

粘土鉱物の荷電特性を利用した植物の養分吸収に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2014-09-11 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小倉, 裕司 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/16720

明治大学大学院農学研究科
2013年度
博士学位請求論文

粘土鉱物の荷電特性を利用した
植物の養分吸収に関する研究

Research on nutrients uptake of plants by
utilizing the charge characteristics of
clay minerals

学位請求者 農芸化学専攻
小倉裕司

目次

第 1 章	緒言	1
第 2 章	土耕栽培における粘土鉱物の荷電特性が ミニトマトの養分吸収に及ぼす影響 . . .	9
第 3 章	土耕栽培における粘土鉱物の荷電特性が 大玉トマトの各種呈味成分に及ぼす影響 . . .	36
第 4 章	水耕栽培における粘土鉱物の荷電特性が 大玉トマトの養分吸収に及ぼす影響	47
第 5 章	総合考察	78
謝辞	83
引用文献	84
資料	92

第 1 章 緒言

1) わが国の農業

第 1 産業である農業は、人間が生存するためには必須の食料を生産する最も基本的な産業である。今日、わが国では高度経済成長に伴う第 2 次産業、第 3 次産業へのシフトにより、第 1 産業である農業は相対的に減少し、1965 年の食料自給率はカロリーベースで 73%であったが、年々減少し、2012 年では 39%となった(農林水産省, 2012)。これは先進国中最低水準であり、食料を安全に供給するためには効率的な農業生産が必要である。

元来、日本の農業は化学肥料や農薬を多く投入することで、生産性の向上や品質を安定化させてきた。しかし、一方では過剰の化学肥料成分は作物に吸収されずに流亡し、地下水や河川が汚染される等の環境問題を引き起こしてきた。特に、植物の生育に必要な不可欠な硝酸態窒素は問題視されている。硝酸態窒素を多量に含んだ水を乳児が飲むとメトヘモグロビン血症を引き起こす。さらに、野菜類に含まれる硝酸イオンの過剰摂取によってもメトヘモグロビン血症や発ガン性物質生成の可能性が指摘され、人体に悪影響を及ぼすとされている(岡崎ら, 2006)。このような、環境問題や食の安全に対して、わが国は環境保全型農業を推進し、環境負荷が小さい、野菜の生産が求められている。

2) 環境保全型農業

農林水産省は平成6年4月18日に環境保全型農業推進の基本的考え方によって、環境保全型農業とは『農業の持つ物質循環機能を生かし、生産性との調和などに留意しつつ、土づくり等を通じて化学肥料、農薬の使用等による環境負荷の軽減に配慮した持続的な農業』と定義している（農林水産省，1994）。これによって、各都道府県は農家に対して化学肥料と農薬の使用量を従来の栽培法の5割以下に削減するように生産を指導している。環境保全型農業に取り組んでいる農家は全国で約50万戸あり、全体の農家数の21.5%である（農業センサス，2000年）。その内、稲が11.6%、野菜が5.1%、果樹が2.6%、その他が2.2%となっている。このように、環境保全型の農業は普及し始めているが、一方で多くの問題点がある。即ち、化学肥料を減らすことによって農作物の生産力が低下することや、農薬の使用を減らすことによって、害虫の防除が困難になるといったことである。特に、環境保全型農業は従来の栽培法と比較すると経費がかかるが、所得が増えるというわけではない。これによって、全国の78.5%の農家は従来の栽培を行っているのが現状である。

3) 化学肥料と土壌

肥料とは、「広義には、有機物であれ無機物であれ、また天然産であれ合成品であれ、植物に対してその正常な生育のために必要な元素の一つまたはそれ以上を供給するすべての物質」と国連工業開発機構（UNIDO）の肥料マニュアル（1967）に定義されている（栗原・越野,1986）。植物の生育に必要な元素は16元素ある。この中で窒素・リン・カリウムは肥料三要素と呼ばれ、植物にとって肥効効果が高い。

わが国では窒素肥料として硫酸塩、塩化物、リン酸塩などのアンモニア塩の形とするか、アンモニアを酸化して硝酸を作り、これに塩基を結合させた硝酸塩として肥料としている（栗原・越野,1986）。通常、畑地土壌に施用されたアンモニア態窒素肥料は硝酸化成作用により硝酸イオンに酸化され、植物に吸収される。土壌は陰荷電を有しているため、陽イオンであるアンモニア態窒素は吸着保持できるが、陰イオンである硝酸イオンは吸着されない。よって、一般に吸収利用率は20～50%であり（北岸,1961）、温暖湿潤気候であるわが国では流亡量が多いため、環境負荷の要因に挙げられている。

リン酸肥料については、大部分がリン鉱石を原料とし、溶解しやすく吸収されやすい形態にしている（栗原・越野,1986）。しかし、リン鉱石資源の枯渇が世界で問題視され輸入価格が高騰している。わが国ではリン鉱資源の

全量を輸入している。また、リン酸肥料を土壤に施用すると土壤に吸着固定され、植物に利用されない難溶性リン酸となる。特に、非晶質粘土鉱物アロフェンを主とする黒ボク土ではリン酸固定能が高い。よって、リン酸肥料の作物による利用率は10～20%以下に過ぎない（北岸, 1961）。したがって、リン酸肥料は多量に施肥する傾向があり、施用効果を上げる取り組みが必要である。

カリウム肥料については、大部分が塩化カリウムと硫酸カリウムが用いられている。これらの塩類は鉱石として採掘される。または、天然かん水を濃縮、分別結晶により製造されている（栗原・越野, 1986）。カリウム肥料を土壤に施用すると、大部分は交換性カリウムとして土壤に吸着保持される。しかし、土壤に吸着されたカリウムイオンの吸着力は土壤に含まれる粘土鉱物の陽イオン交換基の種類に影響を受ける。吸着力が弱い陽イオン交換基に吸着されたカリウムイオンは雨水などに含まれる水素イオンと容易にイオン交換を起こし流亡しやすくなる。このような土壤は腐植質火山灰土壤、陽イオン交換容量 10 me 以下でカオリン系鉱物やアロフェンを主として含有している土壤である（原田, 1961）。このような土壤においては、分肥することが望ましい。

以上のように、わが国では肥料の多施肥によって農作物の多収量化を実現してきた経緯があり、肥料の有効利用が望まれている。

4) 粘土鉱物の荷電特性

粘土鉱物の荷電特性は変異荷電特性と永久荷電特性に分けられる。変異荷電特性は黒ボク土に特徴的に生成する非晶質粘土鉱物アロフェンである。アロフェンは中空球状の構造をとり、外側にはアルミノール基が分布し、内側にはシラノール基が分布している（逸見, 1988）。これらのイオン交換基は pH 依存性が高く、荷電が変化する（Table 1）。このことから酸性側において陽荷電を発現するため、硝酸イオン等の陰イオンの吸着が可能である。

一方、黒ボク土以外に含まれる結晶質粘土鉱物は永久荷電特性を示す。永久荷電特性はシリカ四面体シートの4価のケイ素と3価のアルミニウムに置き換わることで陰荷電が発現する（Fig.1）。これは構造的に陰荷電を発現しているため、一定の荷電量を示し（松中, 2003）、陰イオンは吸着されない。

Table 1 アロフェンのイオン交換基の荷電性質

イオン交換基	土壌pH	反応式
アルミノール基	酸性側	$\text{AlOH}^{(0.5-)} + \text{H}^+ \rightarrow \text{AlOH}_2^{(0.5+)}$
	アルカリ性側	$\text{AlOH}_2^{(0.5+)} + \text{OH}^- \rightarrow \text{AlOH}^{(0.5-)} + \text{H}_2\text{O}$
シラノール基	酸性側	$\text{SiO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{SiOH}$
	アルカリ性側	$\text{SiOH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{SiO}^- + \text{H}_2\text{O}$

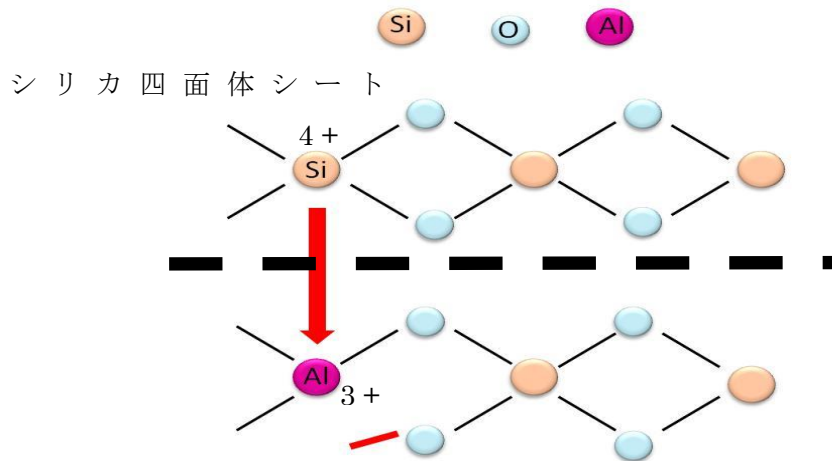


Fig.1 2:1型結晶質粘土鉱物の荷電発現メカニズム

5) 養液栽培

わが国で養液栽培が実用化したのは 1946 年である。養液栽培は植物の生育に必要な養分を、水に溶かし培養液として与える。この時に用いる肥料は化学肥料である。近年、養液栽培は自動化や機械化が進み、生産性の向上が可能である栽培法であると関心がもたれ、年々養液栽培面積は増加している（池田英男，2002）。養液栽培は水耕、噴霧耕、固形培地耕に大別できる。また、培養液の給液方法は培養液を廃棄せずに再利用して栽培する閉鎖系システムと、培養液をかけ流して廃棄する非閉鎖系システムに大別できる。さらに、閉鎖系システムは培養液を循環再利用させる循環式システムと非循環式システムに分けられる。実際わが国の養液栽培システムは湛液型循環式水耕（DFT）、薄膜水耕（NFT）、ロックウールを培地とする循環式あるいはかけ流し式の固形培地耕の 3 つが広く普及している（糖谷明，2002）。循環式養液栽培システムは培養液の再利用を行うシステムであるが、実際の栽培においては培養液の更新が行われ、大量の廃液がでるのが現状である。これら廃液の排出量を少なくするためには、培養液分析によって成分組成を管理することが必須であるが、実際の農家では分析は困難である。よって、養液栽培においては多くの肥料成分を含んだ廃液がでるため、環境負荷が懸念される。

6) 本論文の目的と構成

本報告は環境負荷低減農業の試みの一つとして、土壌のもつ機能について着目し、土壌の荷電特性が植物の栄養吸収に与える影響について分析研究を行った。

第1章では緒言として、わが国の土耕栽培と水耕栽培において、化学肥料の多施肥や水耕栽培の培養液の更新による環境への負荷について述べ、環境負荷の低減の必要性を示した。

第2章では、供試植物をミニトマトとし、土耕栽培を行った。土壌の持つ荷電特性の違いに着目し、植物の養分吸収に及ぼす影響について研究を行った。

第3章では、供試植物を大玉トマトとし、土壌の荷電特性がトマトの旨味成分に及ぼす影響について研究を行った。

第4章では、供試植物を大玉トマトとし、水耕栽培を行った。土壌から分離した粘土鉱物を培養液に添加し、粘土鉱物が有する荷電特性を利用することによって、植物の養分吸収を促進させられるかについて検討した。

第5章では、第2章から第4章を総括した。

第 2 章

土耕栽培における粘土鉱物の荷電特性がミニトマトの養分吸収に及ぼす影響

1. 緒言

我が国は火山国であり、火山帯周辺の土壌は黒ボク土壌と呼ばれ、全農耕地の 27%、普通畑の 51% を占める（土壌保全調査事業全国協議会編, 1991）。また、世界的には、黒ボク土壌の分布面積は 0.7% と非常に小さいが、その約 50% が食料生産の増加を必要とする熱帯地域に分布する。このことから、黒ボク土壌は世界の食料生産の観点から非常に重要な土壌として認識されている（伊藤, 2007）。南関東に広く分布する黒ボク土壌は、非晶質粘土鉱物アロフェンを主としている。アロフェンは、火山灰土壌特有の粘土鉱物である。アロフェンは電子顕微鏡により直径 5nm の粒状で中空球状を示し（Kitagawa, 1971; Henmi and Wada, 1976; Wada and Wada, 1977）、外側にはアルミノール基が分布し、内側にはシラノール基が分布している（逸見, 1988）。このアルミノール基は変異荷電を示し、土壌 pH により、荷電が変化する。即ち、土壌が酸性側になると、 $\text{AlOH}^{(0.5^-)} + \text{H}^+ \rightarrow \text{AlOH}_2^{(0.5+)}$ となり陽荷電が発現し、アルカリ側になると、 $\text{AlOH}_2^{(0.5+)} + \text{OH}^- \rightarrow \text{AlOH}^{(0.5^-)} + \text{H}_2\text{O}$ となり陰荷電が発現する（日本粘土学会

編, 2009)。一方、シラノール基は酸性側では $\text{SiO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{SiOH}$ となり荷電が発現せず、アルカリ性では $\text{SiOH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{SiO}^- + \text{H}_2\text{O}$ となり陰荷電が発現する。この特性を有するアロフェンおよびアロフェンを主とする土壌を用いて、様々な物質の吸着実験が行われている。Egashira and Aomine (1974) はアロフェンが水蒸気を吸着する性質を持つことを示した。宮内・中野 (1971) は、リン酸の濃度と pH によってアロフェンの吸着量を検討し、リン酸の濃度に関係なく酸性側で吸着量が多いことを示している。Parfitt and Henmi (1980) はリン酸イオンを強く吸着する性質を持つことを示した。また、山本 (1983) はアロフェンによる銅および亜鉛の吸着を検討し、他のイオンが存在する環境下では亜鉛よりも銅を選択的に吸着することを示した。Johan et al. (1997) はアロフェンに吸着したリン酸塩の分子軌道法解析を行い、シラノール基のリン酸塩吸着のメカニズムを

$\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{PO}_4^- \rightarrow \equiv \text{Si}-\text{O}-\text{PO}(\text{OH})\text{O}^- + \text{Si}(\text{OH})_4$ のように示している。佐伯 (2007) はアロフェン質黒ボク土を用いて、各種有害無機陰イオンの吸着特性を検討し、フッ化物イオン、亜セレン酸イオン、ヒ酸イオンはリン酸イオンのような配位子交換反応をともなう内圏錯体の形態で吸着し、セレン酸イオン、クロム酸イオンはイオン交換的に水分子を介した形態で吸着していることを示した。また、浅岡・青野 (2006) は赤玉土と無機系吸着

材を混合した赤玉土を用いて海水の脱塩方法を検討し、赤玉は鹿沼土や赤黄色土に比べ除去率が大きく、また赤玉、ケイ酸アルミニウム系吸着材、アルミニウム・マグネシウム系吸着材、酸化マグネシウム系吸着材を 3 : 1 : 1 : 1 の容量比で混合した条件で海水の脱塩が最大であったことを示した。一方、火山灰土壌以外の土壌の主要粘土鉱物は結晶質粘土鉱物であり、pH によって荷電の変化を示さない永久荷電である。これは粘土鉱物を形成するシリカ 4 面体シートの一部がアルミニウムに、アルミニウム八面体シートの 3 価のアルミニウムが 2 価のマグネシウムに置き換わることで、構造的に陰荷電を発現しているため一定の荷電量を示す (松中, 2003)。これらの粘土鉱物の荷電特性の違いに着目し、Itami and Yanai (2006) はモンモリロナイト、セリサイト、カオリナイト、ハロイサイトとアロフェンの 5 種類の粘土鉱物を用いてカドミウムと銅の吸着および脱着について検討し、すべての粘土鉱物で吸着量と脱着量は pH 依存性が高いことを示した。また、塩酸を用いた鉛の除去が報告されている (Isoyama and Wada, 2007)。

一方、今日、露地栽培において、肥料の過剰施肥による環境負荷は問題になっている。特に、窒素は環境中で、有機態、溶存態、ガス態とさまざまに形態変化し、酸性化、富栄養化、地球温暖化の問題を連鎖的に発生させている (波多野, 2005)。窒素による環境負荷は、窒素肥料

の施用量を減らすことで低減が可能と考えられるが、これは同時に植物の窒素吸収量が減少し、生育が不良になることや収穫量が低下する恐れがある。しかし、わが国の普通畑に広く分布している黒ボク土壌は酸性側で陽荷電を発現する特徴を持つ。この特徴を利用することで、窒素肥料の流亡量を少なくすることができれば、環境負荷の低減に有用であると考えられる。

土壌の荷電特性は植物の栽培において、養分の保持能に深く関与していると考えられる。特にアロフェンの変異荷電特性は土壌の pH により荷電が変化するため、土壌の養分保持量が変化する。またイオン交換基は弱酸性性質を示し、1価の陽イオンの吸着力が弱い特徴を持つ。一方、結晶質粘土鉱物のイオン交換基は強酸性性質を示し、1価の陽イオンの吸着力は弱酸性交換基よりも強いと特徴を持つ。よって、これらの荷電特性の違いは、植物の養分吸収に影響を与えると考えられる。しかし、これまでの研究で、植物栽培と関連付けて土壌の荷電と無機成分の吸収に着目した研究は見受けられない。そこで、本章では変異荷電特性を有する土壌と永久荷電特性を有する土壌を用いて、ミニトマトを栽培し、植物の養分吸収に与える影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 栽培概要および試験区

供試土壌については、変異荷電特性を持つ土壌は、明治大学生田キャンパスで採取した立川ローム層の最表層を用いた（以下、黒ボク土壌 Andosols と略す）。また、永久荷電特性を持つ土壌は静岡県磐田市の土壌を用いた（以下、沖積土 Fluvisols と略す）。供試植物はイエローミミ（カネコ種苗株式会社）を用いた。2010年9月21日に、1/5000a のワグネルポットに各土壌と、元肥としてグリーンそだち EX（三菱化学アグリ株式会社製、N10%、P10%、K10%、Mg1%）を20粒（約13g）充填し、購入した苗を定植した。11月5日に硫酸鉄七水和物とスーパー消石灰（協和株式会社）を用いて、ポット土壌に混和し各土壌 pH に調整した。土壌 pH 調整後、第4段果房の上位2葉を残し、摘心し、12月28日に栽培を終了した。培養液については、定植後から土壌 pH 調整前までは、大塚1号、2号を用いて、園試処方 2/5 単位（EC100mS/m）に調整し、各ポットに1Lずつ適宜施用した。土壌 pH 調整後から数週間は、同様の培養液を施用したが、栽培後期から水道水に変更し、各ポット1Lずつ適宜与えた。供試株数は各試験区2株とした。

試験区設定を Table2-1 に示した。試験区はミニトマトを栽培するのに用いた土壌の土壌 pH について4通りを

設けた。即ち、黒ボク土壌と沖積土の土壌 pH を、pH5.0 区、pH5.5 区、pH6.0 区と pH6.5 区とした。

2.2 粘土画分の分離と結晶質粘土鉱物の定性

粘土画分の分離方法は和田（2001）によった。即ち、沖積土を乳鉢を用いて、スラリー状にし、0.2mm の篩を用いて通過画分を回収した。回収した画分を 0.1N-NaOH を用いて pH を pH10 に調整し、粘土画分を分散させた。分散後、沈降法により粘土画分を分離回収した。

結晶質粘土鉱物の定性は X 線回折により検討した。回収した粘土画分溶液を高速遠心機（CFM-1300：IWAKI）で、粘土試料を分離回収した。この粘土試料に 1N-CH₃COONa（pH5.0）を加え Na 飽和試料を作成後、一部は 1N-(CH₃COO)₂Mg（pH7.0）を加え Mg 飽和試料、また一部は Na 飽和試料に 1N-CH₃COOK（pH7.0）を加え K 飽和試料を作成した。作成した Mg 飽和試料と K 飽和試料をそれぞれガラスプレパラート上に塗布し、自然乾燥させ X 線回折装置（Multi Flex：Rigaku）を用い、Cu-Kα 線、40kV、20mA、走査速度 2°/min の条件で測定した。また、測定後の試料については、Mg 飽和試料はヒドラジン処理（Mg-Hyd）、K 飽和試料は、300℃（K-300℃）、550℃（K-550℃）1 時間加熱処理を行い順次測定した。

