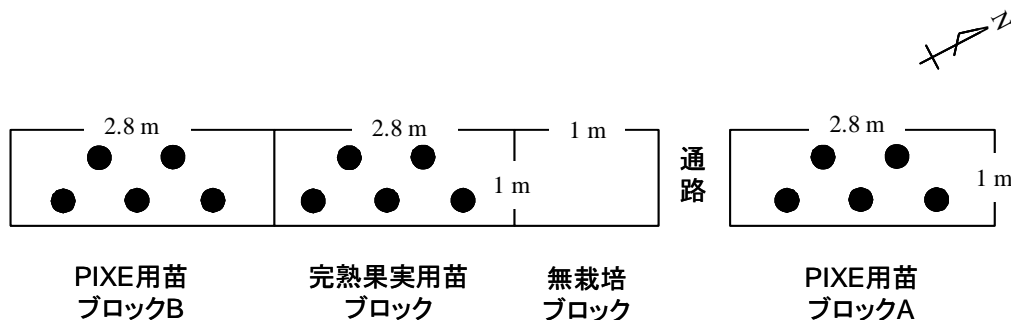


図 1 分画した畝への苗の作付け

黒丸は苗を示す。

定植後、腋芽を適宜摘み取りながら、生育させた。播種後 98 日目(7 月 4 日)に第 5 果房上 3 葉を残して摘芯し、1 本仕立てとした。この時、苗の高さは畝から 1.5 m 位であった。また、開花期において各果房の摘果は行わなかった。その他の栽培条件等については、実験圃場の慣例に従うとともに、文献 10 を参考として栽培した。完熟果実用苗ブロックにおける果実の収穫は播種後 113 日目(7 月 19 日)に開始し、播種後 133 日目(8 月 8 日)に終了した。完熟した果実の収量は 1 株当たり 3.0kg で、同圃場における平均的な収量に等しかった。

ところで、畝における土壌成分と苗における元素濃度の関係を調べるため、土壌を定植直後から果実収穫完了後まで3回にわたり五点地点混合方式で採取した。これは、畝の対角線上から5ヶ所地表から深さ約20cmの土壌をスコップで採取し混合させる方式であり、1回当たりの採取量は各ブロック約5kgであった。採取した土壌は、乾燥後、エーザイ生科研¹²⁾による化学分析、及びPIXE分析を実施した。前者の分析で必要となる土壌は約500g、後者は約150mgである。

2.2 試料の採取・分別

試料を調製する苗の採取日、本数等を表2に示す。表中の有機質肥料の施肥量は、採取した苗を生長させた有機質肥料の施肥量を10a当たり換算して表している。例えば、播種後91日目の苗は、移植時まで土壌のみで、移植後から定植まで施肥量約3.5t/10aで、そして定植後から採取まで施肥量7t/10aで生長させたことを表している。

採取した苗の本数は定植時まで比較的多かったことから、元素濃度には個体差が無いと考えられる。しかし、定植後も同じような本数で分析することは、栽培面積や生育管理の観点から困難であった。このため、定植後も元素濃度に個体差が生じないようにするため、各ブロックにて5本ずつ栽培した苗から、良好に生長した苗を無作為に3本抽出して、PIXE分析に供した。なお、李氏らの研究でも元素濃度を分析する苗の本数は3本であった。

表2 PIXE分析用苗の本数と有機質肥料の施肥量

採取日 (播種後)	苗の本数	施肥量	備考
28日目	121	土壌のみ	移植時
49日目	17	約3.5t/10a	定植時
91日目	3	約7t/10a	定植後42日目
113日目	3	約7t/10a	果実収穫開始時期

本研究では定植後畝を3種類のブロックに分画したため、各ブロックの苗が同じように生長しているか確認する必要がある。このため、成長点の高さを目視にて確認するとともに、土壌・作物栄養診断用葉緑素計(ミノルタ製SPAD-502)で葉色を測定し、その数値を比較した。同葉緑素計は葉身の葉緑素及び窒素含量を測定し、それらに比例する数値をSPADと呼ばれる単位で表示する。測定対象として、果実の栄養状態(硝酸濃度)に依存性が高い果房直下の葉身¹³⁾のうち、第三果房直下の先端部のものとした。その結果を図2に示す。図は、各ブロック30箇所(苗1本当たり6箇所)の葉色の平均値と標準偏差を表している。明らかにPIXE用苗ブロック(A, B)の葉色と完熟果実用苗ブロックの葉色は誤差範囲で一致しており、3種類のブロックとも苗は同じように生長していたと考えられる。また播種後98日目にPIXE用苗ブロックBと完熟果実用苗ブロックの苗を摘芯した。このため、完熟果実用苗ブロックでは摘芯後葉色が低下するとともに、その標準偏差も大きくなった。すなわち、苗の生長に応じて共存していた栄養成長と生殖成長が、摘芯により生殖成長が優先され、苗が枯れ始め、葉色が低下したと考えられる。

採取した苗は、栽培地においてステンレスハサミで根、茎、葉身、葉柄、果柄、果実の6種類の部位に分け、それら全量をビニール袋で密閉、梱包し、冷蔵状態で直ちに仙台に送付した。なお、苗1本当たりの生重量は、播種後28日目で834mg、113日目で3,321gであった。

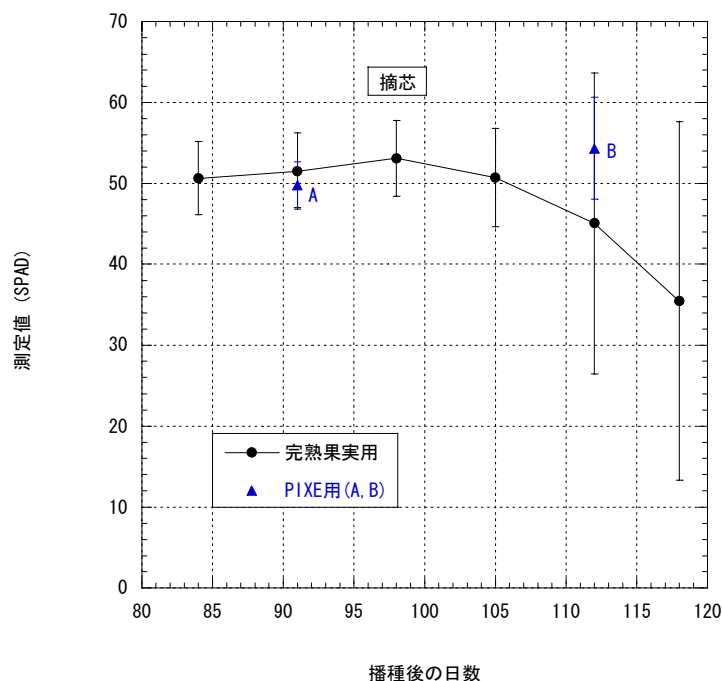


図 2 各ブロックにおける葉色の測定結果

2.3 試料の調製

翌日、仙台に到着した苗の重さを測定した結果、各部位とも約 0.1%の精度で一致していることを確認した。その後、蒸留水で試料の汚れを洗浄し、果実以外の部位は長さ 1cm 位の大きさにハサミ等で裁断した。これらの試料は部位毎に 2 日間 80°C で乾燥させた後、小型超高速粉砕機 (WB-1 型) を用いて粉末化した。また、果実の乾燥方法は、果実中の液体が皿に固着することが考えられるので、真空凍結乾燥法を採用した。すなわち、果実全量をミキサー (日立製 VA-23S 型) に 1 分間かけ、その一部 150g をシャーレに入れ、真空凍結乾燥機 (日本フリーザー製 BFD-2 型) を用いて 4~5 日間 -45°C で乾燥させた。