2.3 土壌分析

栽培後の土壌を40℃で2週間通風乾燥させた。乾燥後、根などの粗大有機物を除去し、乳鉢で軽く粉砕して2mmの篩に通して実験に供した。また、一部の土壌は通風乾燥せずに、未風乾の状態でのpH(H₂O)とECの分析に供した。

土壌の荷電特性の測定はWADA and OKAMURA法を風乾細土(2mm以下)に適用させた方法を用いた(原田, 1984)。本実験では、各種pHによる荷電特性のみを詳細に検討するため、pH(4~8)の1M塩化アンモニウムを用いた。また、平衡溶液のイオン濃度は土壌溶液に近い0.02Mに固定して測定した(三枝ら, 1992)。アンモニウムイオンは水蒸気蒸留法で測定した。塩化物イオンはモール法で測定した(酒井・相原, 2002)。

土壌の化学分析は土壌環境分析法(土壌環境分析編集委員会, 1997)によった。即ち、pH(H₂O)とECについては、pH(H₂O)はガラス電極法(D51: 株堀場製作所)、ECは導電率計(ES-51: 株堀場製作所)で測定した。交換性塩基はセミマイクロショールンベルジャー法で抽出し、原子吸光光度法で測定した。CECはホルメル法で測定した。可給態リン酸はトルオーグ法で測定した。

2.4 植物体分析

植物体の分析は第2段果房直下葉を用いた。分析体は、70℃で通風乾燥後、粉末状にし、硫酸一過酸化水素で湿式分解を行った（植物栄養実験法編集委員会，2001）。分解液中の全窒素を塩入奥田式水蒸気蒸留法で、リンをバナドモリブデン酸比色法（AE-350-M：エルマ販売株式会社）で、カリウム、カルシウム、マグネシウムは原子吸光光度法（AA-6200：株島津製作所）で測定した。

3. 結果および考察

3.1 結晶質粘土鉱物

沖積土から分離した粘土画分の X 線回折図を Fig.2-1 に示した。Mg 飽和試料 (Mg-Air dry) では、14.2 Å、9.9 Å と 7.0 Å にピークを示した。14.2 Å のピークは、K 飽和試料 (K-Air dry) で減少し 9.9 Å のピークが増加していることからバーミキュライトの存在を示している。また 550°C の加熱処理 (K-550°C) によって 14.2 Å のピークが消滅しないことからクロライトの存在を示している。10 Å のピークは、加熱処理 (K-550°C) によっても消滅しないことから、イライトの存在を示している。7.0 Å のピークはヒドラジン処理 (Mg-Hyd) によって 10.4 Å のピークが出現し、加熱処理 (K-550°C) においては、大部分が消滅することからカオリナイトの存在を示している。また、一次鉱物である石英 (3.34 Å) と長石 (3.18 Å) のピークも見られた。以上のことから、沖積土では、イライト、クロライト、バーミキュライトおよびカオリナイトの 4 種の粘土鉱物が含まれ、これらは永久荷電特性を示す。

3.2 土壌の荷電特性と化学分析

各土壌の荷電特性を Fig.2-2、Fig.2-3 に示した。黒ボク土では、土壌の pH が上昇すると CEC が $10.02 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$

から $27.83 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ に増加し、土壌 pH が低下すると AEC が $3.95 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ から $7.39 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ に増加した。また、AEC の変化量は CEC の変化量よりも小さいことが明らかとなった。これは、アロフェンのイオン交換基であるアルミノール基とシラノール基は変異荷電特性を示すためである。また、CEC と AEC の差から求めた式によると等電点の pH は 5.23 であった。一方、沖積土においては土壌 pH による荷電の変化は CEC が $13.01 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ から $13.99 \text{ cmol}_c\text{kg}^{-1}$ と小さく、一定の荷電量を示した。これは、結晶質粘土鉱物の荷電は構造的に陰荷電を発現しているため荷電量は pH に依存しないためである。

栽培後の土壌の化学性を Table 2-2 に示した。土壌 pH (H_2O) について、全ての試験区で設定 pH よりも低下した。これは、硝酸イオンの溶脱による、塩基の溶脱が起こったためと考えられる。また、黒ボク土壌の pH5.0 区においては、土壌の pH が等電点よりも低いため陽荷電が発現していると考えられる。

土壌 EC について、黒ボク土壌では、pH5.0 区（陽荷電発現）で 39 mS m^{-1} と最も高い値を示した。これは、土壌の陽荷電に多くの硝酸イオンが保持されたため、他の試験区よりも溶脱量が少なかったためと考えられる。一方、沖積土では、pH5.0 区で 28 mS m^{-1} と最も高い値を示した。しかし、植物中の窒素含有率が他の試験区と比べて少なかった。これは、植物の硝酸イオンの吸収が少な

かったために、他の試験区よりも多くの硝酸イオンが存在していたためと考えられる。

交換性 Ca について、黒ボク土壌では、pH6.5 区（陰荷電発現）で 16 cmol kg^{-1} と最も高い値を示し、他の試験区は 10 cmol kg^{-1} 以下の値を示した。これは、pH6.5 区が多くの陰荷電を発現していたためと考えられる。一方、沖積土においてはすべての試験区で 10 cmol kg^{-1} 前後の値を示し、顕著な差は見られなかった。交換性 Mg について、黒ボク土壌では pH5.0 区、pH5.5 区、pH6.0 区と pH6.5 区で、それぞれ $0.82 \text{ cmol kg}^{-1}$ 、 $1.25 \text{ cmol kg}^{-1}$ 、 $2.65 \text{ cmol kg}^{-1}$ 、 $2.84 \text{ cmol kg}^{-1}$ と pH が高くなるに従い高い値を示した。これは、アルカリ性側になると陰荷電の発現量が増えるためと考えられる。沖積土においては、pH5.3 区で $3.72 \text{ cmol kg}^{-1}$ と最も高い値を示したが、他の試験区に顕著な差は見られなかった。

交換性 K について、黒ボク土壌では、pH6.0 区（陰荷電発現）で 2.3 cmol kg^{-1} と最も高く、pH6.5 区（陰荷電発現）で 0.7 cmol kg^{-1} と最も低い値を示した。これは pH6.5 区（陰荷電発現）の植物中のカリウム含有率が高いことから、土壌に吸着されたカリウムを植物が多く吸収したためと考えられる。一方、沖積土では、全ての試験区で約 0.5 cmol kg^{-1} を示し、土壌 pH の違いによる差は見られなかった。

CEC については、黒ボク土壌および沖積土で試験区ご

とにあまり差は見られなかった。

塩基飽和度については、黒ボク土壌では pH5.0 区（陽荷電発現区）で約 15% と最も低く、土壌 pH がアルカリ性側になるほど、約 30% から約 61% と高い値を示した。一方、沖積土ではすべての試験区で 70% 以上と高い値を示し、また pH5.0 区においては 100% 以上を示した。これは、沖積土の CEC が黒ボク土壌と比較すると約半分の値と低く、かつ栽培初期から栽培後期まで培養液を施用していたためと考えられる。

可給態リン酸について、黒ボク土壌では、pH6.0 区（陰荷電発現）を除いた試験区で 36mg/kg 前後と低い値を示した。これは、アロフェンのアルミノール基によるリンの特異吸着によって、リン酸の吸収を抑制すると考えられる。一方、沖積土においては、全ての試験区で 2000mg/kg 以上と非常に高い値を示した。これは、栽培初期から栽培後期まで培養液を施用していたためと考えられる。また、リン酸過剰による生育障害は確認できなかった。これは、栽培後期に水道水に切り替えたことにより、リン酸の吸収濃度が低くなったためと考えられた。

以上のことから、黒ボク土壌においては、荷電の変化に伴い、陽イオンの保持量が変化していることが示された。即ち、土壌の化学性からみても、土壌 pH を変化させることで、植物の養分吸収を制御できると考えられる。

3.3 植物体の無機成分

植物体中の全窒素含有率を Fig.2-4 に示した。黒ボク土壌では、統計的な有意差は認められなかったが pH5.0 区（陽荷電発現）で高い傾向を示した。これは、陽荷電により硝酸イオンが吸着保持されることによって、硝酸イオンの吸収が促進されたと考えられる。また、栽培跡地土壌の EC 値と植物体中の窒素含有率には $R^2 = 0.792$ の正の相関性が見られたことから、吸着した硝酸イオンをより多く植物が吸収したと考えられた（Fig.2-5）。統計的な有意差が認められなかったことについては、陽荷電の発現量の差が他試験区と比較して小さいためと考えられた。沖積土においては、全ての試験区で 2% 前後であり、土壌 pH の違いによる差はみられなかった。また、黒ボク土壌と沖積土では黒ボク土壌が高い傾向を示した。これは、黒ボク土壌の陽荷電は沖積土に比べて発現量が $4 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上も多く、より多くの硝酸イオンが吸着したため、溶脱量が少なく、植物が吸収できたと考えられる。

植物体中のリン含有率を Fig.2-6 に示した。黒ボク土壌では、pH5.0 区（陽荷電発現）で 0.11% であり、他の試験区では 0.08% 以下であった。沖積土では、可給態リン酸が最も高かった pH6.0 区で 0.16% と高い値を示したが、他の試験区では 0.12% と同じ値を示したため、土壌 pH の違いによる影響は小さいと考えられる。また、黒ボ

ク土壤と沖積土を比較すると、黒ボク土壤の方が低い値を示した。これは、土壤中の可給態リン酸の含有量が低いためと考えられた。即ち、アロフェンのアルミノール基によるリンの特異吸着によって、リン酸の吸収が抑制されたと考えられる。

植物体中のカリウム含有率を Fig.2-7 に示した。黒ボク土壤では、pH5.0区（陽荷電発現）とpH6.5区（陰荷電発現）、それぞれ4.3%、4.9%であり、陰荷電を発現しているpH6.8区でわずかに高い傾向を示した。これは、陰荷電によって吸着保持されたため、植物が吸収できたと考えられた。しかし、陰荷電発現区を比較すると差は明瞭ではなかった。これは、試験区間のpHの差が小さいため陰荷電発現量の差が小さいためと考えられた。沖積土では、pH6.5区で、2.7%と低い値を示したが、他の試験区では3.4%前後と、あまり差はみられなかった。また、黒ボク土壤と沖積土を比較すると、黒ボク土壤で高い値を示した。これは、イオン交換基が弱酸的性質を示すアロフェンが、強酸的性質を示す結晶質粘土鉱物よりも、吸着力が弱いため、植物に多く吸収されたと考えられる。

植物体中のカルシウム含有率を Fig.2-8 に示した。黒ボク土壤では、pH6.5区（陰荷電発現）で2.0%と最も高い値を示した。これは、カリウムと同様にカルシウムが土壤の陰荷電に吸着し、保持されたため、植物がより吸

収できたと考えられる。沖積土では、全ての試験区で 1.7% 前後とあまり差はみられなかった。また、黒ボク土壌と沖積土を比較すると、吸収量の差は小さかった。これは、2 価の陽イオンは土壌に強く吸着されるためと考えられた。

植物体中のマグネシウム含有率を Fig.2-9 に示した。黒ボク土壌では、pH6.5 区（陰荷電発現）と pH5.0 区（陽荷電発現）で 0.59% と他の試験区よりわずかに高い値を示したが、顕著な差はみられなかった。これは、2 価の陽イオンは土壌に強く吸着されるためと考えられる。沖積土では、pH5.0 区で 0.66% と高い値を示した。これは土壌中の交換性マグネシウムが多かったためと考えられた。他の試験区では 0.44% 前後と、あまり差はみられなかった。

以上の結果から、変異荷電特性である黒ボク土壌では、土壌 pH によって植物体中の無機成分含有率に違いがみられた。即ち、陽荷電が発現する酸性側では陰イオンの吸収が増加し、陰荷電が発現するアルカリ性側では陽イオンの吸収が増加した。一方、永久荷電特性である沖積土では、土壌 pH の違いによって、植物の無機成分含有率に差がみられなかった。よって、変異荷電特性である土壌において、土壌 pH を変化させることで、植物の養分吸収を制御できることが示唆された。

4. 結論

荷電特性が異なる 2 種類の土壌を用い、様々な土壌 pH でミニトマトを栽培し、土壌の荷電が植物の養分吸収に与える影響について検討を行った。その結果、変異荷電特性を有する土壌の陽イオン保持能については、陰荷電の発現量が多くなると、陽イオン保持量が大きくなることが示された。このことから変異荷電土壌で植物を栽培した場合、陽荷電を発現する酸性側（本土壌では pH5.0 区）では硝酸イオンの吸収が多くなり、陰荷電を発現するアルカリ性側（本土壌では pH5.5 区、pH6.0 区、pH6.5 区）では陽イオンの吸収が多くなる傾向が見られた。特に 1 価の陽イオンであるカリウムの吸収が多くなる傾向が見られた。一方、永久荷電特性を有する土壌で植物を栽培した場合、土壌 pH が植物の養分吸収に与える影響は小さいことが示された。

このことから、変異荷電を有する土壌において、土壌 pH を変化させることによって、植物の特定要素の吸収の制御ができると推測された。これは、肥料の施用量の削減および養分の流亡の阻止に有用であると考えられた。

Table 2-1 Experimental plots.

No.	Soil	Treatment
1	Andosols	pH5.0
2		pH5.5
3		pH6.0
4		pH6.5
5	Fluvisols	pH5.0
6		pH5.5
7		pH6.0
8		pH6.5

Table 2-2 Chemical properties of each soil after cultivation (n=2).

No	Soil	Treatment	pH (H ₂ O)	EC mS m ⁻¹	Exchangenable cations			CEC cmol _c kg ⁻¹	Base saturation %	Available P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹
					Ca	Mg	K			
					cmol kg ⁻¹					
1	Andosols	pH5.0	4.72	39.1	3.00	0.82	0.81	31.1	14.9	36.49
2		pH5.5	5.53	24.0	8.04	1.25	1.39	35.4	30.2	37.95
3		pH6.0	5.96	22.4	9.86	2.65	2.32	32.6	45.4	45.25
4		pH6.5	6.24	34.1	16.2	2.84	0.72	32.3	61.2	35.03
5	Fluvisols	pH5.0	5.14	27.5	11.5	3.72	0.56	15.5	101	2043
6		pH5.5	5.49	18.4	9.59	1.96	0.42	17.3	69.2	2487
7		pH6.0	5.90	5.93	10.4	2.46	0.46	18.3	73.2	3156
8		pH6.5	6.15	6.02	11.6	2.49	0.40	16.1	90.1	2411

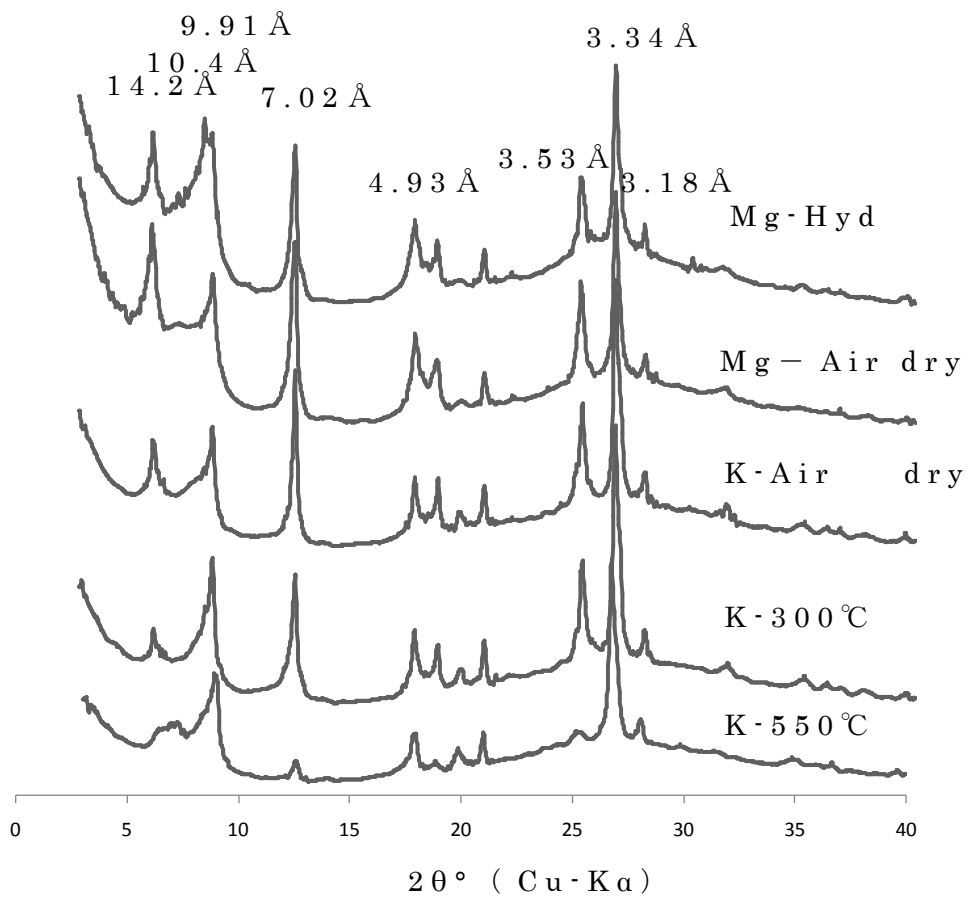


Fig.2-1 XRD diagram of clay from Fluvisols.

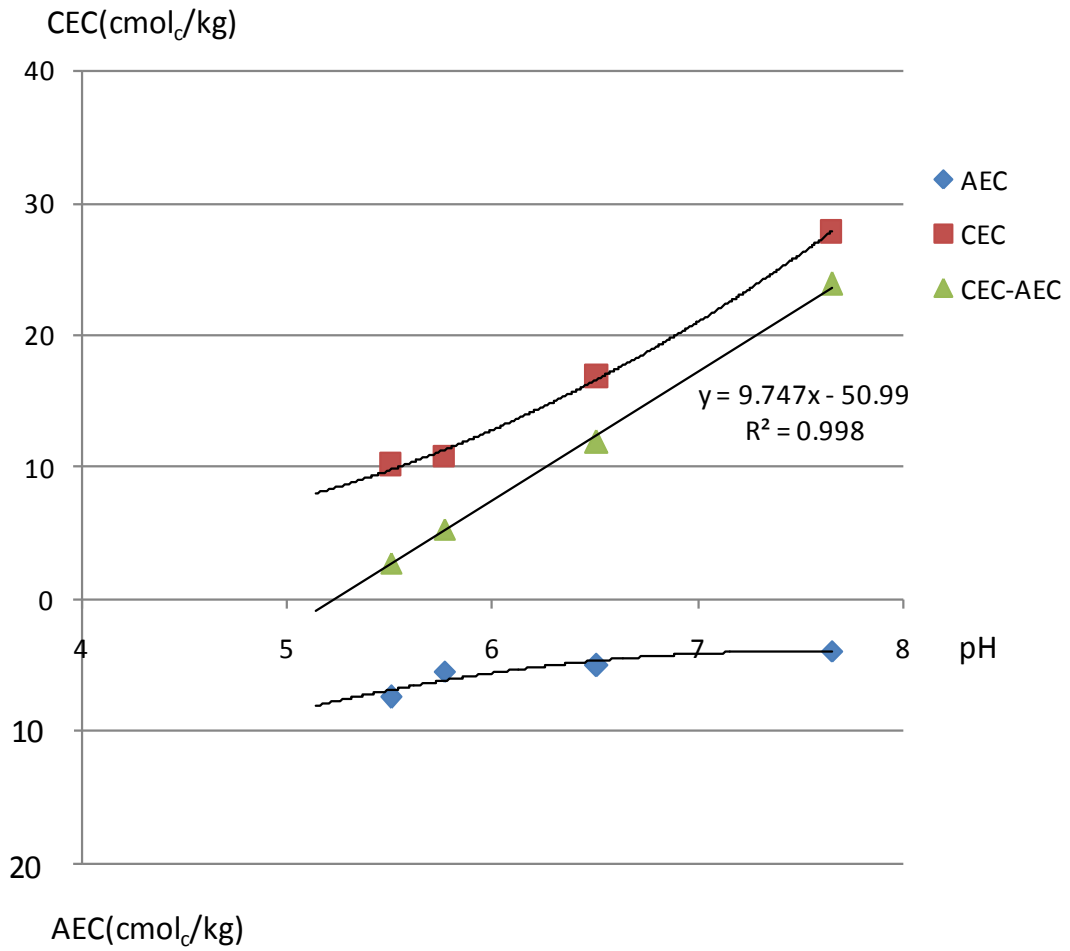


Fig.2-2 The charge characteristics of Andosols. The approximate expression was computed from CEC-AEC.