試料乾燥後、各部位の乾物重を測定した。果実の全乾物重は、シャーレで乾燥させた果実 (生重量 150g) の乾物重に比例すると仮定し、算出した。図 3 に苗 1 本当たりの乾物重の経時変化を示す。図の播種後 0 日目の値は播種した種子 1 粒の乾物重である。苗の乾物重は初め葉身が 65% を占めていたが、113 日目は果実が 48% を占めるように変化した。また、播種後 113 日目の乾物重は種子の約 10^5 倍となった。播種後 91 日目から 113 日目における乾物重の増加率が 91 日目以前と比べ少なくなっているのは、異なるブロックで生長させた差異かもしれないが、摘芯による影響とも考えられる。

粉末に調製した試料の一部を日本アイソトープ協会仁科記念サイクロロンセンター (NMCC) に送付し、マイクロオープンによる硝酸加熱灰化法¹⁴⁾に準じて分解した。すなわち、テフロン製容器に乾物重約 30~60mg の試料を精秤して入れ、これに濃硝酸 1mL と内部標準元素としてインジウム標準溶液を試料重量に対して $1,000 \mu\text{g/g}$ になるように添加した。そして、テフロン製容器の蓋を閉じたのち、ポリプロピレン製外装容器に封入し、マイクロオープン (200W) にて 2 分間加熱、10 分間放置、2 分間再加熱した。

PIXE 分析の照射用試料は、クリーンベンチ内であらかじめマイラーフィルム (500 μm ポリエステル製) に貼り付けた 4 μm のポリプロピレン製フィルム上に、硝酸分解した試料をマイクロピペットにより 5 μL 滴下して自然乾燥させたものとした。なお、乾燥した照射用試料の大きさは直径 2mm 位である。

植物の試料を硝酸分解した場合、通常沈殿物は生じないが、今回硝酸中に沈殿物を生じることがあった。その特徴として、沈殿物が生じる部位は特定の部位ではなく、同一の部位でも試料により沈殿物が生じる場合や生じない場合があった。また沈殿物の量も一定ではなかった。このため、硝酸分解した全試料に対して、遠心分離により沈殿物を除去した。なお、遠心分離は毎分 10,000 回転で 10 分間行った。

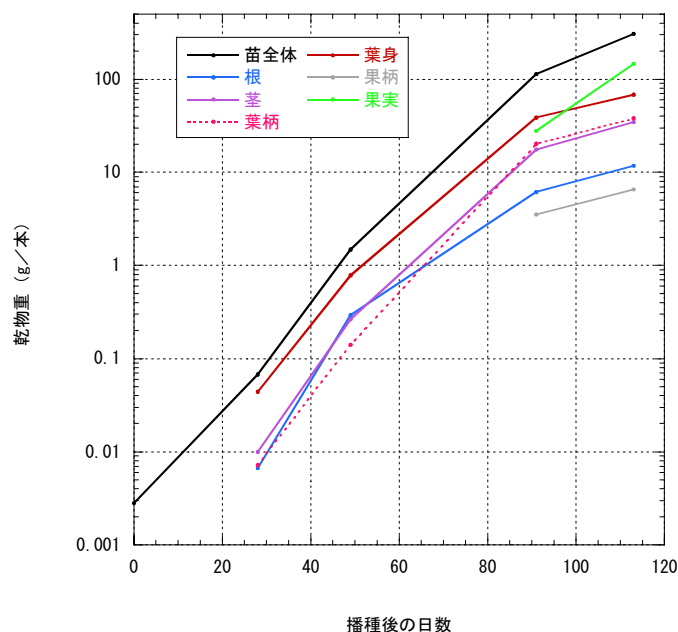


図 3 苗 1 本当たりの乾物重の経時変化

2.4 元素の定量分析と元素濃度の算出

調製した PIXE 分析用の照射試料に、NMCC スモールサイズのサイクロトロンからの 2.9 MeV 陽子線 (直径 6mm) を真空チェンバー内で照射した。これにより発生した特性 X 線を測定してスペクトルが得られ、解析プログラム SAPIX¹⁵⁾ によりインジウムを内部標準¹⁴⁾ とする検出元素の定量値を求めた。

H16 年度の結果⁹⁾ から、一つの部位から得られた 3 個の試料 (乾物重として 1 試料当たり約 30~60mg) を独立に PIXE 分析を行えば、元素濃度の誤差 σ_{tot} は全試料の平均で 20 % 程度と予想された。このため、トマトの生長に応じて部位毎に 3 試料を調製し、合計 60 試料の PIXE 分析を行った。PIXE 分析では、解析プログラム SAPIX のフィッティング誤差が 50 % 以下の元素のうち、表 2 に示した苗の全部位 (延べ 20 個の部位) で、かつ全ての試料 (60 個) で検出された 11 元素に着目した。これら 11 種類の元素は、マグネシウム、リン、硫黄、カリウム、カルシウム、マンガン、鉄、銅、亜鉛、ルビジウム、ストロンチウム (Mg、P、S、K、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn、Rib、Sr) である。また、全ての試料で有意に検出されなかった元素、例えばナトリウム、アルミニウム、珪素、チタン、クロム、コバルト、ニッケル、ヒ素、モリブデンなどは除外した。さらに、硝酸加熱灰化法で濃度の再現性がみられない 2 種類のハロゲン元素 (塩素、臭素) も除外した。硝酸態窒素を亜硝酸に還元する働きをする硝酸レダクターゼに含まれるモリブデンの元素濃度について、今回の PIXE 分析では有意な値が得られなかったため、今後においては分析方法を再度検討しなければならないと考えられた。

次に、採取した苗の部位 j ($=1, \dots, 6$) における元素 i ($=1, \dots, 11$) の元素濃度 c_{ij} を求めた。ここで、添字 i は Mg、P、S、K、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn、Rib、Sr に、また添字 j は根、茎、葉柄、葉身、果柄、果実を表す。すなわち、或る部位 j における 3 個の照射試料のうち、 k ($=1, 2, 3$) 番目の照射試料を PIXE 分析したときの元素濃度を a_{ijk} 、そのフィッティング誤差を b_{ijk} とすると、元素濃度 c_{ij} は、

$$c_{ij} = \frac{\sum_k a_{ijk}}{\sum_k \frac{1}{b_{ijk}^2}}, \quad (1)$$

と定義する。この濃度 c_{ij} の誤差 $\sigma_{tot,ij}$ は、試料 3 個の分析値 a_{ijk} から求めた標準偏差 $\sigma_{1,ij}$ と解析プログラム SAPIX

からのフィッティング誤差 $\sigma_{2,ij}$ を考慮する。すなわち、

$$\sigma_{tot,ij}^2 = \sigma_{1,ij}^2 + \sigma_{2,ij}^2, \quad (2)$$

$$\sigma_{1,ij}^2 = \frac{\sum_k \frac{(a_{ijk} - c_{ij})^2}{b_{ijk}^2}}{\sum_k \frac{1}{b_{ijk}^2}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{2,ij}^2 = \sum_{k=1}^3 b_{ijk}^2. \quad (4)$$

図 4 は、220(=20 部位×11) 個の元素濃度 c_{ij} に対する分析値の標準偏差 $\sigma_{1,ij}$ とフィッティング誤差 $\sigma_{2,ij}$ の相関関係を示している。図の両軸は元素濃度 c_{ij} で規格化を行ったものである。両者の相関係数 r は 0.0077 であったので、相関関係は無いと考えられた。また、標準偏差 $\sigma_{1,ij}$ の平均は 0.127、フィッティング誤差 $\sigma_{2,ij}$ の平均は 0.125 となった。図 5 に元素濃度 c_{ij} で規格化した誤差 $\sigma_{tot,ij}$ を表す。図は全ての部位(延べ 20 部位)で求めた元素毎の平均値とその標準偏差を示している。誤差 $\sigma_{tot,ij}$ における全平均は 18.9%であったが、明らかに元素毎に異なった値となり、比較的誤差の大きい元素は Mg、反対に誤差の少ない元素は Fe であることが明らかとなった。

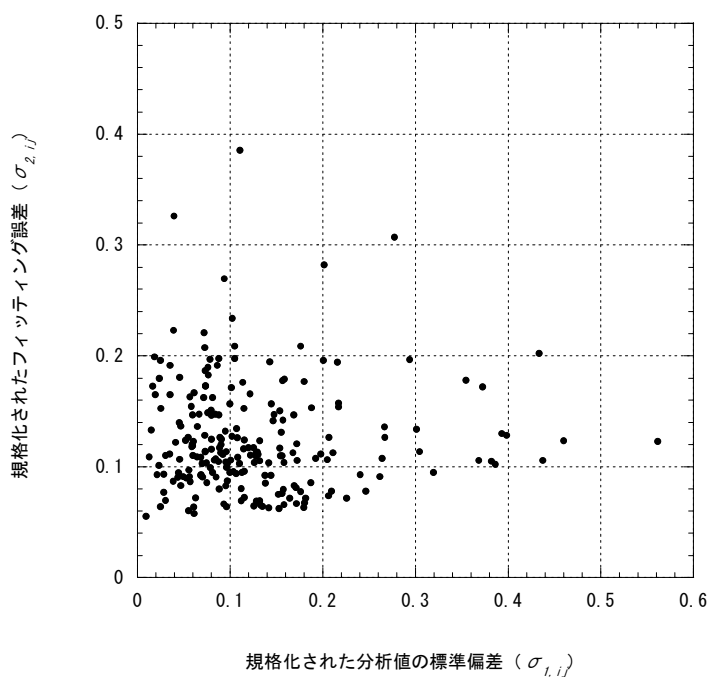


図 4 元素濃度 c_{ij} に対する誤差の関係

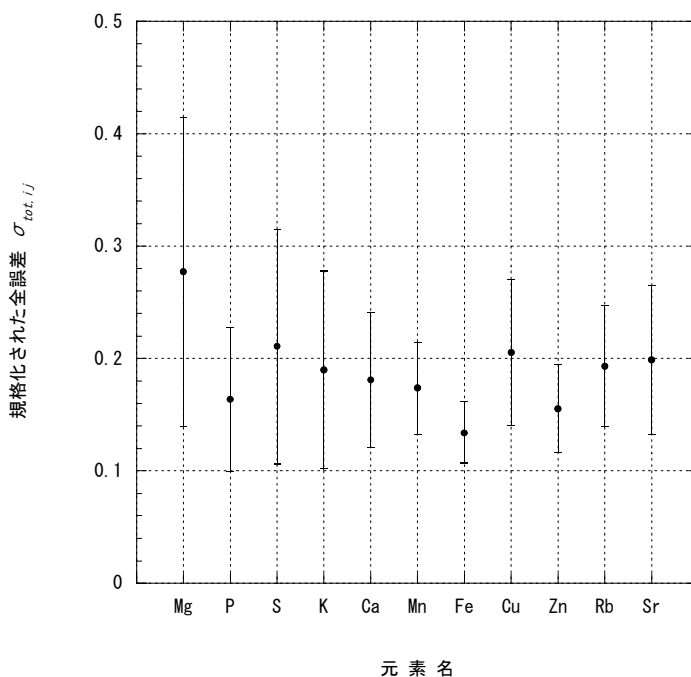


図 5 各元素における誤差 $\sigma_{tot,ij}$ の平均

3 結果と考察

3.1 元素濃度の経時変化

まず初めに、苗全体における元素濃度の経時変化についてまとめる。このため、苗全体で平均した元素濃度 \bar{c}_i を次式で定義する。

$$\bar{c}_i = \frac{\sum_j w_j c_{ij}}{\sum_j w_j}, \quad (5)$$

ここで、 w_j は図 3 に示した部位 j ($=1, \dots, 6$) の乾物重である。図 6 は平均元素濃度 \bar{c}_i の経時変化を示す。図 6(a) にその絶対値を、(b) に各時期の平均元素濃度を 113 日目の平均元素濃度で規格化した値を表している。これらの図から、平均元素濃度の経時変化は元素毎に異なっており、その特徴として二種類挙げられる。

第一の特徴として、49 日目 (定植時) では Fe を除く元素の平均元素濃度が 28 日目 (移植時) と比べ減少している。しかしながら、乾物重変化を示した図 3 から 49 日目における乾物重の増加率が 28 日目より大きく、また PIXE 分析では原子番号が 11 以降の元素のみを対象にしていることを考慮すると、この時期は原子番号 1~10 までの元素の増加率が 11 以降の元素より大きくなっているため、Fe を除く元素の平均元素濃度が減少したと考えられる。

第二の特徴として、49 日目の Fe の平均元素濃度が 28 日目と比べ増加している。この理由として、図 3 の乾物重変化において 28 日目から 49 日にかけて根の乾物重の変化率が他の部位に比べ多いこと、根における鉄の元素濃度は他の部位に比べ 4.6 倍以上多いからと考えられる。