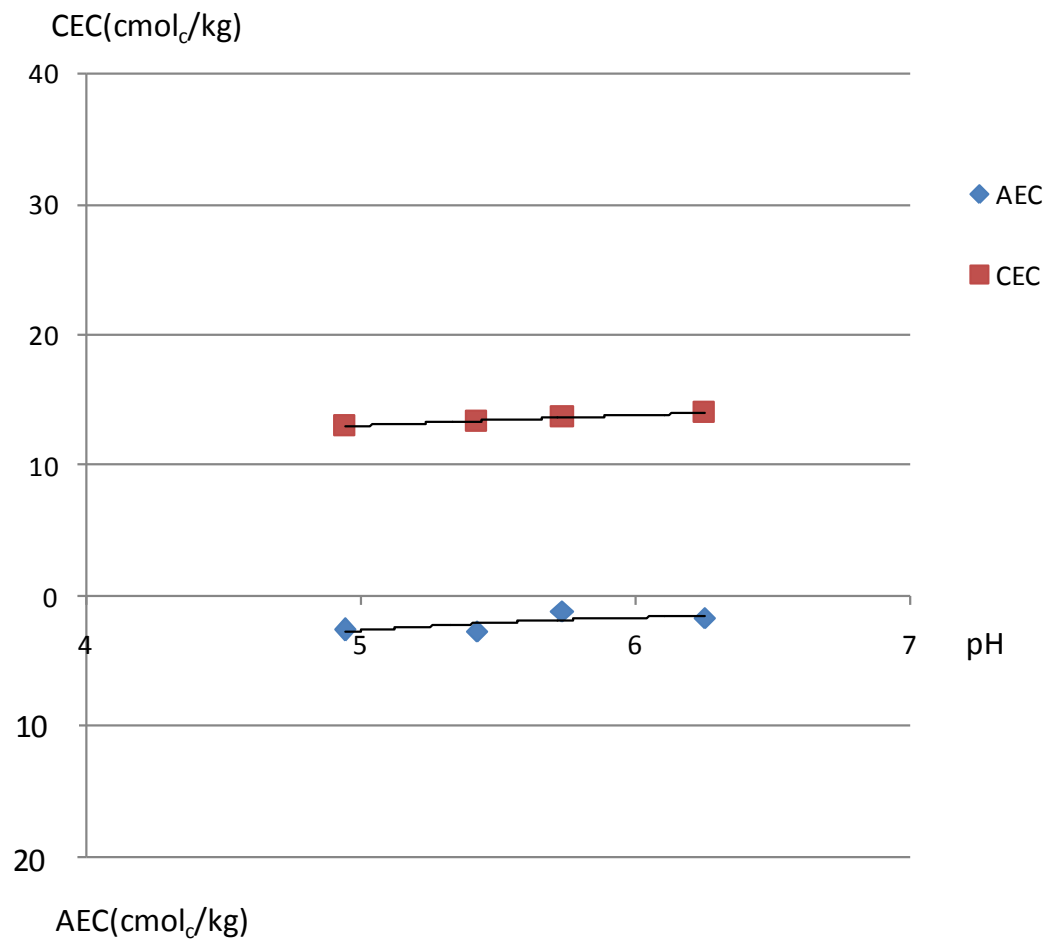


Fig.2-3 The charge characteristics of Fluvisols.

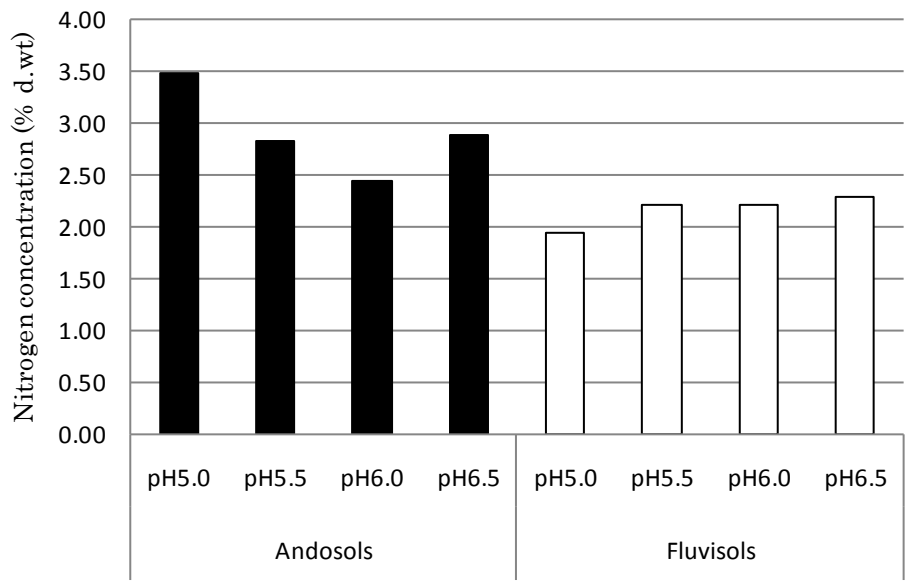


Fig.2-4 The percentage concentrations of nitrogen in the plants (n=2).

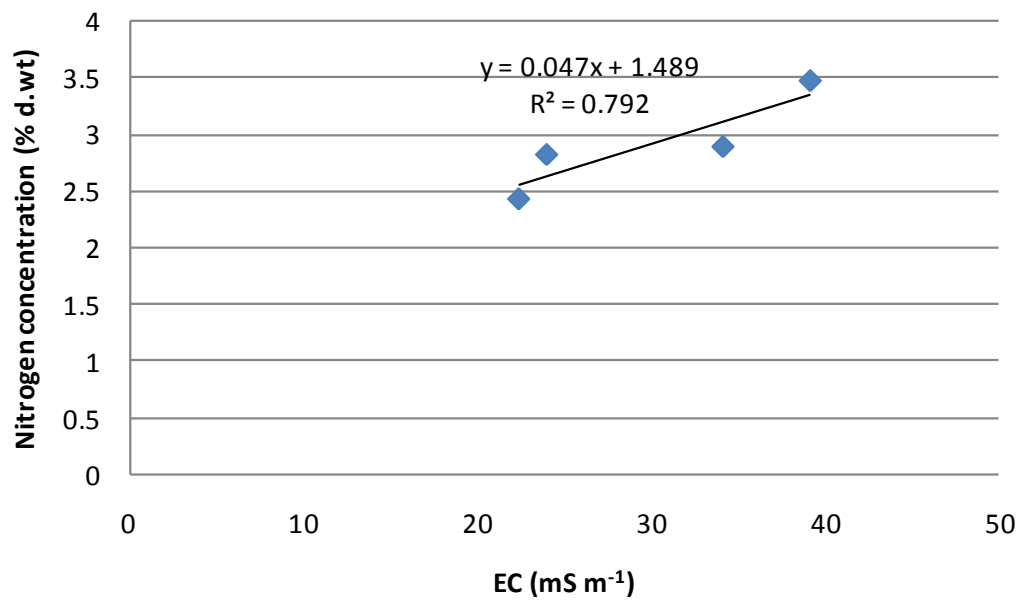


Fig.2-5 植物体中の全窒素含有率と栽培跡地黒ボク土壌の EC 値との関係

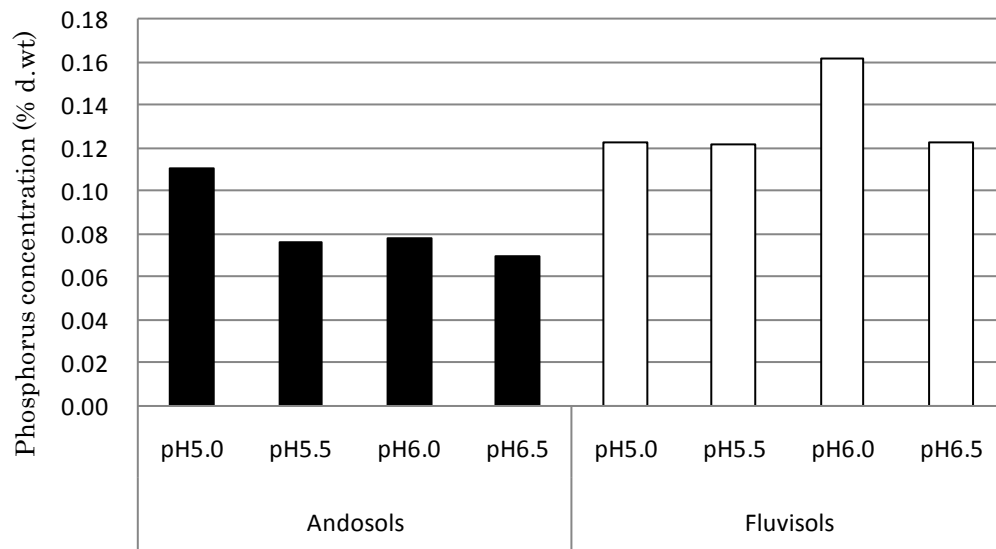


Fig.2-6 The percentage concentrations of phosphorus in the plants (n=2).

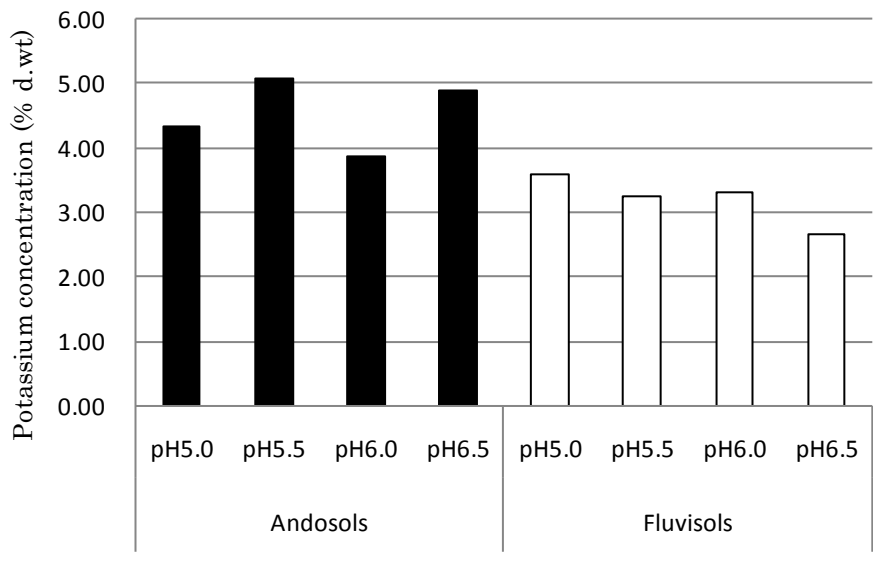


Fig.2-7 The percentage concentrations of potassium in the plants (n=2).

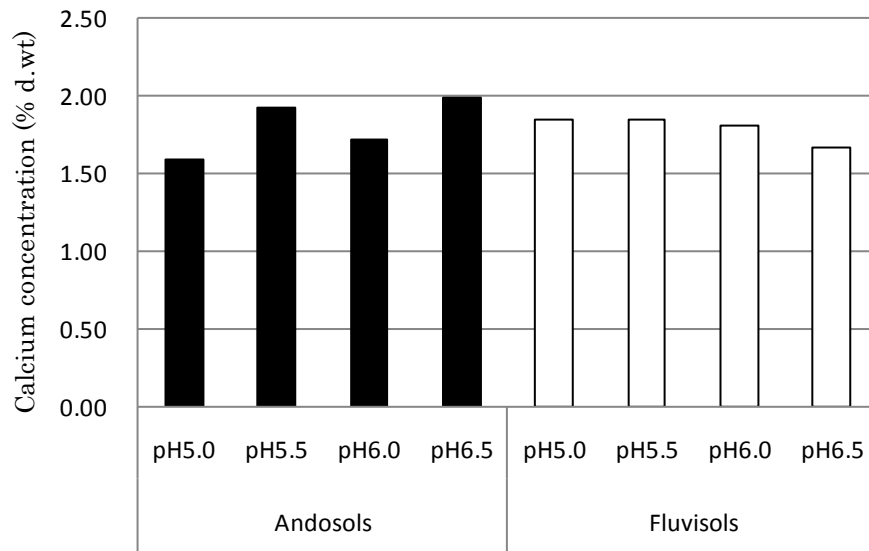


Fig.2-8 The percentage concentrations of calcium in the plants (n=2).

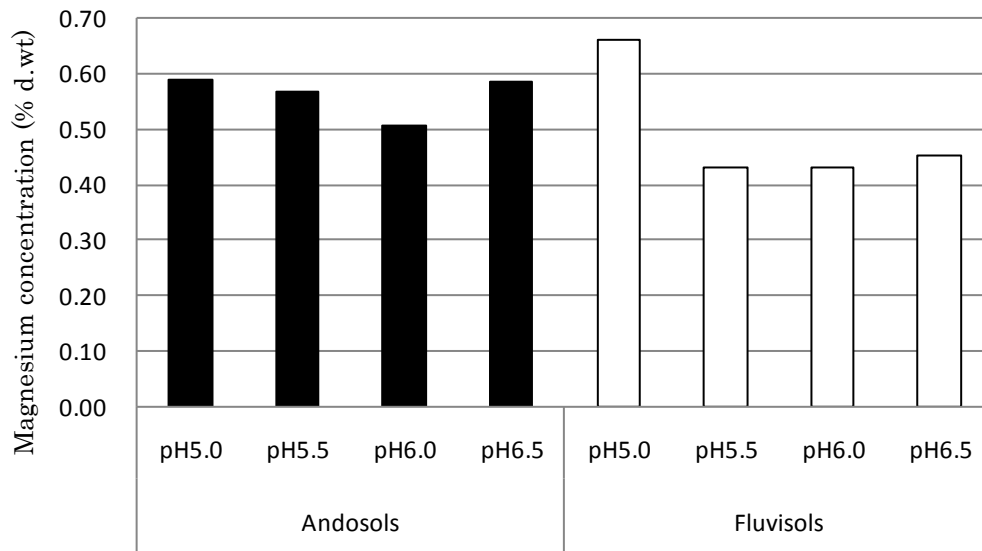


Fig.2-9 The percentage concentrations of magnesium in the plants (n=2).

第 3 章 土耕栽培における粘土鉱物の荷電特性が大玉トマトの各種呈味成分に及ぼす影響

1. 緒言

第 2 章では、養分吸収に着目し研究を行った。変異荷電を有する黒ボク土壌では、土壌の pH を変化させることで、養分吸収に変化がみられることがわかった。即ち、陽荷電を発現している土壌で栽培したトマトの窒素含有率は高かった。一方、陰荷電を多く発現している土壌で栽培したトマトの陽イオンの含有率が高かった。

本章では、本研究では大玉トマトを用いて、土壌の荷電を変化させ栽培し、果実の収量および呈味成分について検討した。

2. 実験方法

2.1 栽培概要および試験区設定

供試植物は大玉トマト（桃太郎グラnde：タキイ種苗株式会社）を用い、2011年8月26日に播種した。10月4日に各土壌とパーライトを1:1で充填した1/5000aワグネルポットに定植した。第1段果房肥大期に土壌pHを調整した（Table3-1）。2012年2月14日に栽培を終了した。土壌試料は南関東の立川ローム層（非晶質粘土鉱物）と静岡県磐田市の沖積土（結晶質粘土鉱物）を用い

た。培養液は園試処方 1/2 単位 (EC1.2mS/m) を 1 ポット当たり適宜 1L ずつ施用した。

2.2 果実呈味分析

果実の呈味成分分析は第 1 段果房と第 2 段果房の果実について行った。収穫した果実を 4 等分し、1 つを屈折率計 (N-1E:株式会社アタゴ) を用いて、糖度を測定した。酸度については、残りの 2 つをミキサーで 10 倍量の水を用いて破碎してろ過した (No.5A 110mm: ADVANTEC)。ろ液を水酸化ナトリウム溶液によって中和滴定法を用いて測定し、クエン酸含有量に換算した。グルタミン酸については、上述のろ液について、アグロチェックグルタミン酸テスト (Cat.No.01874-96:関東化学株式会社) と RQ-flex Plus (MERCK 社製) を用いて測定した。プロリンについては、残りの 1 つをミキサーで 3% スルホサリチル酸を用いて、破碎してろ過した。ろ液について、ニンヒドリンで発色させ比色計 (AE-350-M: エルマ販売株式会社) を用いて測定した (満田, 1961)。

3. 結果および考察

果実の総収量（第 1 段果房と第 2 段果房）を Fig.3-1 に示した。黒ボク土壌では pH6.0 付近で高い傾向を示し、酸性側では低くなる傾向を示した。沖積土ではアルカリ性側で高い傾向を示した。

果実の糖度を Fig.3-2 に示した。黒ボク土壌ではどの試験区間も 7.0 Brix%を示し、差はみられなかった。また、第 1 段果房および第 2 段果房について差はみられなかった。沖積土も同様に試験区間で差はみられなかった。黒ボク土壌と沖積土を比較すると、沖積土の方が第 1 段果房と第 2 段果房で高い傾向を示した。これは、沖積土の方が黒ボク土壌よりも乾燥しやすいため、水分ストレスによって糖度が高くなったと考えられた。

果実の酸度を Fig.3-3 に示した。黒ボク土壌において第 1 段果房では、アルカリ性側でわずかに低い傾向を示した。第 2 段果房では、pH5.5 区と pH6.0 区で 0.55%と高い傾向を示した。沖積土では、酸性側から弱酸性になるにつれて減少するが、アルカリ性で増加した。また、pH6.5 区を除き第 1 段果房と第 2 段果房に違いはみられなかった。しかし、これらの結果について統計的な差は認められなかったことから、荷電特性の違いによる影響は明らかではなかった。

果実中のグルタミン酸含量を Fig.3-4 に示した。黒ボ

ク土壤において、第 1 段果房はアルカリ性側で高い傾向を示した。一方、第 2 段果房では酸性側で高い傾向を示した。沖積土では、アルカリ性側で高い傾向を示した。しかし、これらの結果について、統計的な有意差は認められなかったため、荷電特性の違いによる影響は明らかではなかった。

果実中のプロリン含量を Fig.3-5 に示した。黒ボク土壤において、第 1 段果房と第 2 段果房は酸性側とアルカリ性側で高い傾向を示した。沖積土においても、黒ボク土壤と同様な傾向を示した。また、統計的な有意差が認められなかったため、荷電特性の違いによる影響は明らかではなかった。

以上のことより、果実収量は黒ボク土壤と沖積土で共に酸性側で低い傾向を示した。このことから、収量は荷電特性に関係なく栽培環境に影響を受けると考えられる。即ち土壤 pH の違いによると示唆された。各種呈味成分については、統計的な有意差が認められなかったことから、荷電特性の影響は明らかではなかった。

4. 結論

荷電特性が異なる 2 種類の土壌を用い、様々な土壌 pH で大玉トマトを栽培し、土壌の荷電がトマト果実の呈味成分含量に与える影響について検討を行った。収量については、両土壌において酸性側で低く、アルカリ性側で高くなることから、荷電特性の違いよりも土壌 pH による影響を強く受けることが示唆された。酸度やアミノ酸含有量については、変異荷電特性を有する土壌および永久荷電特性を有する土壌で栽培したトマト果実において、統計的有意性は認められなかった。このことから、荷電特性による果実の呈味成分の含有量への影響は明かではなかった。

Table 3-1 Experimental plots.