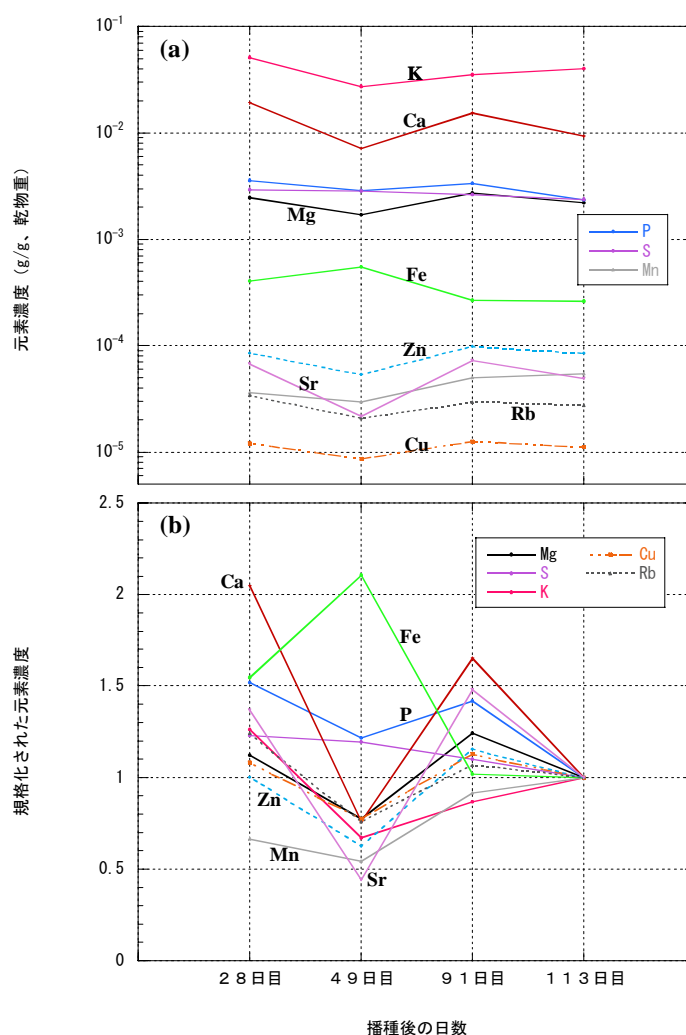


図 6 苗全体で平均化した元素濃度の経時変化

(a)は元素濃度の絶対値、(b)は各元素の濃度を 113 日目の元素濃度で規格化した相対値を表す。

次に、各部位における元素濃度 c_{ij} の経時変化を苗全体の平均元素濃度 \bar{c}_i と共に図 7 に示す。図 7(a)~(d) における各時期の元素濃度 c_{ij} は図 6(b)と同様に 113 日目の平均元素濃度で規格化している。図より部位毎の元素濃度 c_{ij} は複雑な経時変化を示しているため、容易にその傾向を把握することは困難である。このため、部位に着目した各元素の変動率を求め、検討を行った。元素 i の変動率 v_i は、式(1)の元素濃度 c_{ij} を用いて、

$$v_i = \frac{1}{c'_i} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (c_{ij} - c'_i)^2}, \quad (6)$$

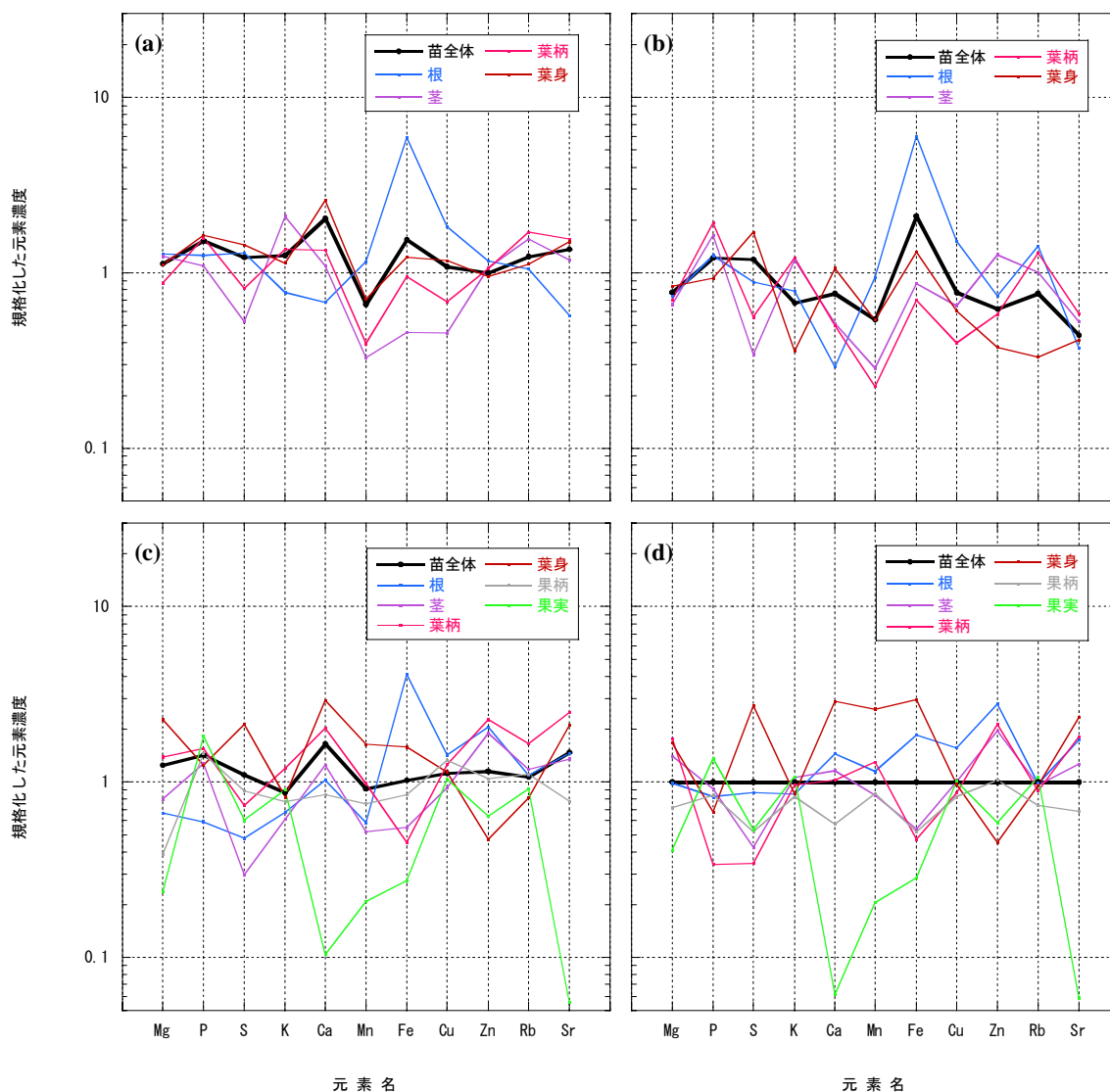


図 7 各部位における元素濃度の経時変化

(a) 播種後 28 日目、(b) 49 日目、(c) 91 日目、(d) 113 日目における各元素濃度は 113 日目苗全体における値で規格化した。

で定義される。ここで、 N は苗の部位数 (4 又は 6)、 c'_i は元素濃度 c_{ij} を部位 j で単純平均した値を表し、式(7)で定義される。

$$c'_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_{ij} \quad (7)$$

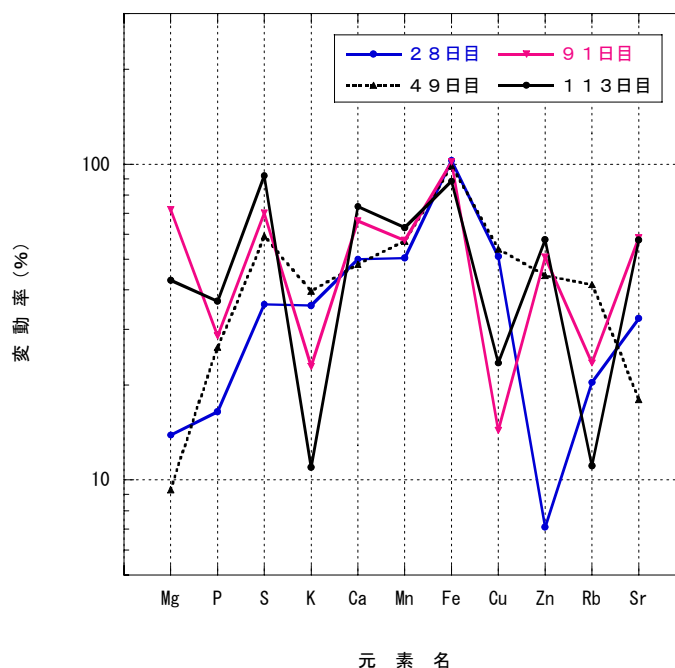
式(7)の平均元素濃度は式(5)の定義と異なっていることに留意しなければならない。式(6)の変動率の経時変化を図 8 に示す。図より変動率は以下のグループに分けられる。

- ① K、Cu
- ② P、S、Ca、Mn、Zn
- ③ Fe
- ④ Mg、Rb、Sr

グループ①は苗の生長に伴って、元素濃度が均一になる元素であり、反対にグループ②は苗の生長に伴って部位の元素濃度の差が大きくなる。これは、グループ①は苗の生長に伴って植物体内を移行する元素を表し、また、図 7 を考慮するとグループ②は元素が必要とする特定の部位へ集中することを示している。③及び④は苗の生長と変動率の変化には明らかな関係が得られなかった。しかし、グループ③の Fe はいつも変動率が 80% 以上であるが、図 7 より元素濃度が多い部位と少ない部位が苗の生長とともに変化していた。

さらにグループ④に属する Mg の変動率は、播種後 49 日目まで 20% 以下であったが、その後 40% 以上に上昇した。すなわち、播種後 49 日目までは植物体内を比較的容易に移動し、元素濃度が均一であったが、その後植物体内の移動が必ずしも容易でなかったことを示している。一般的に、Mg は植物体内を容易に移動する元素とされている。しかし、本研究で得られた播種後 49 日目以後、すなわち定植後の Mg の挙動は、一般的な挙動と異なっている。このような差異は水耕栽培における果実収穫開始時期の苗において報告されているが、本研究において、土耕栽培で差異が生じる時期が定植後であることが明らかになった。

図 8 各元素における変動率の経時変化



3.2 果実収穫開始時期の苗について

本項では、播種後 113 日目(果実収穫開始時期)の苗について、図 7(c)の元素濃度を詳細に検討した。この段階の苗は、子葉から最上位葉までの葉身がすべて見かけ上健全な形で存在しており、最下位果房の果実が採取できるからである。検討した事項は、樹状図による元素分布の理解、苗全体と土壌における元素濃度の相関、及び李氏らの水耕栽培との比較の 3 項目である。

3.2.1 樹状図による元素分布の理解

図 7(c)に示した 66 個の元素濃度は複雑な挙動を示しているため、それらを多変量解析の一つの手法であるクラスター分析で処理し、元素間又は部位間の類似性を定量的に表現する。クラスター分析は元素濃度の絶対値を用いてデータ分析ソフトウェア JMP 4.0J¹⁶⁾の階層型クラスター分析(Ward 法)で実施し、その結果を図 9 の樹状図で表す。図 9(a)は各元素の濃度が部位に着目した場合どのような類似性で分布しているかを示している。すなわち図 7(c)を縦軸側から見て元素間の類似性を分析したものである。例えば、Mn と Sr の元素濃度の分布は他の元素に比べ最も類似しており、次に類似している元素は P と S である。反対に Mg、P、S、K、Ca のクラスター(赤色)と Mn、Fe、Cu、Zn、Rib、Sr のクラスター(青色)はその分布がかなり異なっていると考えられる。後者のクラスターには必須微量元素である Mn、Fe、Cu、Zn が含まれていることに留意したい。

また、図 9(b)は元素 11 種類の濃度がどのような類似性で部位に分布しているかを示している。すなわち図 7(c)を横軸側から見て部位間の類似性を分析したものである。図より部位間における元素濃度の差は、葉柄と葉身、果柄と果実の間のような隣接した部位間で著しく異なっていることがわかる。このように隣接した部位間で元素組成が異なることは、李氏らも同様に報告しており、本研究結果が妥当であると考えられる。

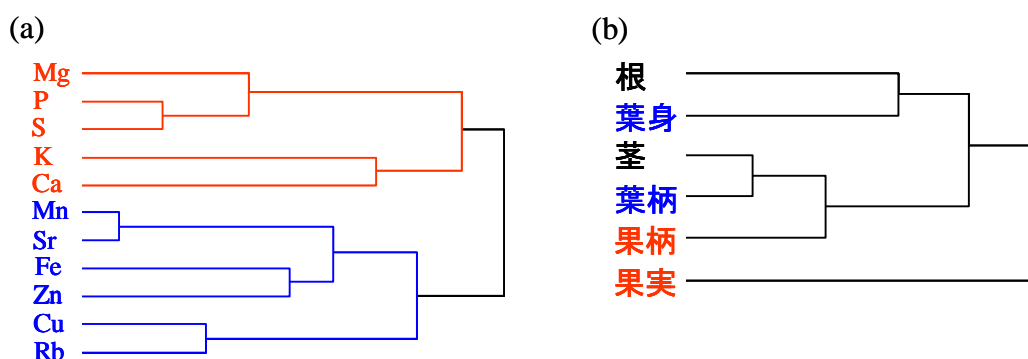


図 9 果実収穫開始時期の元素濃度をクラスター分析して得られた樹状図

(a)は部位に着目した元素間、(b)は元素に着目した部位間の類似性を表す。

3.2.2 土壌における元素濃度との相関

土壌における元素濃度と果実収穫開始時期の苗全体の元素濃度との関係を明らかにするため、表 3 に示した採取日に五点地点混合方式により、土壌を採取した。ここで、播種後 56 日目は定植後 1 週間しか経過していないため、全ブロックの化学組成が同一と仮定し、各ブロック約 5kg 採取した土壌を十分に混合させ、1 回分の試料とした。また、PIXE 分析の土壌は、苗を採取した播種後 113 日目の 1 回だけとした。

表 3 土壌の採取内容

採取日 (播種後)	採取ブロック	備考
56 日目	完熟果実用苗ブロック、 PIXE 用苗ブロック(A,B)	無栽培ブロックも採取
113 日目	PIXE 用苗ブロック B	PIXE 分析も実施
133 日目	完熟果実用苗ブロック	無栽培ブロックも採取