No.	Soil	Treatment
1	Andosols	pH5.0
2		pH5.5
3		pH6.0
4		pH6.5
5	Fluvisols	pH5.0
6		pH5.5
7		pH6.0
8		pH6.5

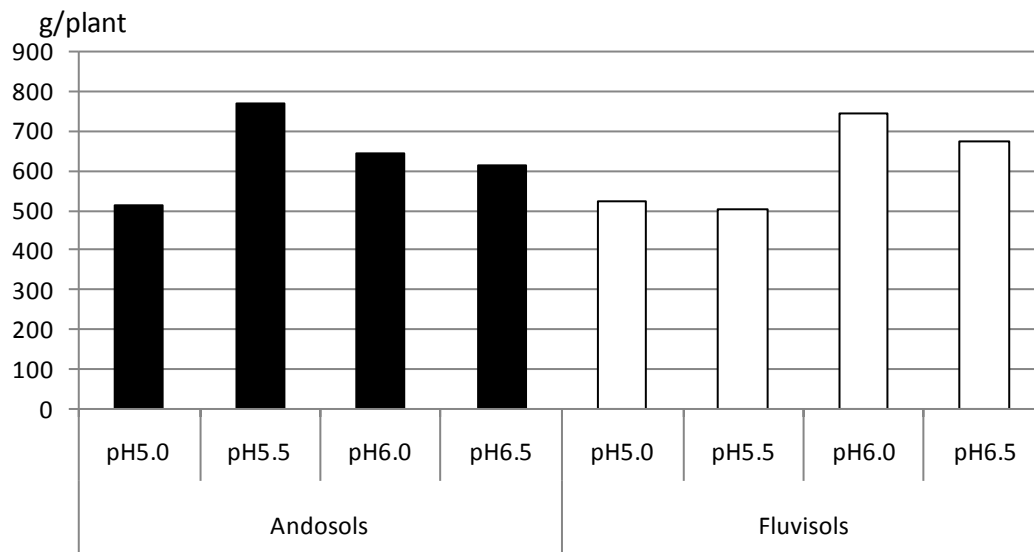


Fig.3-1 The fruit yield of tomato(n=2).

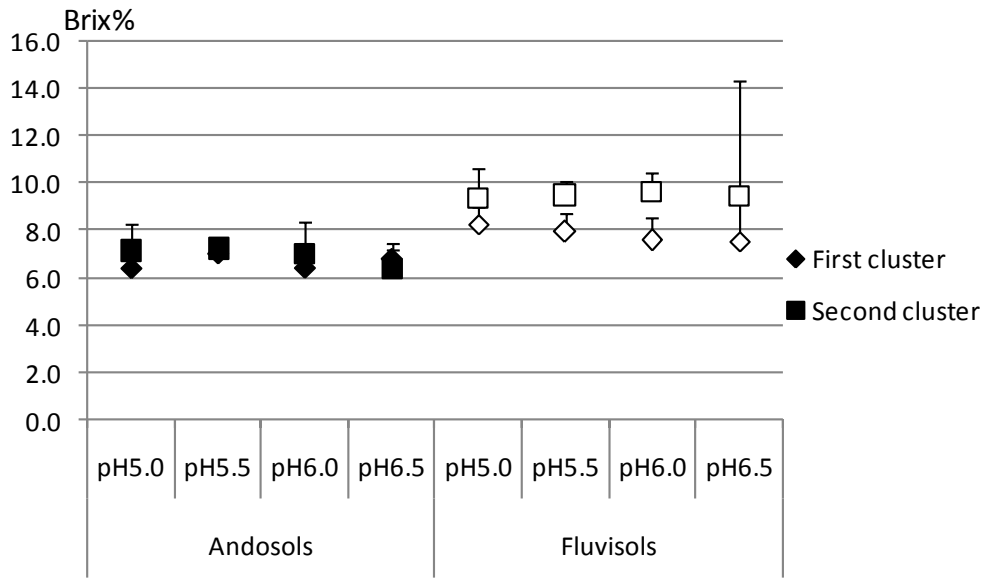


Fig.3-2 Brix value of tomato. Symbol (\pm) represents standard deviation (First cluster: $n=4$ (Andosols; pH 5.0, pH 6.0, pH 6.5, Fluvisols; pH 5.0, pH 5.5, pH 6.0), $n=5$ (Andosols; pH 5.5), $n=6$ (Fluvisols; pH 6.5). Second cluster: $n=3$ (Andosols; pH 5.5, pH 6.0, pH 6.5, Fluvisols; pH 5.0, pH 5.5, pH 6.5), $n=4$ (Andosols; pH 5.0, Fluvisols; pH 6.0)).

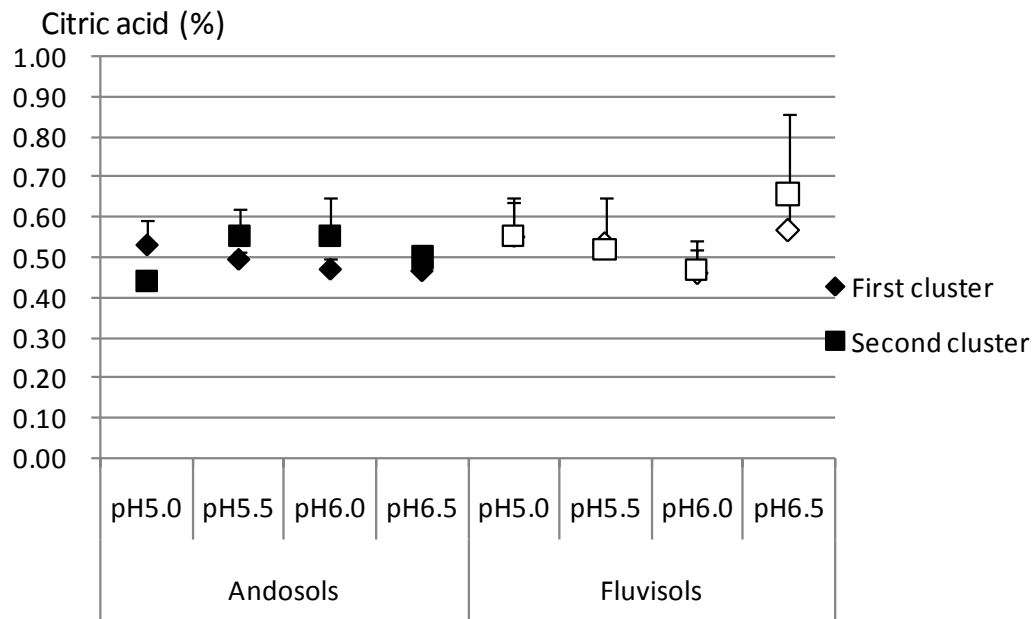


Fig. 3-3 The citric acid content of tomato. Symbol (\pm) represents standard deviation (First cluster: $n=4$ (Andosols; pH 5.0, pH 5.5, pH 6.0, pH 6.5, Fluvisols; pH 5.0, pH 5.5, pH 6.0), $n=5$ (Fluvisols; pH 6.5). Second cluster: $n=3$ (Andosols; pH 5.5, pH 6.0, pH 6.5, Fluvisols; pH 5.0, pH 5.5, pH 6.0, pH 6.5), $n=4$ (Andosols; pH 5.0)).

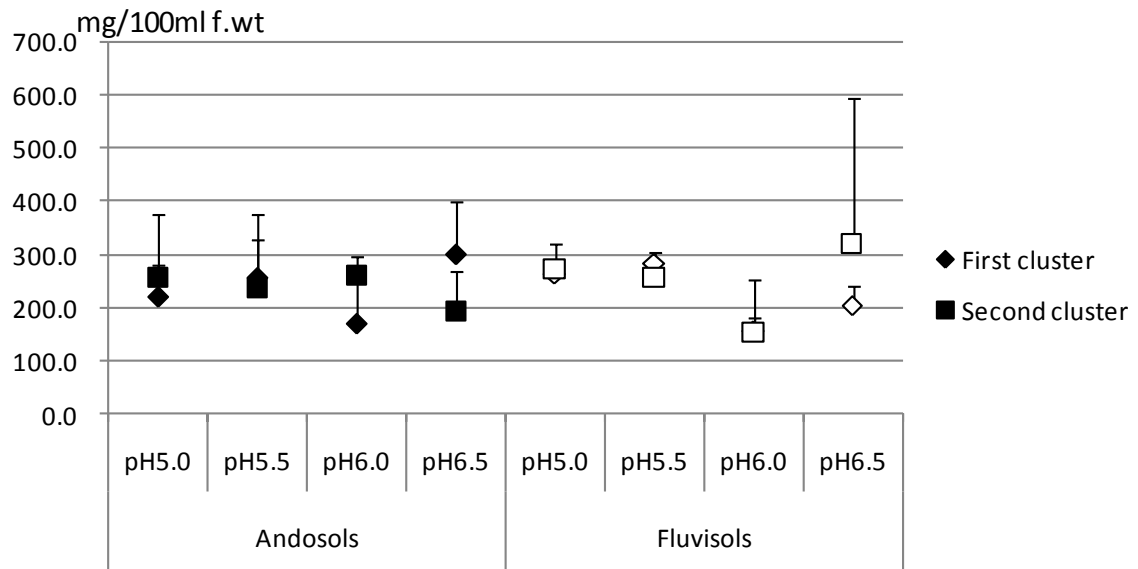


Fig.3-4 Glutamic acid content of tomato. Symbol (\pm) represents standard deviation (First cluster: $n=4$. Second cluster: $n=3$ (Andosols; pH 5.5, pH 6.0, pH 6.5, Fluvisols; pH 5.0, pH 5.5, pH 6.0, pH 6.5), $n=4$ (Andosols; pH 5.0)).

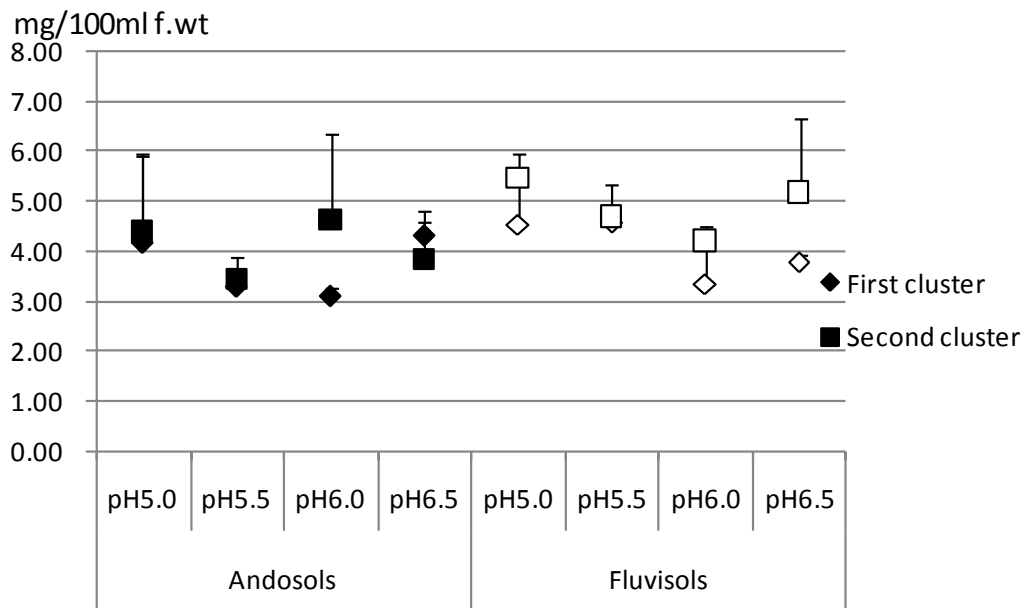


Fig.3-5 Proline content of tomato. Symbol (\pm) represents standard deviation (First cluster: $n=4$ (Andosols; pH5.0, pH5.5, pH6.0, pH6.5, Fluvisols; pH5.0, pH5.5, pH6.0), $n=5$ (Fluvisols; pH6.5). Second cluster: $n=3$ (Andosols; pH5.5, pH6.0, pH6.5, Fluvisols; pH5.0, pH5.5, pH6.0, pH6.5), $n=4$ (Andosols; pH5.0)).

第 4 章

水耕栽培における粘土鉱物の荷電特性が大玉トマトの養分吸収に及ぼす影響

1. 緒言

植物の栄養に関する実験的研究は 16 世紀から行われ、多くのことが明らかにされているが植物根との関係については、近年になってからである。即ち、植物の養分吸収については、第 1 段階として植物根の表面への養分吸着によって起こる（熊沢，1961）と考えられ、また、Jenny and Overstreet（1939）は、植物根が粘土粒子に接触すると根表面の水素イオンと、粘土粒子表面に吸着されている陽イオンが、溶液が存在しなくても直接的に置換されることによって、植物が養分を吸収しているという接触置換説をとらえている（Jenny and Overstreet, 1939）。

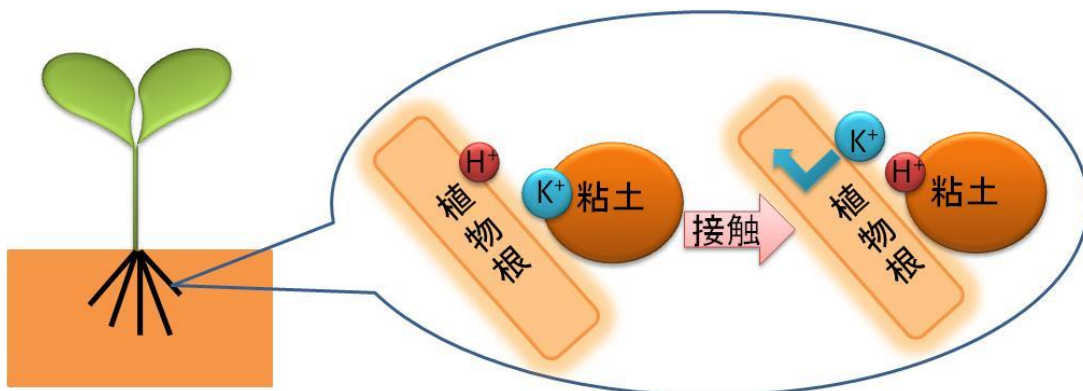


Fig.4-1 接触置換説のモデル

三井ら（1956）は水に難溶性の熔性苦土燐肥と三方原酸性土壌を用いてコムギを栽培した結果、作物根と粘土粒子が熔性苦土燐肥に近づくと、肥料粒子の表面のカルシウムやマグネシウムと作物根および粘土粒子の水素イオンが接触置換を起こすことで、リン酸イオンが溶解し、作物根がリン酸イオンを吸収できるという、接触溶解吸収現象が起こると想定している。

粘土鉱物には非晶質粘土鉱物のアロフェンと結晶質粘土鉱物がある。アロフェンの陽イオン交換基であるアルミノール基は変異荷電を示し、pHに依存し荷電が変化する特徴を持つ。また、このアルミノール基は弱酸的性質を持っている。弱酸的性質を持つ粘土鉱物は水素イオンに対して親和性が大きい特徴を持つため、陽イオン交換容量（CEC）は外液のpHや塩の濃度や種類による影響が強い（逸見，1985）。また、陽イオンの保持力が弱い特徴を持つ。結晶質粘土鉱物はシリカ4面体シートの4価のシリカが3価のアルミニウムに、アルミニウム8面体シートの3価のアルミニウムが2価のマグネシウムと置き換わることで陰荷電が生じる（松中，2003）。これらの陽イオン交換基は強酸的性質を示す。強酸的性質を持つ粘土鉱物は水素イオンを解離しやすい特徴を持ち、陽イオン交換容量は外液のpH、塩の濃度や種類の影響を受けにくい（逸見，1985）。また、陽イオンは粘土鉱物の層間に保持されるため、陽イオンの保持力が強い特徴を持つ。

一方、水耕栽培面積は栽培装置の自動化や機械化が進み年々増加している。我が国では循環式養液栽培システムが広く普及しているが、このシステムにおいても栽培途中で培養液の更新が行われている。廃液には多くの肥料成分が含まれるため、環境負荷が懸念される。しかし、水耕栽培について環境負荷の低減に関する研究は少ない（中野，2006；延安，2008）。培養液の肥料成分を多く植物に吸収させることができれば、廃液に含まれる肥料成分が少なくなり、環境負荷の低減に有用であると考えられる。

そこで本章では、荷電特性が異なる粘土鉱物をトマトの水耕栽培において培養液に分散させ、粘土による接触置換を積極的に誘発させることによって、植物の生育や養分吸収にどのような影響を与えるかについて検討したので、報告する。

2. 材料および実験方法

2.1 土壤中粘土画分の分離と結晶質粘土鉱物の定性

供試土壌は、非晶質粘土鉱物アロフェンを主とする立川ローム層の最表層を明治大学生田キャンパスで採取した（土屋・倉林，1958）。また、結晶質粘土鉱物を主とする土壌は静岡県磐田市の沖積土を用いた。粘土画分の分離方法は和田（2001）によった。即ち、各土壌試料を乳鉢を用いて、スラリー状にし、0.2mmの篩を用いて通過画分を回収した。回収した画分を0.1N-NaOHを用いてpHをpH10に調整し、粘土画分を分散させた。分散後、沈降法により粘土画分を分離回収した（以下、粘土画分溶液と略す）。沖積土の結晶質粘土鉱物は第2章で定性したバーミキュライト、クロライト、イライト、カオリナイトの4種が含まれている。

2.2 栽培概要および試験区

供試植物は大玉トマト（桃太郎ブランド：タキイ種苗株式会社）を用いた。2013年3月2日に、ガーゼ上に播種した。3月12日にスポンジに移植後、25穴セルトレイ（キャネロン加工株式会社）に充填し、水耕ベッド（全農製隔離ベンチ：65cm×65cm×水深30cm）に発泡スチロールを用いてセルトレイごと培養液に浮かせ、仮植した。4月17日に水耕ベッドに発泡スチロールを用いて定

植し、実験を開始した。5月15日に第3段果房の上位2葉を残し、摘心し、7月14日に栽培を終了した。培養液については、播種から定植までは、大塚1号、2号を用いて、園試処方1/2単位(EC: 1.2 dS/m、NO₃-N: 8 me/l、P: 2 me/l、K: 4 me/l、Ca: 4 me/l、Mg: 2 me/l)に調整し、施用した。定植後から栽培終了までは適宜培養液(園試処方1/2単位(EC 1.2 dS/m))を20L追加し、約1カ月ごとに培養液をすべて更新した。更新の際には、粘土画分溶液を再添加した。培養液中の粘土の分散状態を保つために、水耕ベッド内にバスポンプ(NBP-10: 株式会社仲佐)を設置し、7時~19時までは1時間おきに15分間、19時~翌日7時までは2時間おきに15分間運転し培養液を循環させた。一部沈降した粘土は適宜素手で攪拌し分散状態とした。また、培養液の追加や更新時に、水耕ベッド内の培養液量を調査した。各花房に4-CPA(トマトトーン、150倍希釈)液を噴霧し、摘果せずに栽培した。供試株数は1区あたり4株とし、2反復した。

試験区は培養液濃度と粘土画分溶液の添加の有無について3通り設けた。即ち、1) 標準栄養粘土無添加区: 園試処方1/2単位に粘土画分溶液を添加しない区(No 1: 以下、無添加区と略す)、2) 結晶質粘土鉱物添加区: 園試処方1/2単位に結晶質粘土鉱物を主とする粘土画分溶液を添加した区(No 2: 以下、結晶質区と略す)、3) 非晶質粘土鉱物添加区: 園試処方1/2単位に非晶質粘土鉱

物を主とする粘土画分溶液を添加した区（No 3：以下、非晶質区と略す）である。粘土鉱物の添加量は培養液 45L に対して、結晶質区（No 2）で約 8g、非晶質区（No 3）で約 4g とした。結晶質粘土鉱物の添加量が非晶質粘土鉱物の添加量の 2 倍量であるのは、陽イオン交換容量（CEC）が結晶質粘土鉱物を主とする土壤では非晶質粘土鉱物を主とする土壤の半分の値であるからである（Nakabayashi et al., 2013）。

2.3 生育調査および化学分析方法

2.3.1 生育調査

栽培終了後の植物体の、生重量、草丈および第 3 段果房直下葉の葉長、葉幅、先端葉の葉色（SPAD-502：ミノルタ株式会社）をそれぞれ測定した。水分含有率は第 3 段果房直下葉を 70℃ で通風乾燥後、乾物重を測定し、算出した。