採取した土壌は直ちにエーザイ生科研に送付し、表 4 に示した化学形態の濃度を含む 18 種類の事項について化学分析を実施した。ここで、PIXE 分析による土壌の元素濃度と表 4 の化学形態の濃度を比較するため、注目する元素における化学形態の濃度を乾物重 1g 当たりの含有量(g)として求め、その元素の組成比を用いて、化学形態の元素濃度に換算した。例えば、交換性加里(K_2O)の濃度が 1.6×10^{-3} g/g の場合、K の組成比が 83.0%であることより、交換性カリウムの元素濃度は 1.3×10^{-3} g/g となる。以後、この濃度を「可給態等の元素濃度」と記す。

分析の結果、表 3 に示した 3 種類の土壌試料における可給態等の元素濃度はほぼ同じ値であり、土壌中の化学組成は栽培期間中一定であることが示された。また、56 日目と 133 日目に採取した無栽培ブロックの可給態等の元素濃度も 3 種類の土壌試料とほぼ同じ値となったので、土壌における可給態等の元素濃度は栽培期間中あまり変化していないと考えられた。

表 4 エーザイ生科研における土壌の分析対象と化学形態

元 素	分析対象	化学形態
Mg	MgO	交換性
P	P ₂ O ₅	有効態リン酸
K	K ₂ O	交換性
Ca	CaO	交換性
Mn	MnO	可給態
Fe	Fe ₂ O ₃	可給態
Cu	Cu	可給態
Zn	Zn	可給態

図 10 に 3 種類の土壌試料から得られた可給態等の元素濃度の平均値とその標準偏差を、さらに土壌から得られた PIXE 分析の元素濃度を示す。図より、元素濃度は可給態等の元素濃度の約 10 倍以上となり、特に Fe に関しては約 10^4 倍の差があった。さらに、果実収穫開始時期の苗全体の元素濃度も同図に示す。苗全体の元素濃度は土壌の可給態等の元素濃度より多く、P、K、Ca を除き化学形態に依存しない元素濃度よりも少なくなった。すなわち、植物体において土壌中の可給態等の元素は濃縮されており、さらに P、K、Ca では全化学形態の濃度以上に濃縮されていることが明らかになった。

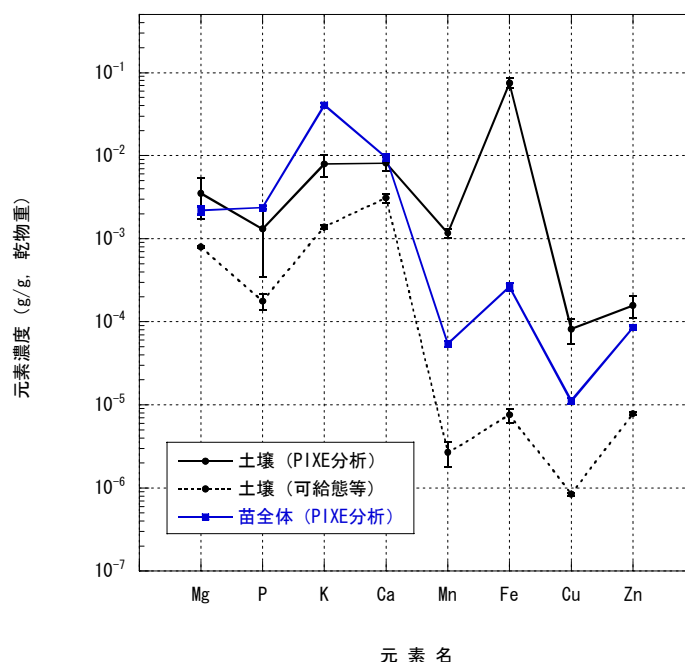


図 10 土壌と苗における元素濃度の関係

3.2.3 水耕栽培との比較

李氏らが水耕栽培により生長させたトマト(品種 TVR-2)における元素濃度と元素量を本研究の値と比較し、その結果を図 11 に示す。図の(a)は本研究で得られた元素濃度(c_{ij})を対応する水耕栽培の値で規格化したものである。また、(b)には元素量($w_j c_{ij}$)の規格値を乾物重の規格値と共に表している。但し、水耕栽培の果実における Sr の元素濃度は 0 であるため、規格値は存在せず、図 9 には表示していない。これらの図から、本研究では水耕栽培と同じ節位まで苗を生長させたため乾物重はほとんど同じであるが、元素濃度は水耕栽培の 0.1~5 倍位となった。また、果実の元素濃度は他の部位と比べ比較的両者で差が少なかった。

元素濃度の差異が生じた原因を検討するため、式(6)の変動率 v_i を両者の元素濃度から求め、図 12 に示す。図より Mn、Fe を除き、両者の傾向はほぼ一致している。すなわち、Mn、Fe を除き苗全体の元素量に違いがあるが、両者同じように各部位に配分していると推定される。しかし、Mn、Fe に関して、土耕栽培の場合、苗全体の Fe 濃度が水耕栽培に比べ高くなったが、反対に Mn 濃度は低くなり、変動率に差が生じた。また、表 5 は苗全体の Mn、Fe の元素濃度と、土壌及び培養液における濃度を分数で示すとともに、両者における濃度比も示す。但し、表中の濃度は、土耕栽培の場合、図 10 の可給態等の元素濃度であるが、水耕栽培では水分を含む生重量当たりである。李氏らは、この表より、培養液からの養分吸収特性が元素によりかなり異なり、Fe ではかなり吸収されにくい、Mn ではかなり吸収されると結論付けている。この結果は、植物体内で Mn と Fe は拮抗作用があることと矛盾していない。しかし、本研究によると土耕栽培でも Mn と Fe の拮抗作用に従い吸収されているが、その特性は水耕栽培と明らかに異なっていることが分かった。

ところで、苗全体における Sr の元素濃度は、水耕栽培に比べ土耕栽培は 4.5 倍大きくなっている。しかし、水耕栽培における培養液中の濃度が不明であるため、両者の吸収特性の差異については言及できない。

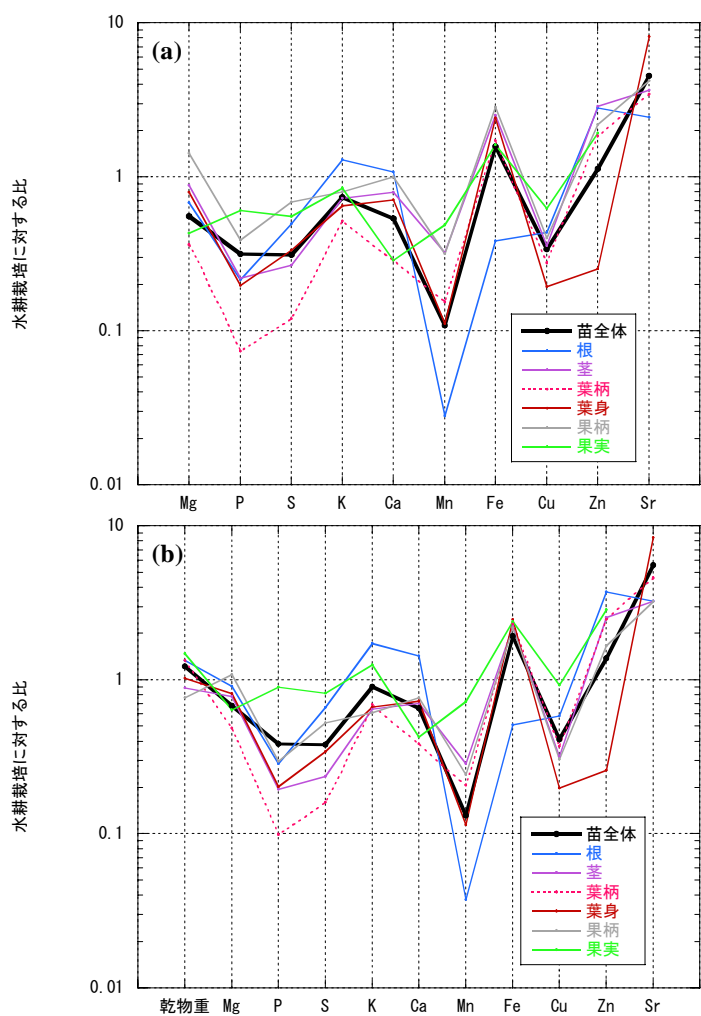


図 11 水耕栽培との比較

(a)は水耕栽培に対する土耕栽培の元素濃度の比、(b)は元素量の比を表す。また、(b)には乾物重の比も示す。

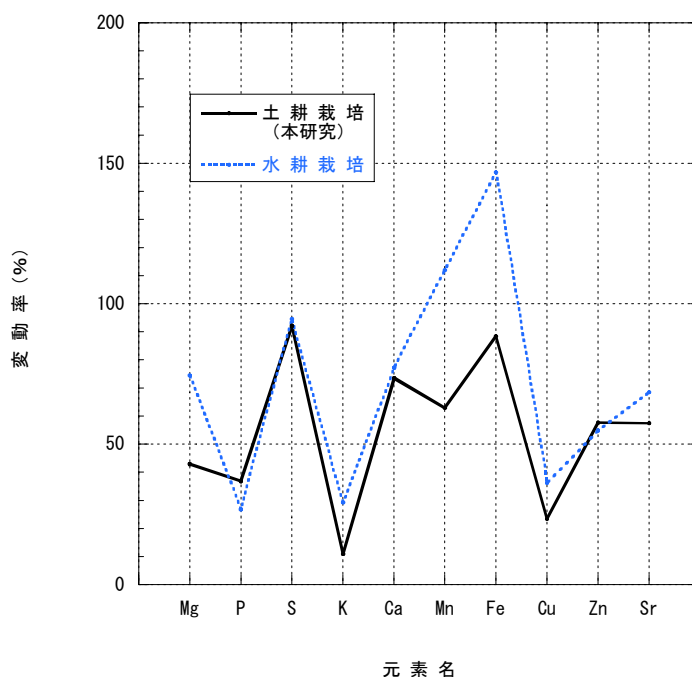


図 12 土耕栽培と水耕栽培における変動率の比較

	土耕栽培	水耕栽培
Mn	$\frac{5.4 \times 10^{-5}}{2.7 \times 10^{-6}} = 20$	$\frac{3.7 \times 10^{-5}}{5.0 \times 10^{-7}} = 75$
Fe	$\frac{2.6 \times 10^{-4}}{7.6 \times 10^{-6}} = 35$	$\frac{1.2 \times 10^{-5}}{2.9 \times 10^{-6}} = 4.3$

表 5 土耕栽培と水耕栽培における Mn、Fe の元素濃度の違い

各分母は可給態等の元素濃度(土耕栽培)及び培養液における元素濃度(水耕栽培)、各分子は苗全体の元素濃度である。

3.3 種子と苗における元素濃度の比較

3.3.1 概要

完熟果実用苗ブロックで生長させた苗 5 本から収穫した完熟果実(総数 73 個、総生重量 14.9kg)の中から、熟度や果房数を揃えて第 3 果房の果実 5 個を抽出した。抽出した完熟果実は 3 分割し、種子の抽出、PIXE 分析用試料、化学分析用試料に供した。

種子は、分割した完熟果実から抽出し、乾燥させた。種子の元素濃度は任意に抽出した 30 粒の種子をまとめて 1 個の試料として PIXE 法で分析した。このため、本研究の試料に対して設定した統一した条件、すなわち全ての完熟果実から抽出した全ての種子を試料として対象としていないので、式(1)の元素濃度は $k=1$ として算出し、式(3)で定義した誤差は求められなかった。従って、種子の元素濃度はばらつきが大きくなる。

また、完熟果実の PIXE 分析用試料を調製するため、種子を抽出せず、果実をミキサーにかけた。このため、完熟果実の元素濃度は種子を含んだ値となる。特に、完熟果実の元素濃度は PIXE 用苗ブロックの果実と同様に第 2.4 項の方法で算出したが、果実数が少ないため、種子と同じように個体差が生じる可能性がある。

3.3.2 経時変化

図 6(a)に示した苗全体の元素濃度を播種時の種子の元素濃度で規格化し、図 13 に示す。図では完熟果実用苗ブロックから採取した種子の元素濃度も同様に規格化し、表した。また、播種時及び採取時の種子の元素濃度が一致していない理由は、完熟果実及び種子の試料が全量でなく、個体差などのばらつきが生じたためと考えられている。

さらに、図より種子と苗の元素濃度を比較すると、元素濃度の経時変化は以下のグループに分けられる。

- ① K、Ca、Fe、Rb、Sr
- ② Mg、S、Mn、Zn
- ③ P、Cu

①は種子よりも苗の元素濃度が多くなるグループであり、その濃度差は最高で Sr の 59 倍であった。②は種子と苗の元素濃度が比較的一定のグループである。さらに③は種子よりも苗の元素濃度が少なくなるグループである。