2.3.2 茎葉の分析

乾燥体の無機成分分析は 70℃ で通風乾燥し、水分率を測定後、粉末状にし、硫酸一過酸化水素で湿式分解を行った（植物栄養実験法編集委員会，2001）。分解液中の全窒素を塩入奥田式水蒸気蒸留法で、リンをバナドモリブデン酸比色法（AE-200：エルマ販売株式会社）で、K、Ca、Mg は原子吸光光度法（AA-625-11：(株)島津製作所）で測

定した（保田・長谷川，1976）。結果は、植物体の生重量および水分含有率と無機成分含有率から、一株あたりの吸収量（g/plant）を算出した。

2.3.3 果実の無機成分分析

果実の成分分析は1果房につき1～2個を用いて行った。供試果実を4等分し、その1つをビーカーに入れ、105℃で乾燥し、水分率を算出した（石塚ら，2000）。乾燥体を茎葉分析と同様の方法で分解し、無機分析を行った。結果は、各果房の果実の収穫量および各果房の果実中の水分含有率および果実中の無機成分含有率から、一株あたりの全果実の無機成分吸収量（g/plant）をそれぞれ算出した。

2.3.4 培養液の成分分析

培養液の成分分析は定植後から栽培終了時まで、培養液の追加時もしくは更新時に培養液量を調査した後、約100ml採取しpH、EC、NO₃-N、P、K、Ca、Mgについて測定した。pHとECについては、pHはガラス電極法（D51：㈱堀場製作所）、ECは導電率計（ES-51：㈱堀場製作所）で測定した。NO₃-Nはリフレクトクアント試験紙（硝酸イオンテスト：関東化学株式会社）と簡易比色計（RQflex：MERCK社製）で定量した。リンはバナドモリブデン酸比色法（AE-200：エルマ販売株式会社）で、

K、Ca、Mg は原子吸光光度法（AA-625-11：株島津製作所）で測定した。結果は、各無機成分のみかけの成分吸収速度および、みかけの成分吸収濃度（n/w）を以下の式から算出した（山崎ら，1976；石原ら，2007）。

(1) みかけの吸水量（L/plant）

=（前回の培養液残存量+給液量）- 今回の培養液残存量

(2) みかけの吸水速度（L/plant/day）

=（1）/前回の培養液採取日から今回の採取日までの日数

(3) みかけの成分吸収量（me/plant）

=前回時の培養液追加後の成分量（前回の培養液残存量×残存培養液濃度+給液量×給液培養液濃度）- 残存成分量

（今回の残存培養液量×残存培養液濃度）

(4) みかけの成分吸収速度（me/plant/day）

=（3）/前回の培養液採取日から今回の採取日までの日数

(5) みかけの成分吸収濃度 n/w（me/l）

=（4）/（2）

即ち、みかけの成分吸収速度は1日あたりの成分吸収量を示し、みかけの成分吸収濃度（n/w）は培養液1Lあたりの吸収濃度を示している。

3. 結果および考察

3.1 トマトの生育

栽培終了時の生育結果を Table 4-1 に示した。粘土画分溶液を添加した区 (No 2、No 3) では草丈、葉長、葉幅、SPAD で有意ではないが無添加区 (No 1) よりも高い傾向にあった。また、統計学的には有意差は認められなかったが、非晶質区 (No 3) と結晶質区 (No 2) では、生重、草丈、葉幅の項目でそれぞれ、715 g と 657 g、110 cm と 106 cm、68.6 cm と 63.4 cm と非晶質区 (No 3) で高い傾向にあった。これは、非晶質粘土鉱物と結晶質粘土鉱物の CEC や陽イオン固定能および荷電性質の違いによるためと推測された。本研究では、Nakabayashi et al. (2013) の土壌の CEC から粘土鉱物の添加量を結晶質区 (No 2) は非晶質区 (No 3) の 2 倍量と設定したが、非晶質粘土鉱物であるアロフェンと結晶質粘土鉱物のカオリナイト、イライト、クロライト、バーミキュライトの粘土鉱物単体の CEC は、それぞれ、15~40 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 、3~15 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 、10~40 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 、10~40 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ 、100~150 $\text{cmol}_c\text{kg}^{-1}$ であり、アロフェンはバーミキュライトに次いで高い (吉永, 1985)。結晶質区 (No 2) はバーミキュライト、イライト、クロライト、カオリナイトを含み、粘土鉱物種で各元素の吸着量や接触置換の強弱が異なる可能性が考えられるため、生育が非晶質区 (No 3) よりも劣る傾向がみられたと推察した。

3.2 植物体の無機成分分析結果

植物体の水分含有率と無機成分含有量を Table 4-2 に示した。水分含有率は粘土画分溶液を添加した区 (No 2、No 3) で 93%以上を示したが、試験区間に差はみられなかった。無機成分含有量については、非晶質区 (No 3) では、K と Ca で有意ではないが、無添加区 (No 1) よりも高い傾向にあった。特に K の含有量が高い傾向にあった。これは、陽イオン交換基が弱酸的性質をもつ非晶質粘土鉱物を添加することによって、粘土に吸着した K と Ca が根との接触によって根表面において濃度が高まり、根から吸収されたと推察した。また、1 価の K の方が 2 価の Ca に比べて吸着力が弱いため、接触置換によって効率的に根表面の濃度が高まり、吸収を促進したと推察した。

3.3 果実の無機成分分析結果

果実の収穫量と水分率および無機成分含有量を Table 4-3 に示した。収穫量については、有意ではないが、非晶質区 (No 3) で 1200g 以上であり、無添加区 (No 1) と結晶質区 (No 2) より高い傾向を示した。水分含有率については、すべての試験区で 95%とあまり差はみられなかった。無機成分含有量については、統計的に有意差はみられなかったが、各成分とも粘土画分添加区 (No 2、No 3) 高い傾向にあった。また、結晶質区 (No 2) と非晶質区 (No 3) についてみると、非晶質区 (No 3) で高

い傾向にあった。これは、植物体の無機成分と同様に非晶質粘土鉱物アロフェンと植物根との接触置換によって養分の吸収がより多かったためと推察される。

3.5 培養液中の無機成分

培養液の EC、pH の推移を Fig.4-2 および Fig.4-3 に示した。EC については、無添加区 (No 1) と非晶質区 (No 3) は 5 月 6 日から 5 月 24 日まで減少傾向を示し、5 月 24 日以降は上昇傾向と同様な推移を示した。また、無添加区 (No 1) よりも粘土画分溶液添加区 (No 2、No 3) の方が僅かに低い推移を示した。また、非晶質区 (No 3) は結晶質区 (No 2) よりも低い推移を示した。これは、アロフェンの陽荷電に硝酸イオン等が吸着しているためであると考えられた。pH については、すべての試験区で同様の推移を示した。無添加区 (No 1) で pH6.6~pH7.4、粘土画分溶液添加区 (No 2、No 3) で pH6.7~pH7.6 と無添加区が最も低い推移を示した。また、非晶質区 (No 3) でわずかに推移が高かったのは、弱酸性的性質によって、水素イオンを保持しやすかったためと考えられる。

みかけの成分吸収速度の推移を Fig.4-4a~Fig.4-4e に示した。全ての試験区において NO₃-N、P、K、Ca のみかけの成分吸収速度は同様の推移を示した。トマトの成分吸収速度は果実収穫開始期に低下し、その後、新根が発生し吸収が増加したことが報告されている (近藤,

1967)。本研究において、収穫開始期（第1段果房）が6月下旬で最も低下し、その後上昇したのはこの報告と一致する。また無添加区（No 1）、結晶質区（No 2）、非晶質区（No 3）を比較すると、非晶質区（No 3）において、5月下旬から栽培終了時まで $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 K 、 Ca みかけの成分吸収速度が速く、より多くの無機成分を吸収していると考えられる。 Mg については、非晶質区（No 3）では、5月下旬から6月中旬のみかけの成分吸収速度が無添加区（No 1）、結晶質区（No 2）よりも2倍以上も速かった。

次に、みかけの成分吸収濃度（ n/w ）の推移を Fig.4-5a～Fig.4-5e に示した。 $\text{NO}_3\text{-N}$ について、全ての試験区で同様の推移を示した。また無添加区（No 1）、結晶質区（No 2）、非晶質区（No 3）を比較すると、5月下旬から栽培終了時まで、非晶質区（No 3）、結晶質区（No 2）、無添加区（No 1）の順に推移が高かった（Fig.4-5a）。 P については、無添加区（No 1）、結晶質区（No 2）、非晶質区（No 3）を比較すると、結晶質区（No 2）では5月下旬と6月中旬に高い値を示したが、他の時期においてはあまり違いがみられなかった。また非晶質区（No 3）では無添加区（No 1）よりも、わずかに低い推移を示した（Fig.4-5b）。 K については、無添加区（No 1）、結晶質区（No 2）、非晶質区（No 3）を比較すると、結晶質区（No 2）と非晶質区（No 3）において、5月下旬と6月中旬に

無添加区 (No 1) よりも高い値を示した (Fig.4-5c)。Ca については、結晶質区 (No 2) と非晶質区 (No 3) において、6月中旬に無添加区より2倍以上高い値を示した (Fig.4-5d)。Mgについては、結晶質区 (No 2) では、5月下旬と6月中旬に無添加区 (No 1) より高かった。また、非晶質区 (No 3) では5月下旬から6月初旬まで無添加区 (No 1) よりも2倍以上高い値を示した (Fig.4-5e)。

このように、粘土画分を添加することで、みかけの成分吸収速度および成分吸収濃度 (n/w) に違いがみられた。特に非晶質区 (No 3) において、みかけの成分吸収速度および成分吸収濃度 (n/w) が5月下旬から高く推移した。トマトの成分吸収濃度 (n/w) は初期生育期で高く、果実肥大期に低下することが報告されている (近藤, 1967)。本研究では果実肥大期 (第1段果房) にあたる5月下旬から、粘土画分の添加の影響がみられ、粘土鉱物と植物根との接触置換によって、根表面の陽イオン濃度が高まったため、根が多く養分を吸収でき、みかけの成分吸収速度および成分吸収濃度 (n/w) が高く推移したと推察した。また、Terabayashi et al. (2004) では、3段摘心のトマトの水耕栽培において、開花期後の養分吸収速度と果実生産量との関係を検討し、第1段花房開花期から第3段花房収穫期の $\text{NO}_3\text{-N}$ 、P、Kの成分吸収速度がそれぞれ $50 \text{ me/plant/week} \sim 55 \text{ me/plant/week}$ 、 $15 \text{ me/plant/week} \sim 20 \text{ me/plant/week}$ 、 35 me/plant/week

～40 me/plant/week で最も収量が良かったと報告している。また、Ishihara et al. (2007) においても、同様な結果を得ている。そこで、本実験において、5月中旬から7月初旬までの無添加区 (No 1) と結晶質区 (No 2) と非晶質区 (No 3) のみかけの成分吸収速度の平均値を週あたりに換算した。NO₃-Nについては、無添加区 (No 1)、結晶質区 (No 2)、非晶質区 (No 3) で、それぞれ、35.5 me/plant/week、34.6 me/plant/week、37.6 me/plant/week であった。Pについては、無添加区 (No 1)、結晶質区 (No 2)、非晶質区 (No 3) で、それぞれ、10.1 me/plant/week、9.7 me/plant/week、10.0 me/plant/week であった。Kについては、無添加区 (No 1)、結晶質区 (No 2)、非晶質区 (No 3) で、それぞれ、19.2 me/plant/week、19.4 me/plant/week、20.6 me/plant/week であった。このことから、非晶質区 (No 3) において、他の区よりも3元素とも成分吸収速度がわずかに高く維持されたことにより、統計学的には有意差はみられなかったが収量および無機成分含有量が多いといった傾向が示唆されたと考えられる。

4. 結論

トマトの水耕栽培において、培養液に土壌から分離した粘土画分を添加することによって、トマトの生育および無機成分の吸収に与える影響を検討した。結果、非晶質区（No 3）で生育や無機成分の吸収が多い傾向が示唆された。また、培養液分析においても、非晶質区（No 3）では5月下旬の果実肥大期以降から成分吸収速度や成分濃度が高く推移していたため、より多くの無機成分を吸収することができ、果実収量が多かった傾向が示唆されたと考えられた。これは、アロフェンのイオン交換基は粘土鉱物の表面にあり、陽荷電および陰荷電を発現し、かつイオン交換基の酸的性質は弱酸的で構成され、植物の必須多量元素の吸着力が弱いためと考えられた。また、アロフェンのCECは本研究で添加した結晶質粘土鉱物（バーミキュライトを除く）より高い割合を示し、多くの無機元素が吸着される。そして、アロフェンに多く吸着された無機元素は、吸着力が弱いため、植物根との接触によって容易に植物根の表面のイオン濃度が高まったため、植物の養分吸収が促進したと推測された。

しかし、本実験において、粘土画分添加によって、統計的な収量増加などといった結果を得られなかった。これは、粘土添加量が少なかったためと考えられる。粘土添加量を多くすることで、植物根との接触を多くさせ効

率よく植物に養分を吸収させることができると考えられる。しかし、アロフェンのリンの特異吸着や(北岸, 1961)、バーミキュライトの層間による K^+ の吸着固定(吉永, 1985)により、生育不良が起こるかもしれない。よって、粘土鉱物の添加量の詳細な検討が今後必要である。また、土壌から抽出した粘土画分は1次鉱物や様々な粘土鉱物が含まれている。よって、粘土鉱物添加の影響を詳細に把握するためには、特定の粘土鉱物のみを抽出または合成し、実験を行うのが望ましいと考えられる。

以上のように、粘土画分を添加することによって、植物に有効な効果をもたらす可能性が示唆された。特に、非晶質粘土鉱物を添加することで培養液内の無機成分を多く吸収させられる可能性が示唆された。このことは、将来、低肥料下での栽培を可能とし、肥料コストの削減や廃液による環境負荷の低減などに有用であると思われる。

Table 4-1 The influence of clay hydroponics on tomato growth (n = 8).

No	Treatment	Fresh wight	Height	Leaf length	Leaf width	SPAD
		g/plant	cm/plant			
1	Control	672a	102a	51.3a	60.8a	29.1a
2	Crystalline clay	657a	106a	54.1a	63.4a	32.8a
3	Non-Crystalline clay	715a	110a	54.1a	68.6a	31.5a
LSD 0.05		127.0	7.1	5.67	8.55	8.73

Table 4-2 Clay hydroponic effects on the inorganic content of tomato plants (n = 8).

No	Treatment	Moisture	N	P	K	Ca	Mg
		Content%	g/plant				
1	Control	92.5a	1.22a	0.49a	1.60a	1.79a	0.52a
2	Crystalline clay	93.4a	1.03a	0.43a	1.76a	1.56a	0.44a
3	Non-Crystalline clay	93.1a	1.19a	0.44a	1.86a	1.89a	0.50a
	LSD 0.05	1.54	0.329	0.157	0.435	0.459	0.161

Table 4-3 Clay hydroponic effects on inorganic content of tomato fruit.

No	Treatment	Fruit weight g/plant	Moisture Content%	N	P	K	Ca	Mg
				g/plant				
1	Control	1003a	95.4a	1.48a	0.36a	2.28a	0.037a	0.11a
2	Crystalline clay	1019a	95.6a	1.47a	0.37a	2.35a	0.041a	0.11a
3	Non-Crystalline clay	1235a	95.6a	1.73a	0.42a	2.72a	0.048a	0.13a
	LSD 0.05	376.6	0.42	0.459	0.116	0.806	0.017	0.041

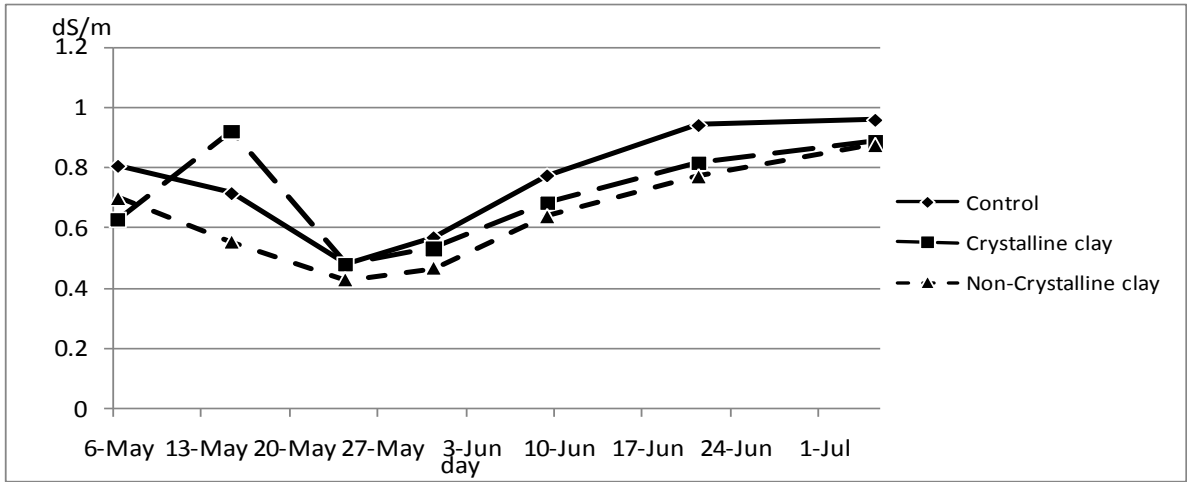


Fig.4-2 Changes in culture EC after the addition of clay mineral (from May 6 to July 5).

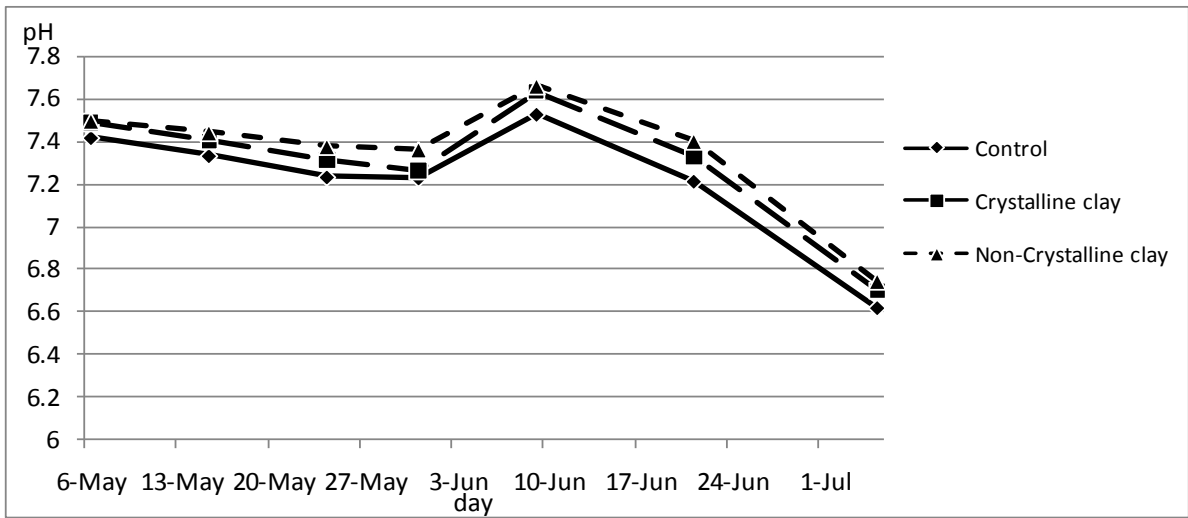


Fig. 4-3 Changes in culture pH after the addition of clay mineral (from May 6 to July 5).

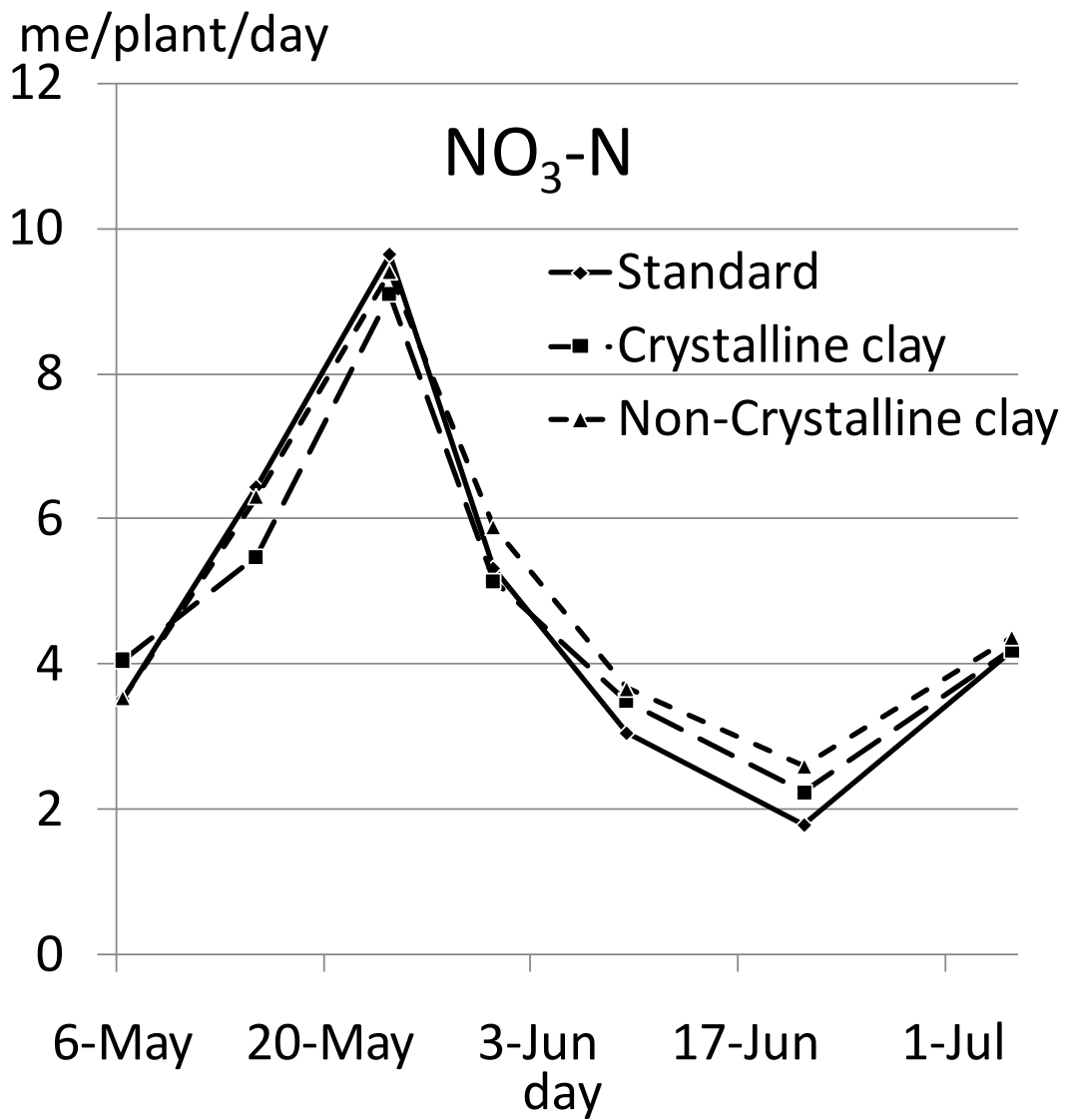


Fig. 4-4 a

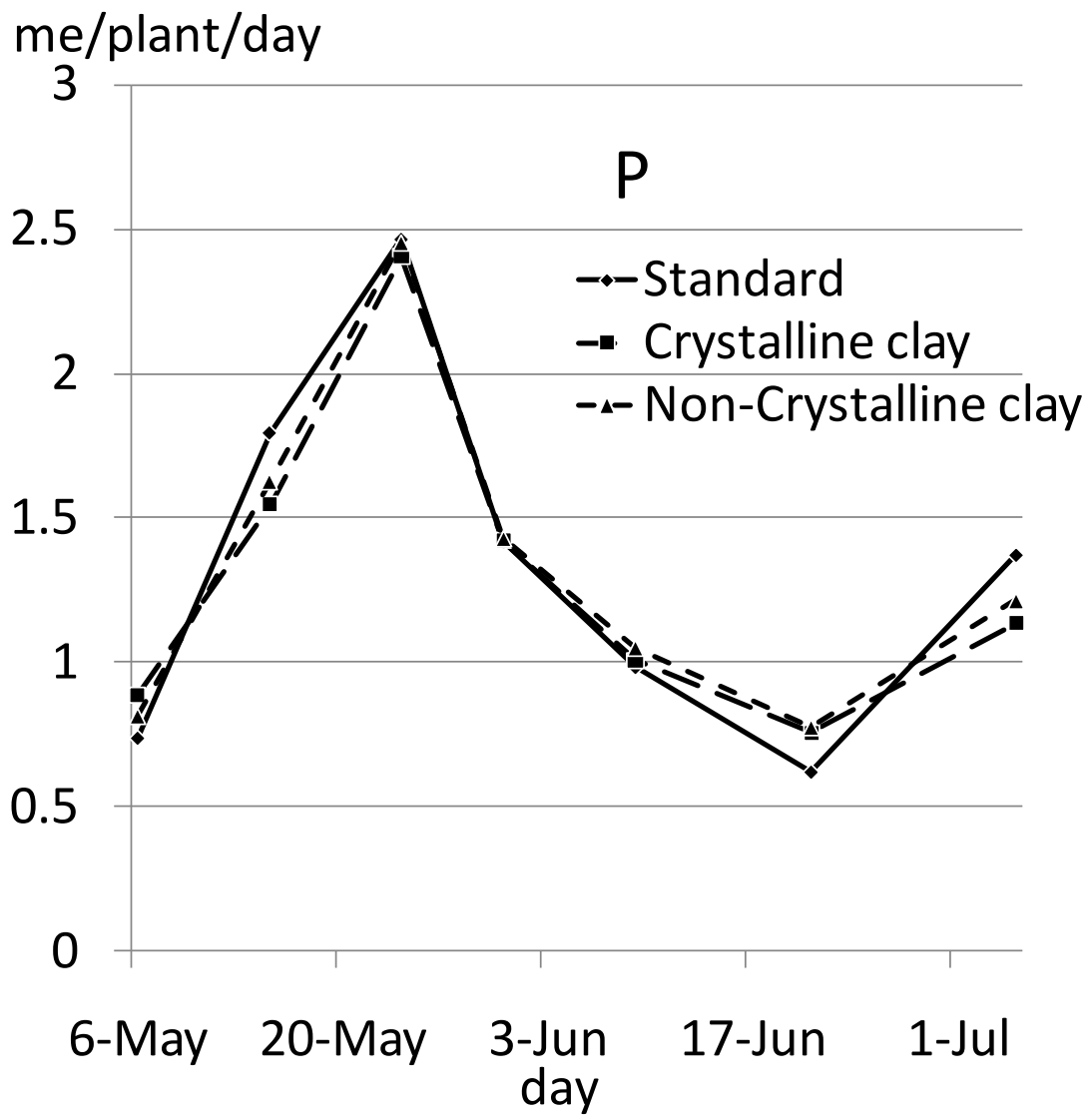


Fig. 4-4b

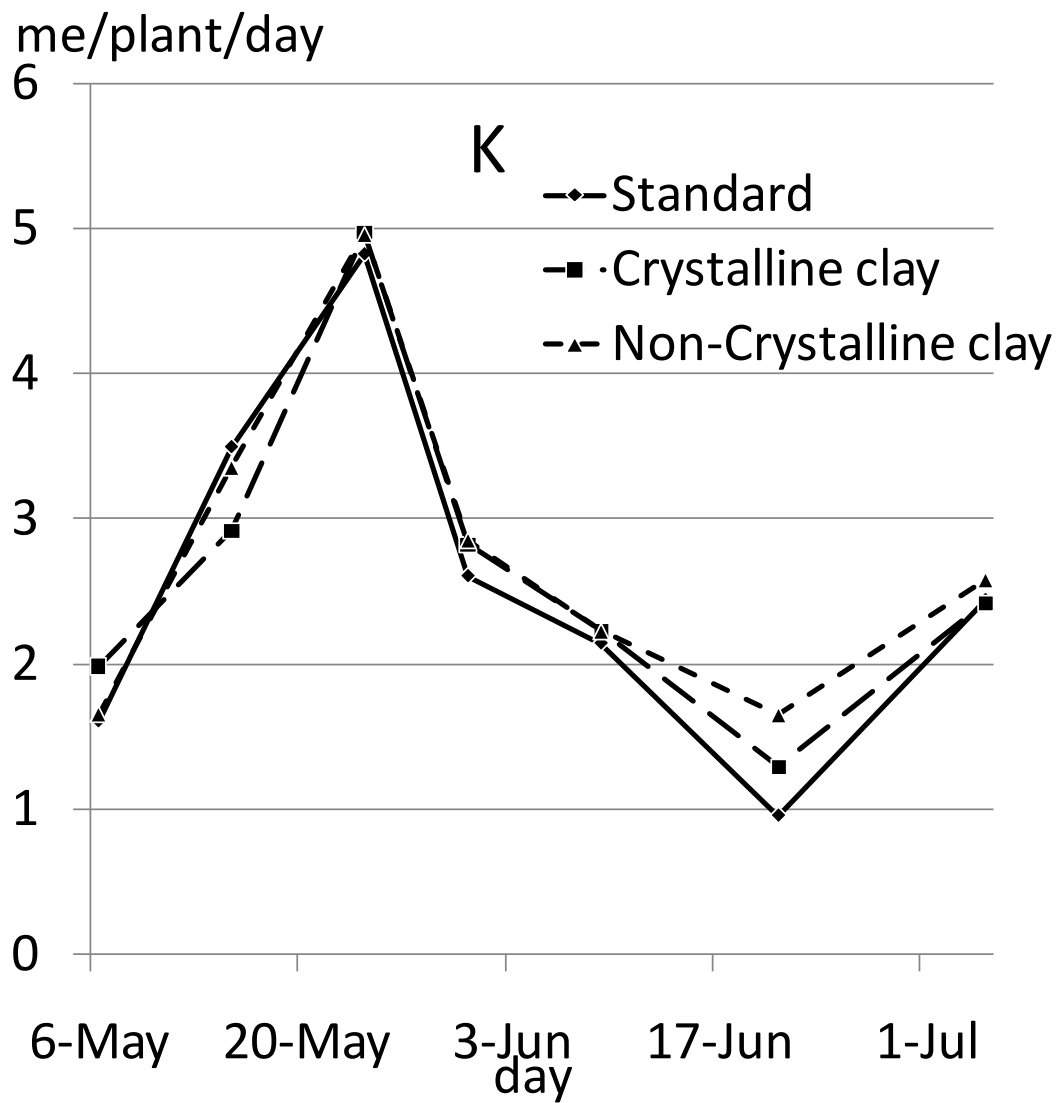


Fig. 4-4c

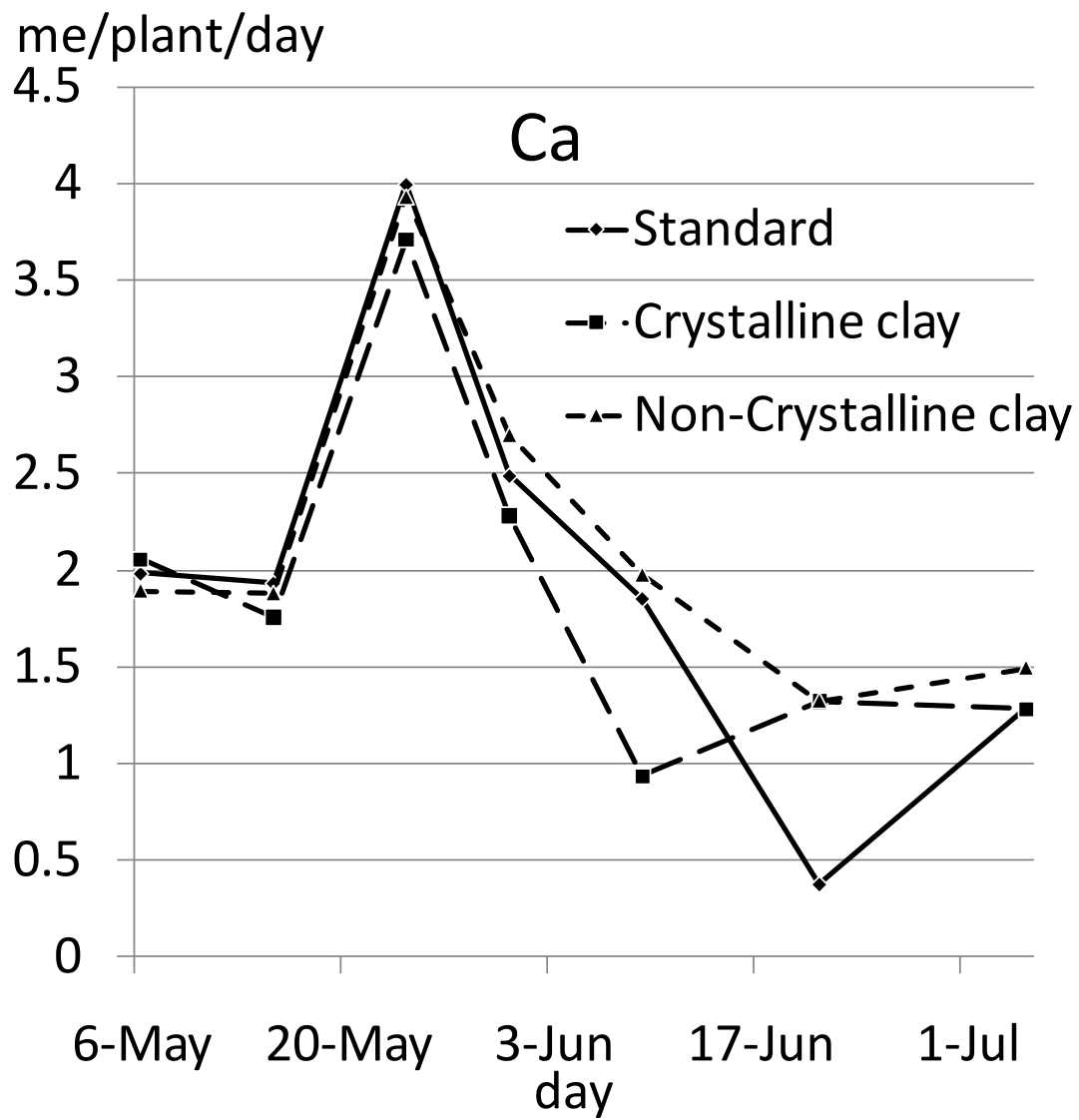


Fig. 4-4d

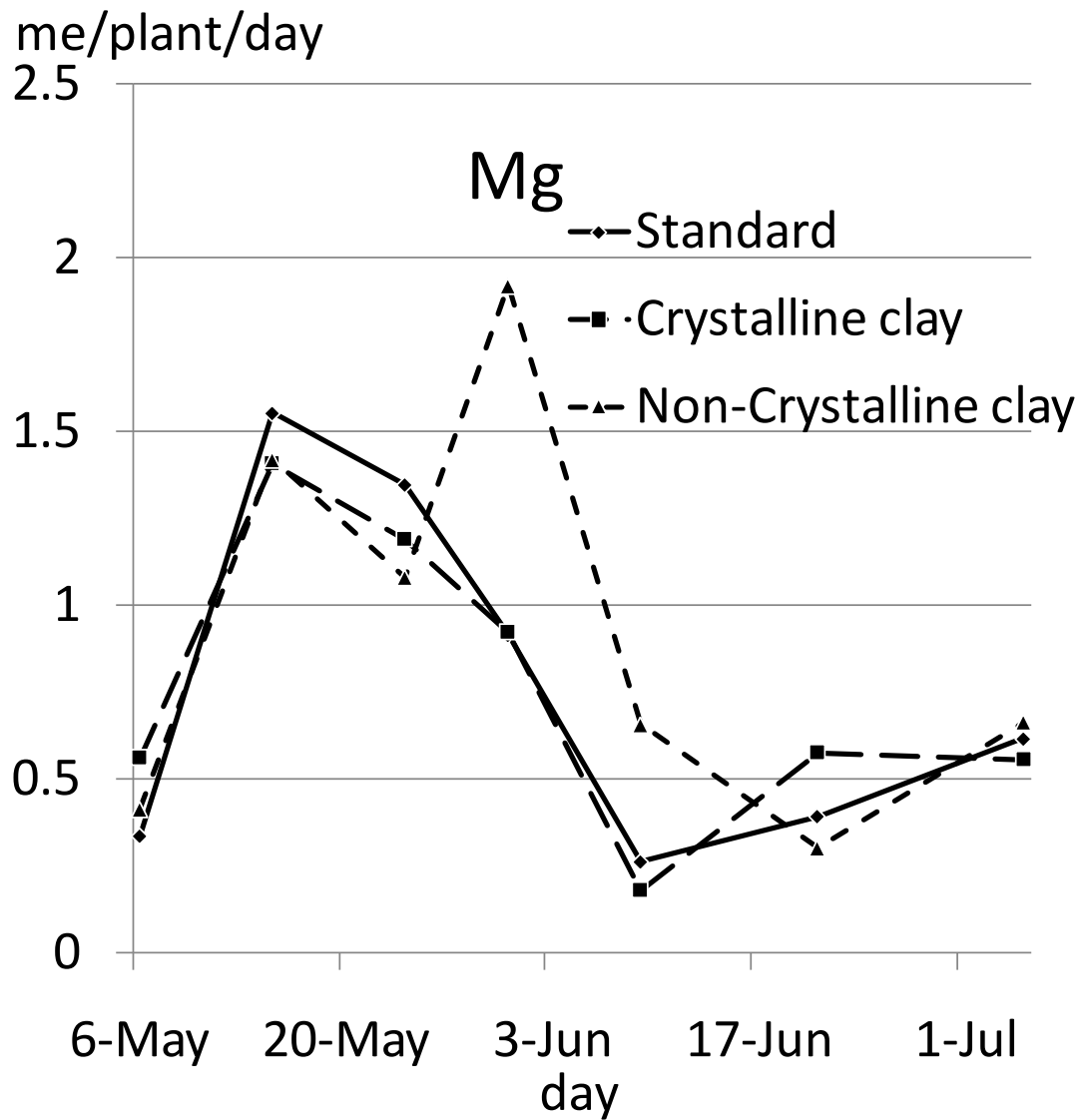


Fig. 4-4e

Fig. 4-4a-e Effects of clay mineral addition on nutrient uptake rate (from May 6 to July 5).