このような結果が得られたのは、種子から苗の各部位に至るまで同一の手法で分析したためであり、PIXE 分析の優れた利点と言える。

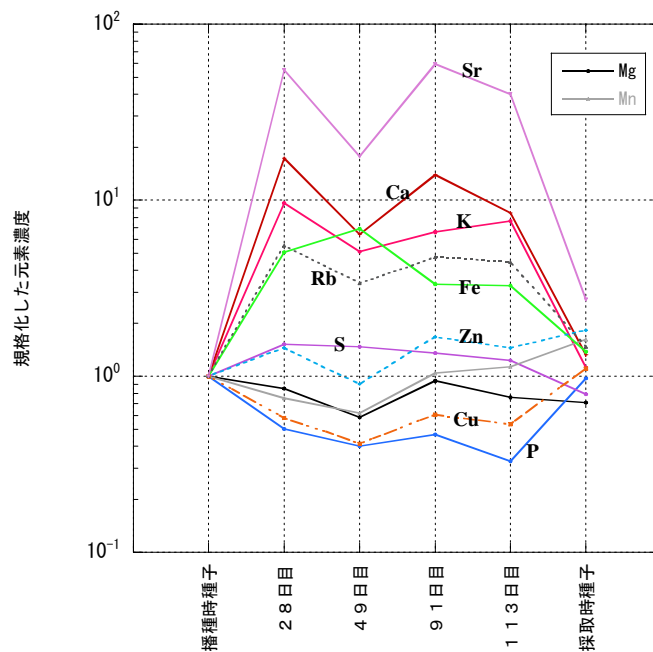


図 13 播種時の種子の元素濃度で規格化した苗全体の平均元素濃度の経時変化

3.3.3 完熟果実と種子の関係

図 14 に播種後 126 日目 (8 月 1 日) に収穫した完熟果実とそれから採取した種子の元素濃度をヒストグラムとして示す。完熟果実における Sr の元素濃度は有意な値が得られず、約 10^{-6} g/g 以下と推定された。また、式(3)で定義される誤差が得られなかったため、ヒストグラムに統計上の誤差は示していない。図より K 及び Rb を除く元素はその濃度が数倍濃縮しているが、K 及び Rb では濃縮していないことが分かった。このような結果が得られた理由として、K 及び Rb では種子に対して濃縮を妨げる働きによるものか、完熟果実内で元素濃度が不均一に分布し、種子周辺でそれらが少なくなったためかと考えられる。しかし、今回の結果だけでは判断できないため、分析方法も含め再度検討したい。

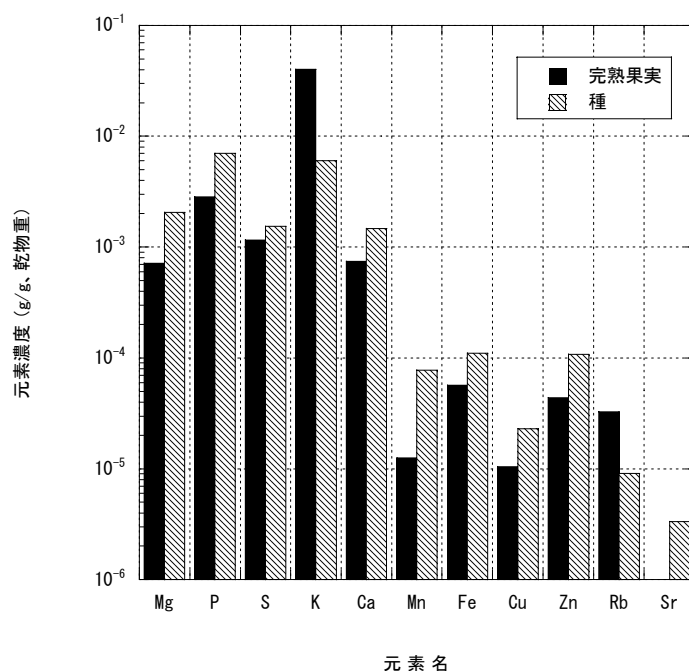


図 14 完熟果実とそれらから抽出した種子における元素濃度の比較

4 まとめ

本研究では、有機質肥料の施用効果を把握するため、植物中の微量元素が硝酸態窒素をアミノ酸等に還元すること、及び土耕栽培におけるトマト苗の微量元素量について報告が少ないことに着目し、土壌や有機堆肥中の微量元素が植物に吸収、移動する様子を把握することを目的とした。

本年度、トマト苗の生育に応じて、その元素濃度を把握するため、茨城地区で栽培されたトマト苗(品種 ポンテローザ、F4)の種子から果実収穫開始時期における元素濃度を PIXE 分析で求めた。その結果、以下のことが明らかになった。

- この栽培期間の全ての部位で PIXE 分析により検出された元素は、Mg、P、S、K、Ca、Mn、Fe、Cu、Zn、Rb、Sr の 11 元素で、それらの元素濃度は元素の種類、部位、生長時期に応じて複雑に変化していた。
- 各部位における元素分布の類似性を調べたところ、葉柄と葉身、果柄と果実のように、隣接した部位間で元素分布が大きく異なっていた。
- 果実収穫開始時期の元素分布と水耕栽培の結果を比較したところ、Mn、Fe を除き同じような傾向を示していた。しかし、Mn、Fe は吸収特性の違いにより分布は異なっていた。

参考文献

- 1) D.Tilman, “The greening of the green revolution”, *Nature*, 396, 211-212(1998).
- 2) 相馬 暁, “なぜ硝酸が蓄積するのか”, 月刊現代農業 2002年1月, 144-147(2002).
- 3) L.E.Drinkwater, P.Wagoner and M.Sarrantonio, “Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses”, *Nature*, 396, 262-265(1998).
- 4) 高澤 まき子, 保井 明子, “有機栽培トマトの品質と土壌成分”, 日本食生活学会誌, 10, 32-38(1999).
- 5) 高澤 まき子, 保井 明子, “肥料の違いによる露地栽培トマト果実の成分の比較”
仙台白百合女子大学 紀要, 7, 115-125(2002).
- 6) 高澤 まき子, 保井 明子, “産地の違いによる有機栽培トマトの成分”
日本食生活学会誌, 13, 163-167(2002).
- 7) 科学技術庁資源調査会編, 五訂日本食品標準成分表(2001).
- 8) Hans-Walter Heldt, 金井 龍二 訳, 植物生化学(第二版), シュプリンガー・フェアラーク東京(2000).
- 9) 武井 早憲, 高澤 まき子, 寺田 信幸, “生産地が異なる有機栽培トマトにおける土壌からの微量元素の移動 -第1報:従来の分析法と PIXE 法の比較-”, NMCC 共同利用研究成果報文集 第 11 巻, 141-150(2003).
- 10) 李 光植, 喻 景権, 松井 佳久, “果実収穫開始時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”, 日本土壌肥料学雑誌, 62, 461-468(1991).
- 11) 李 光植, 喻 景権, 太田 勝巳, 若月 利之, 松井 佳久, “水耕栽培トマト中の無機元素濃度の経時変化”, 日本土壌肥料学雑誌, 62, 606-613(1991).
- 12) エーザイ生科研株式会社 分析センター, 861-2401 熊本県阿蘇郡西原村鳥子 312-4.
- 13) 山田 良三, 加藤 俊博, 井戸 豊, 関 稔, 早川 岩夫, “リアルタイム土壌・栄養診断に基づくトマトの効率的肥培管理(第1報) 葉柄汁液の硝酸濃度に基づく診断基準の作成”, 愛知農総試研報, 27, 205-211(1995).
- 14) S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, S. Saitou and K. Sera, “Present Status of NMCC and Sample Preparation Method for Bio-samples”, *International Journal of PIXE*, 3, 319-328(1993).
- 15) K. Sera, T. Yanagisawa, H. Tsunoda, S. Futatsugawa, Y. Saitoh, S. Suzuki and H. Orihara, “Bio-PIXE at Takizawa Facility (Bio-PIXE with a Baby Cyclotron)”, *International Journal of PIXE*, 2, 325-330(1992).
- 16) JMP 4.0J, SAS Institute Inc., Cary, NC 27513, USA.