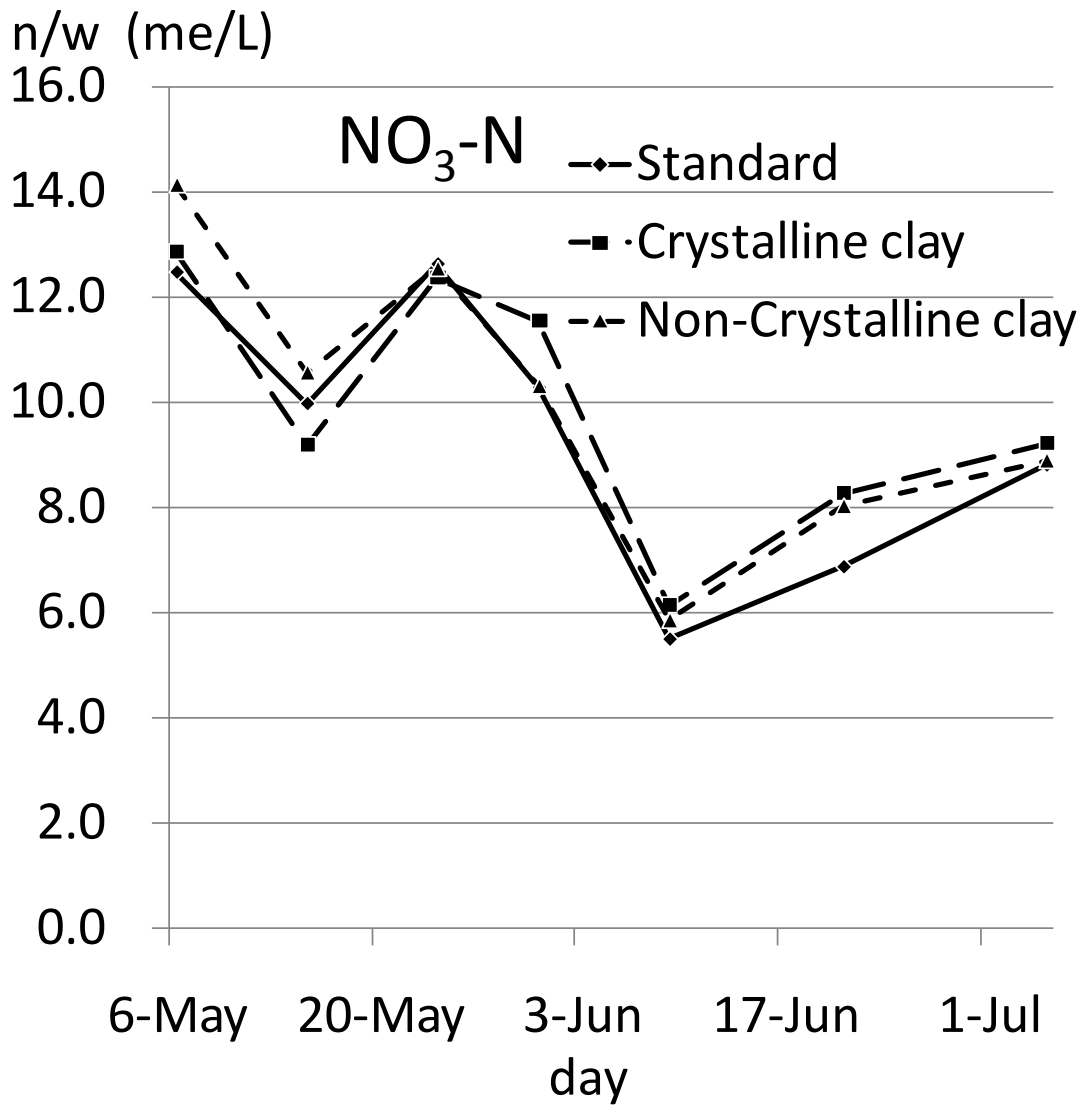


Fig. 4-5 a

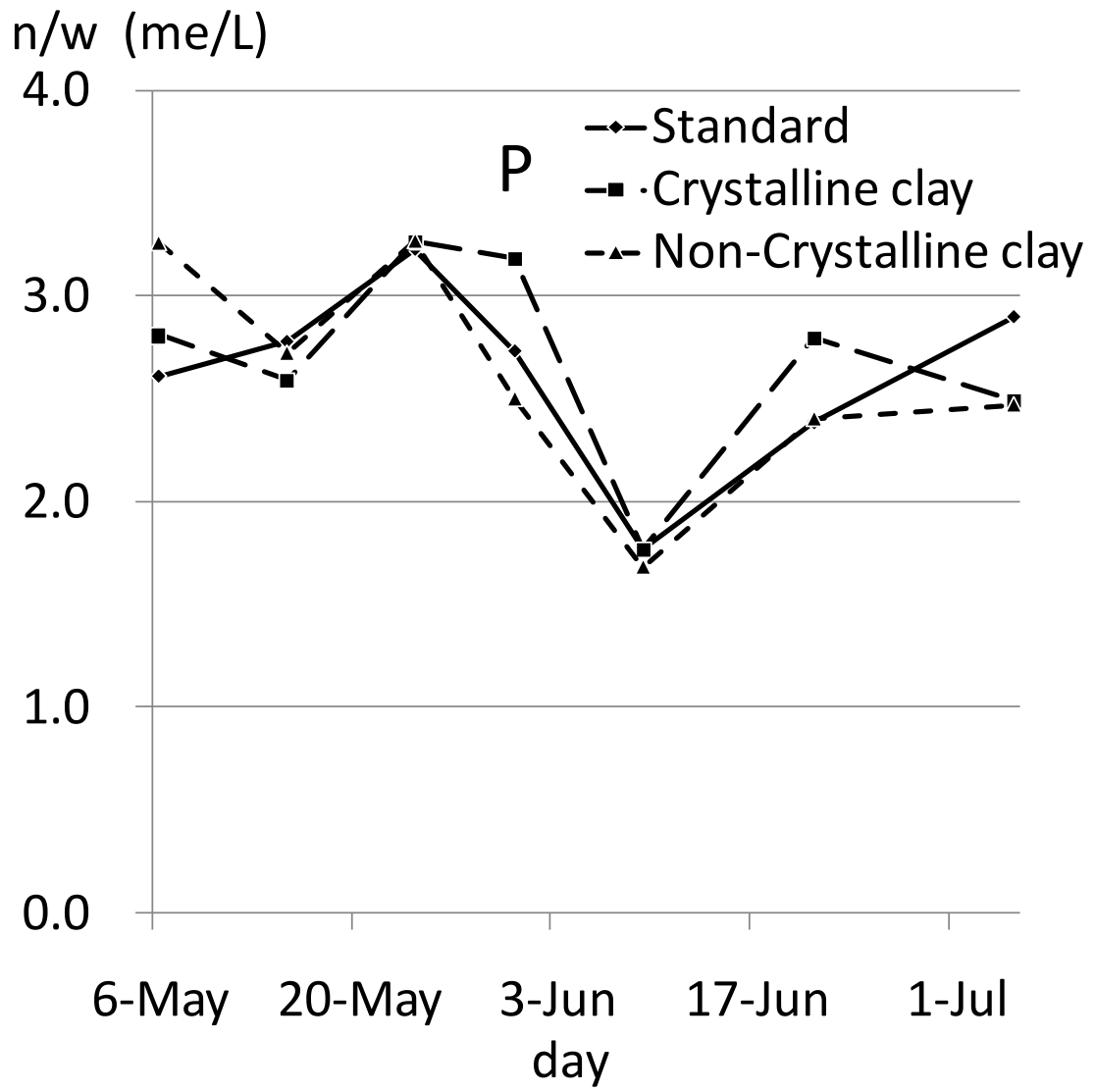


Fig. 4-5b

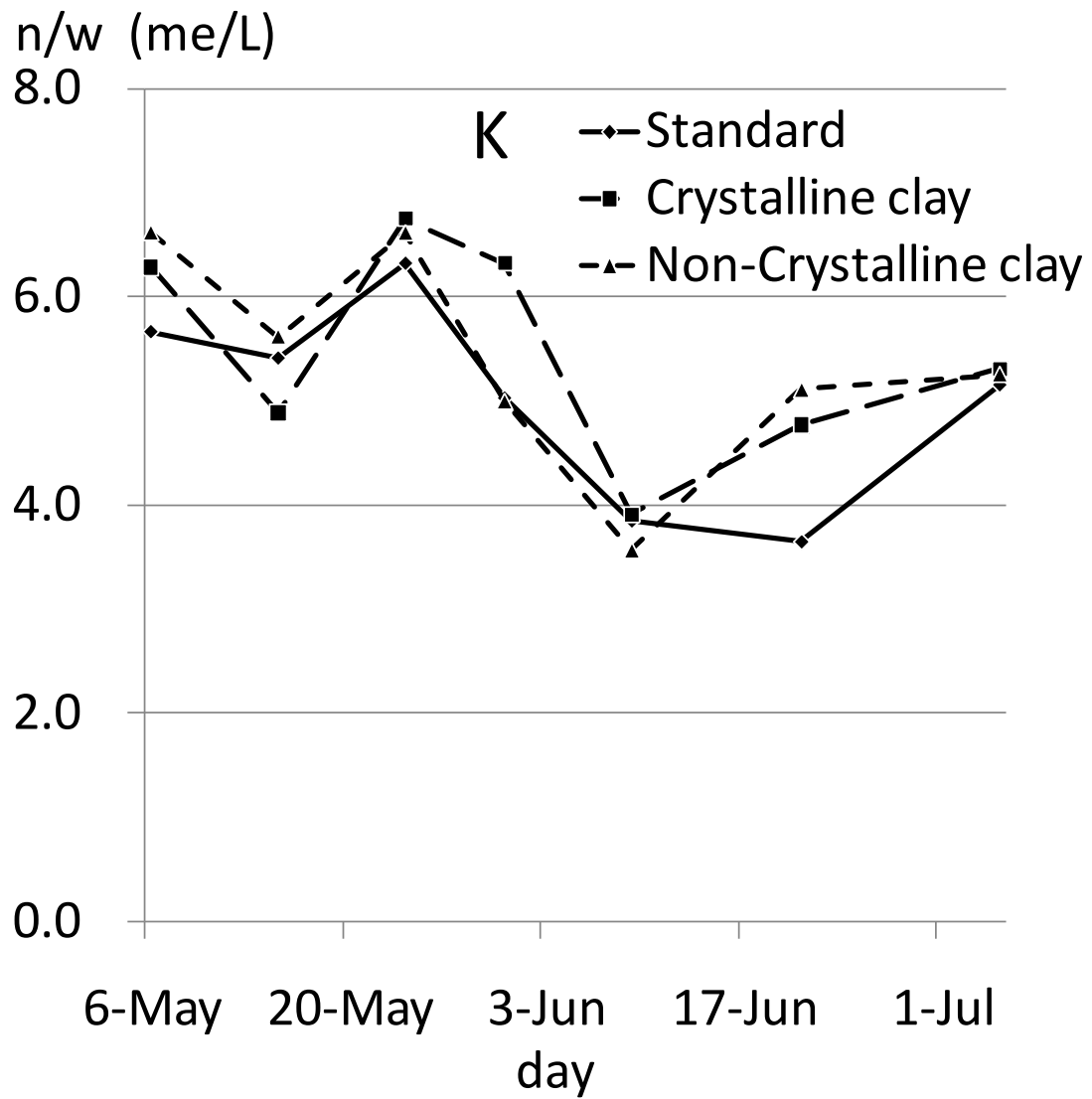


Fig. 4-5c

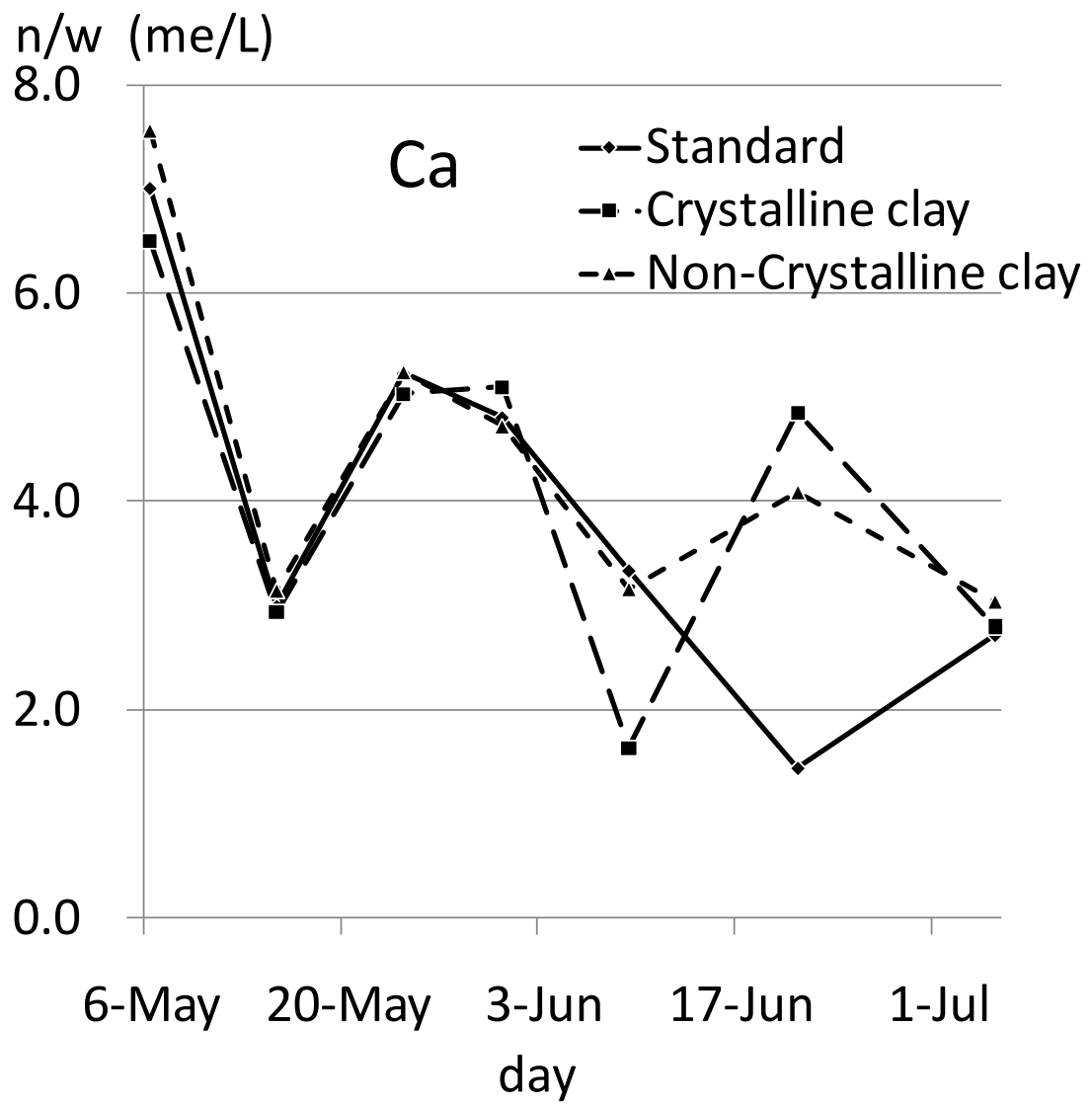


Fig. 4-5d

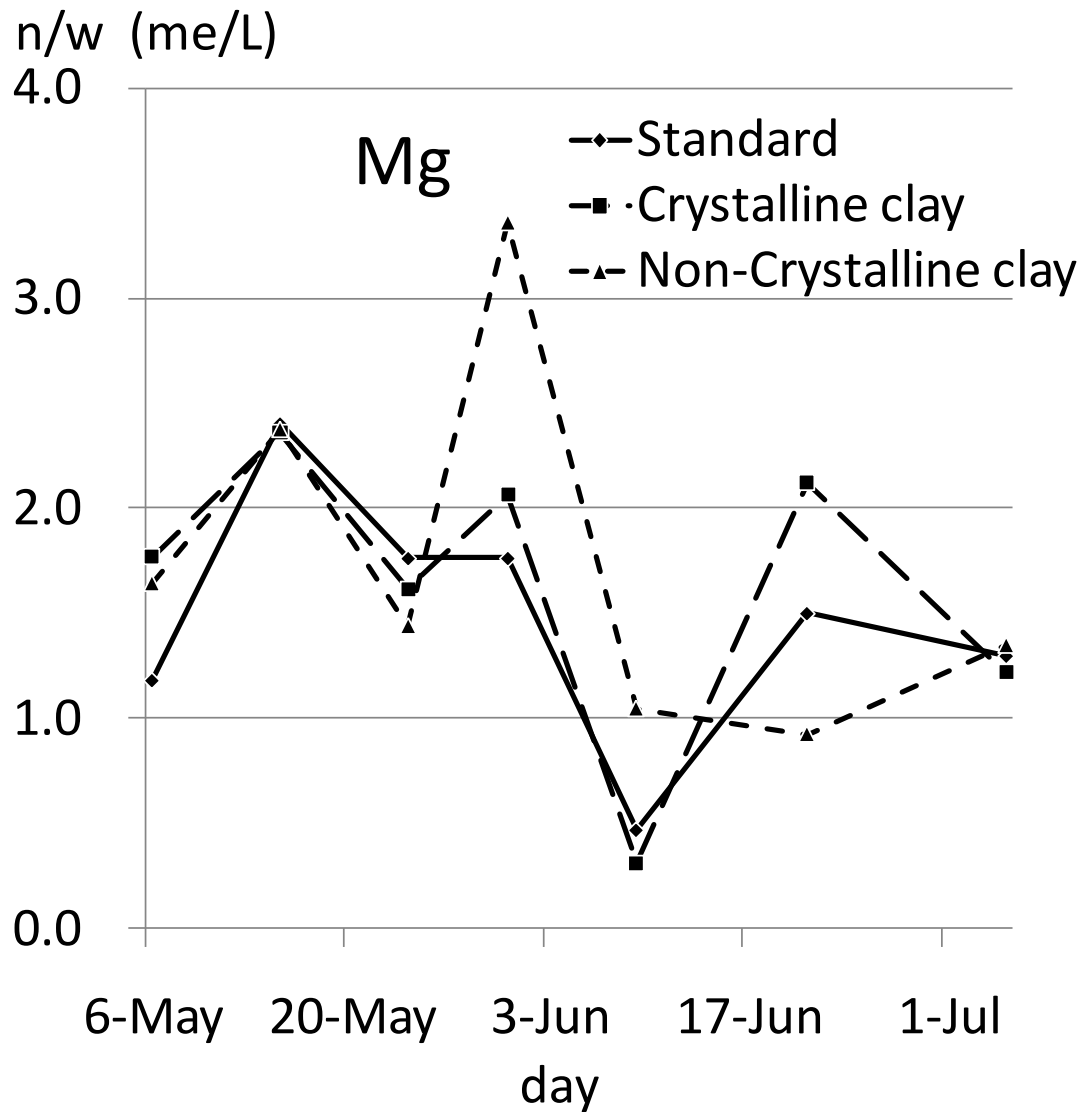


Fig. 4-5 e

Fig. 4-5a-e Effects of clay mineral addition on the nutrient absorption (nutrient/water).

第 5 章 総合考察

日本の農業は化学肥料や農薬を多く投入することで、生産性の向上や品質を安定化させてきた。しかし、一方では過剰の化学肥料成分は作物に吸収されずに流亡し、地下水や河川が汚染される等の環境問題を引き起こしてきた。特に、硝酸態窒素による環境負荷は世界的にも問題となっている。そこで、現在わが国は環境負荷の低減を目指し、環境保全型農業を推進している。環境保全型農業は化学肥料と農薬の使用量を従来の栽培よりも 50% 以下に削減して食糧生産を行う農業である。実際、環境保全型農業に取り組んでいる農家は全体の農家数の約 20% である。その他の約 80% の農家は環境保全型農業に取り組んでいないのが現状である。この理由として、化学肥料を減らすことによって農作物の生産力が低下することや、農薬の使用を減らすことによって、害虫の防除が困難になるなどが挙げられる。また、環境保全型農業は経費がかかるうえに、所得が増えないことが最大の問題点であると考えられる。しかし、環境負荷による人体の影響を考えると、環境負荷が小さい農業を行うことは望ましい。

そこで、本報告では、土壌が持っている荷電特性を利用することで、植物の栄養吸収について分析を行い、環

環境負荷の小さい栽培法の研究を重ねた。従来の露地栽培の研究では、低肥料下での栽培方法や緩効性肥料および施肥法の研究が行われてきた。これは、植物と肥料の関係に着目した研究である。しかし、土壌の荷電は肥料の養分保持能に関わっている大事な機能であるが、植物栽培と関連付けて無機成分の吸収に着目した研究は見受けられない。一方、わが国に普及する循環式養液栽培システムは培養液を再利用するシステムであるが、実際の栽培においては培養液の更新がされるため、多量の肥料成分を含む廃液が環境へ排出させる。しかし、養液栽培による環境負荷の低減に関する研究は少ない。そこで、本研究は環境負荷低減の農業の試みの一つとして、土壌の機能に着目し、土耕栽培および水耕栽培に土壌中の粘土鉱物が有する荷電特性を利用し、植物の養分吸収に与える影響について述べた。

第2章では、土壌のpHによって荷電量が変化する変異荷電特性（非晶質粘土鉱物アロフェン）を有する黒ボク土壌と、土壌のpHによって荷電量が左右されない永久荷電特性（結晶質粘土鉱物）を持つ2つの土壌を用いた。2つの土壌の土壌pHを調整し、供試作物としてトマトを栽培し、養分吸収を検討した。養分吸収については、変異荷電特性である黒ボク土壌において、陽荷電を発現している試験区で栽培したトマトの全窒素含有量は高か

った。これは、土壌に硝酸イオンが吸着保持されることによって、流亡量が少なくなったため、植物が吸収できたと考えられた。また、陰荷電を発現している試験区で栽培したトマトは、陽イオン（特にカリウム）の吸収量が多かった。これは、土壌の陰荷電に陽イオンが吸着保持されたため、流亡量が少なく植物に吸収されたと考えられた。また、イオン交換基が弱酸的性質を持つことから、1価の陽イオンの吸着力が2価の陽イオンよりも吸着力が弱かったため、吸収が多かったと考えられた。一方、永久荷電特性を有する土壌で栽培したトマトは、土壌 pH による養分の吸収に差は見られなかった。

以上のことから、変異荷電を有する土壌において、土壌 pH を調整することによって、植物の特定の養分の吸収促進ができると考えられた。これは、肥料の施用量の削減および養分の流亡の阻止に有用であると考えられた。

第3章では、2つの土壌の土壌 pH を調整し、供試作物として大玉トマトを栽培し、果実の各種呈味成分を検討した。果実の収穫量については、土壌の荷電特性の影響は小さく土壌 pH に影響を受けることが示された。また、変異荷電特性を有する土壌で栽培したトマト果実および永久荷電特性を有する土壌で栽培したトマト果実の各種呈味成分には統計的な有意性は認められなかった。このことから、荷電特性による各種呈味成分含量への影響は

明らかではなかった。

第 4 章では荷電特性が異なる 2 つの土壌から粘土鉱物を分離し、水耕栽培の培養液に添加することによって、植物の養分吸収に与える影響を検討した。粘土鉱物を添加した試験区では果実肥大期において養分の吸収速度が速かったため、果実の収穫量が多い傾向にあった。特に、イオン交換基が弱酸的性質を持つアロフェンを添加した試験区では、硝酸イオンとカリウムイオンの吸収速度が速く、収穫量が多い傾向にあった。即ち、水耕栽培に粘土鉱物を添加すると植物根との接触置換によって根表面の各種イオン濃度が高まり、果実肥大期において効率的に養分吸収が促進され、収穫量が多くなることが示唆された (Fig.5)。また、これはイオン交換基の性質の違いに影響されることが示唆された。即ち、アロフェンのイオン交換基は粘土鉱物の表面にあり、かつイオン交換基の酸的性質は弱酸的で構成され、植物の必須多量元素の陽イオン吸着力が弱いためと考えられた。しかし、粘土鉱物の適切な添加量など更なる検討が必要であることが望まれた。

以上より、粘土鉱物の荷電特性は土耕栽培だけでなく、水耕栽培においても植物の養分吸収に影響を与えることが示された。これは、将来、土壌もしくは粘土鉱物の荷

電を利用することによって、肥料の有効利用や削減を可能とし、環境負荷の低減につながると考えられた。特に、水耕栽培において低濃度の培養液に粘土鉱物を添加することによって、積極的に肥料成分を植物に吸収させることによって、省資源化および環境負荷の低減の可能性につながると考えられた。

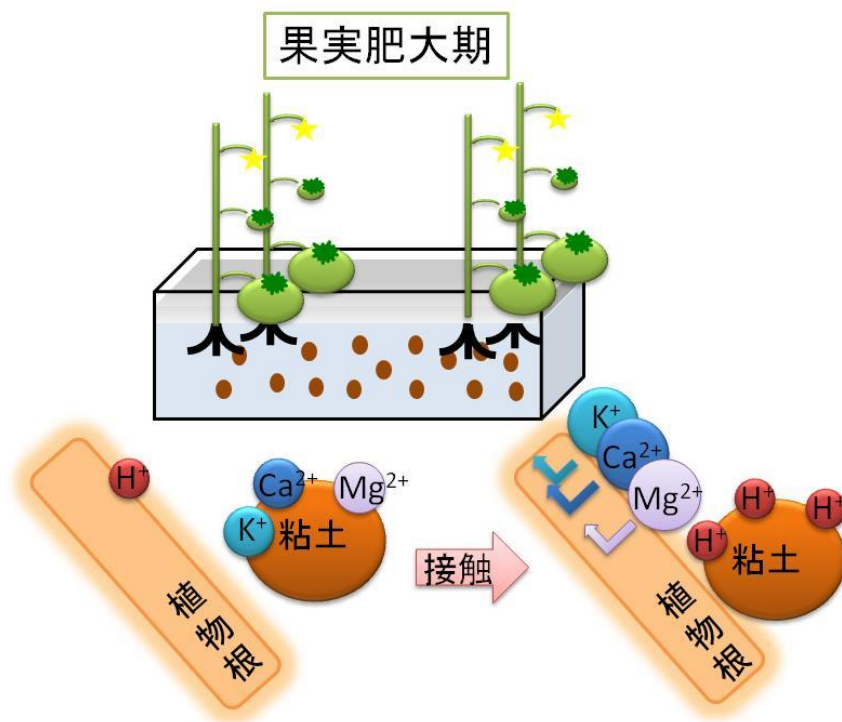


Fig.5 トマトの水耕栽培における粘土鉱物の接触置換モデル（第1段果房の果実肥大期）

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、明治大学農学部竹迫紘教授、中林和重准教授に数多くのご指導を頂いた。また、寺田邦夫氏・寺田昌枝氏・後藤佑果氏には貴重な土壌試料を提供して頂いた。また実験や論文作成にあたって明治大学農学部植物環境制御学研究室、土壌圏科学研究室的の皆様には有益かつ有意義な議論、ご助言を頂いた。記して、深く御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 農林水産省, 2012: 平成 24 年度の食料自給率について.
- 2) 岡崎圭毅・建部雅子・唐沢敏彦, 2006: ホウレンソウにおける汁液硝酸イオン濃度の推移および糖・シュウ酸含有率に対する養液土耕栽培の効果. 日本土壤肥料学雑誌, 77, 25-32.
- 3) 農林水産省環境保全型農業推進本部, 1994: 環境保全型農業推進の基本的考え方. 農林水産省, 1-9.
- 4) 農林水産省, 2000: 農林業センサス.
- 5) 栗原淳・越野正義, 1986: 肥料製造学. 養賢堂, 東京, pp.1, pp.14, pp.96, pp.144.
- 6) 北岸確三, 1961: 土壤肥料講座 1 (小西千賀三・高橋治助編), 朝倉書店, 東京, pp. 47-49, pp. 53.
- 7) 原田登五郎, 1961: 土壤肥料講座 2 (小西千賀三・高橋治助編), 朝倉書店, 東京, pp. 103.

- 8) 逸見 彰男, 1988: アロフェンの SiO_4 四面体の存在様式. 日本土壤肥料学雑誌, **59**, 237-241.
- 9) 松中照夫, 2003: 土壤学の基礎. 農山漁村文化協会, 東京, pp. 118-119.
- 10) 池田英夫, 2002: 養液栽培の新マニュアル (日本施設園芸協会編). 誠文堂新光社, 東京, pp. 3-5.
- 11) 糠谷明, 2002: 養液栽培の新マニュアル (日本施設園芸協会編). 誠文堂新光社, 東京, pp. 28-31.
- 12) 土壤保全調査事業全国協議会編, 1991: 日本の耕地土壤の実態と対策. 博友社, 東京, pp. 36.
- 13) 伊藤豊彰, 2007: 土壤を愛し、土壤を守る—日本の土壤、ペドロロジー学会 50年の集大成— (日本ペドロロジー学会編). 博友社, 東京, pp. 61-62.
- 14) Kitagawa, Y., 1971: The “unit particle” of allophane. *American Mineralogist*, **56**, 465-475.

- 15) Henmi, T. and Wada, K., 1976: Morphology and composition of allophane. *American Mineralogist*, **61**, 379-390.
- 16) Wada, S. and Wada, K., 1977: Density and structure of allophane. *Clay Minerals*, **12**, 289-298.
- 17) 日本粘土学会編, 2009: 粘土ハンドブック - 第3版 -, 技報堂出版, 東京, pp.126.
- 18) Egashira, K. and Aomine, S., 1974: Effect of drying and heating on the surface area of allophane and imogolite. *Clay Science*, **4**, 231-242.
- 19) 宮内信文・中野篤弘, 1971: 火山灰土壌のリン吸着 - 吸着量におよぼす pH、リン酸液濃度の影響 -, 鹿児島大学農学部学術報告, **21**, 143-152.
- 20) Parfit, L. R. and Henmi, T., 1980: Structure of some allophanes from New Zealand. *Clays and Clay Minerals*, **28**, 285-294.
- 21) 山本克巳, 1983: アロフェンによる銅および亜鉛の吸着特性. 日本土壌肥料学雑誌, **54**, 519-526.

22) Johan, E., Matsue, N. and Henmi, T., 1997: Phosphate adsorption on nano-ball allophane and its molecular orbital analysis. *Clay Science*, **10**, 259-270.

23) 佐伯和利, 2007: 黒ボク土に対する有害無機陰イオンの吸着特性. 九大農芸誌, **62**, 7-13.

24) 浅岡聡・青野求, 2006: 赤玉土および各種無機系吸着剤混合赤玉土による海水の脱塩. 日本土壤肥料学雑誌, **77**, 33-39.

25) Itami, K. and Yanai, J., 2006: Sorption and desorption properties of cadmium and copper on soil clays in relation to charge characteristics. *Soil Science and Plant Nutrition*, **52**, 5-12.

26) Isoyama, M. and Wada, S., 2007: Effect of reaction time on PB removal from allophanic volcanic ash soil by acid-washing. *Soils and Foundations*, **47**, 629-633.

27) 波多野隆介・犬伏和弘・八木一行・秋山博子・新藤純子・岡本勝男・川島博之・長谷川周一・木村真人, 2005: 農業生態系からの環境負荷の測定と予測, 日本土壤肥料学雑誌, **76**, 229-235.

- 28) 和田信一郎, 2001: 風化浮石からのアロフェンの分離精製法, 粘土科学, **40(4)**, 242-248.
- 29) 原田靖生, 1984: 土壤の陽イオン・陰イオン交換容量 - 測定法とその背景 -. 日本土壤肥料学雑誌, **55**, 273-283.
- 30) 三枝正彦・松山信彦・阿部篤郎, 1992: 黒ボク土の荷電特性と土壤管理上の問題点, 日本土壤肥料学雑誌, **63**, 196-201.
- 31) 酒井忠雄・相原將人編著, 2002: 環境・分析化学実験, 三共出版, 東京, pp.57-59.
- 32) 土壤環境分析法編集委員会, 1997: 土壤環境分析法. 博友社, 東京, pp. 195-202, pp. 267-269.
- 33) 植物栄養実験法編集委員会, 2001: 植物栄養実験法, 博友社, 東京, pp. 190-191.
- 34) 保田和雄・長谷川敬彦, 1976: 原子吸光分析. 講談社, 東京, pp. 153-182.

35) 満田久輝, 1961: 実験栄養化学. いずみ書房, 京都, pp.100-105.

36) 熊沢喜久雄, 1961: 土壌肥料講座 1 (小西千賀三・高橋治助編), 朝倉書店, 東京, pp. 47-48, pp. 89.

37) Jenny, H. and Overstreet, R., 1939: Cation interchange between plant roots and soil colloids. *Soil Science*, 47, 257-272.

38) 三井進午・中川正男・馬場昂・天正満・熊沢喜久雄, 1956: 作物の養分吸収に関する動的研究 (第10報) 作物根アイトイド及び塩基未飽和土壌コロイドによる熔性苦土燐肥 (P32) の接触溶解吸収について, 日本土壌肥料学雑誌, 26(12), 13-17

39) 逸見彰男, 1985: 粘土の事典 (岩生周一・長沢敬之助・宇田川重和・加藤忠蔵・喜田大三・青柳宏一・渡邊裕編), 朝倉書店, 東京, pp. 100-101, pp. 164.

40) 中野有加・渡辺慎一・川嶋浩樹・高市益行, 2006: トマト水耕栽培の無機成分の日施用法における施用量が収量, 品質および無機成分吸収量に及ぼす影響. 園学雑, 75, 421-429.

41) 延安弘行・谷本玉香・加藤淳子, 2008: 青ネギの湛液型水耕栽培における培養液濃度の改善による環境負荷低減技術. 土肥要旨集, **54**, 304.

42) 土屋竜雄・倉林三郎, 1958: 関東ローム中の粘土鉱物について(1), 地質学雑誌, **64(758)**, 605-615.

43) Nakabayashi, K., Ogura, Y. and Takesako, H., 2013: Effect differences in soil charge characteristics on nutrient uptake by mini tomato plants. *Eco-Engineering*, **25(2)**, 41-47.

44) 石塚潤爾・郡司掛則昭・久保研一, 2000: トマト障害果の栄養特性, 熊本県農業研究センター研究報告, **9**, 48-57.

45) 山崎肯也・鈴木芳夫・篠原温: そ菜の養液栽培(水耕)に関する研究, 特に培養液管理とみかけの吸収濃度(n/w)に就て, 東教大農紀要, **22**, 53-100.

46) 石原良行・人見秀康・八巻良和, 2007: 閉鎖型養液栽培用に開発された培養液組成がトマトの成分吸収濃度に及ぼす影響, 園学研, **6(3)**, 391-397.

47) 吉永長則, 1985: 粘土の事典 (岩生周一・長沢敬之助・宇田川重和・加藤忠蔵・喜田大三・青柳宏一・渡邊裕編), 朝倉書店, 東京, pp. 443.

48) 近藤隆彦, 1967: そ菜における生育段階別の養水分吸収について, 園芸試験場報告. B, 7, 57-72.

49) Terabayashi, T., Muramatsu, I., Tokutani, S., Ando, M., Kitagawa, E., Shigemori, T., Date, S. and Fujime, Y., 2004: Relationship between the weekly nutrient uptake rate during fruiting stages and fruit weight of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown hydroponically. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 73(4), 324-329.

資料

Table1-1 黒ボク土壌の荷電特性（第2章）

No	pH	AEC	CEC
1	5.51	-7.39	10.20
2	5.76	-5.42	10.79
3	6.51	-5.00	16.89
4	7.66	-3.95	27.83

単位 (cmol_c/kg)

Table 1-2 沖積土の荷電特性 (第2章)

No	pH	AEC	CEC
1	4.94	-2.59	13.01
2	5.42	-2.70	13.34
3	5.74	-1.21	13.70
4	6.25	-1.63	13.99

単位 (cmol_c/kg)

Table 1-3 植物体中の無機元素組成（第2章）

		N	P	K	Ca	Mg
				%		
Andosols	pH5.0	3.48	0.11	4.34	1.59	0.59
	pH5.5	2.83	0.08	5.08	1.93	0.57
	pH6.0	2.44	0.08	3.86	1.72	0.51
	pH6.5	2.90	0.07	4.89	1.99	0.59
Fluvisols	pH5.0	1.95	0.12	3.60	1.85	0.66
	pH5.5	2.20	0.12	3.24	1.85	0.43
	pH6.0	2.21	0.16	3.31	1.81	0.43
	pH6.5	2.29	0.12	2.65	1.67	0.45

Avg±S.D.

n = 2

Table 1-4 果实収量 (第3章)

		第1段果房	第2段果房	合計
Andosols	pH5.0	303.1	209.7	512.8
	pH5.5	592.4	176.2	768.6
	pH6.0	445.9	199.2	645.1
	pH6.5	271.0	340.3	611.3
Fluvisols	pH5.0	318.0	204.4	522.3
	pH5.5	264.2	237.5	501.7
	pH6.0	483.3	259.2	742.6
	pH6.5	473.8	198.7	672.5

Avg±S.D.

単位 (g/株)

n = 2

Table 1-5 果実中の糖度（第3章）

		第1段果房	第2段果房	平均
Andosols	pH5.0	6.4±0.97	7.2±1.18	6.78
	pH5.5	7.0±0.16	7.3±0.35	7.13
	pH6.0	6.4±1.13	7.0±1.41	6.70
	pH6.5	6.8±0.71	6.4±0.85	6.60
Fluvisols	pH5.0	8.3±0.71	9.4±1.34	8.83
	pH5.5	8.0±0.78	9.5±0.57	8.73
	pH6.0	7.6±0.99	9.6±0.81	8.61
	pH6.5	7.6±1.65	9.5±4.88	8.51
				Avg±S.D.

単位 (Brix%)

第 1 段 果 房 : n=4 (Andosols;pH5.0,pH6.0,pH6.5, Fluvisols;pH5.0,pH5.5,pH6.0), n=5 (Andosols;pH5.5), n=6 (Fluvisols;pH6.5). 第 2 段 果 房 : n=3 (Andosols;pH5.5, pH6.0,pH6.5, Fluvisols;pH5.0,pH5.5,pH6.5), n=4 (Andosols;pH5.0, Fluvisols;pH6.0).

Table 1-6 果実の酸度 (第3章)

		第1段果房	第2段果房	平均
Andosols	pH5.0	0.53±0.06	0.44±0.02	0.49
	pH5.5	0.50±0.02	0.56±0.07	0.53
	pH6.0	0.47±0.03	0.56±0.09	0.51
	pH6.5	0.47±0.06	0.50±0.01	0.48
Fluvisols	pH5.0	0.55±0.10	0.55±0.09	0.55
	pH5.5	0.53±0.12	0.52±0.01	0.52
	pH6.0	0.46±0.06	0.47±0.08	0.46
	pH6.5	0.57±0.11	0.66±0.20	0.61
				Avg±S.D.

単位 (Citric acid%)

第1段果房: n=4 (Andosols; pH5.0, pH5.5, pH6.0, pH6.5, Fluvisols; pH5.0, pH5.5, pH6.0), n=5 (Fluvisols; pH6.5).

第2段果房: n=3 (Andosols; pH5.5, pH6.0, pH6.5, Fluvisols; pH5.0, pH5.5, pH6.0, pH6.5), n=4 (Andosols; pH5.0)

Table1-7 果実中のグルタミン酸含量（第3章）

		第1段果房	第2段果房	平均
Andosols	pH5.0	221.8±61.2	256.2±120.0	239.0
	pH5.5	257.5±118.8	238.0±91.9	247.8
	pH6.0	171.5±77.1	259.8±37.1	215.6
	pH6.5	301.3±100.8	192.8±78.1	247.0
Fluvisols	pH5.0	263.3±14.5	272.8±47.7	268.0
	pH5.5	283.8±20.2	257.8±22.3	270.8
	pH6.0	156.5±27.6	153.8±101.5	155.1
	pH6.5	204.8±39.2	319.8±276.8	262.3
				Avg±S.D.

単位（mg/100ml f.wt）

第1段果房：n=4.

第2段果房：n=3（Andosols；pH5.5，pH6.0，pH6.5，
Fluvisols；pH5.0，pH5.5，pH6.0，pH6.5），n=4（Andosols；pH5.
0））.

Table 1-8 果実中のプロリン含量 (第3章)

		第1段果房	第2段果房	平均
Andosols	pH5.0	4.17±1.74	4.38±1.57	4.27
	pH5.5	3.29±0.31	3.44±0.43	3.36
	pH6.0	3.10±0.18	4.62±1.73	3.86
	pH6.5	4.31±0.28	3.84±0.96	4.07
Fluvisols	pH5.0	4.53±0.91	5.45±0.49	4.99
	pH5.5	4.58±0.14	4.70±0.63	4.64
	pH6.0	3.33±0.78	4.20±0.29	3.77
	pH6.5	3.78±0.15	5.17±1.52	4.47
				Avg±S.D.

単位 (mg/100ml f.wt)

第1段果房: n=4 (Andosols;pH5.0, pH5.5, pH6.0, pH6.5, Fluvisols;pH5.0, pH5.5, pH6.0), n=5 (Fluvisols;pH6.5).

第2段果房: n=3 (Andosols;pH5.5, pH6.0, pH6.5, Fluvisols;pH5.0, pH5.5, pH6.0, pH6.5), n=4 (Andosols;pH5.0)

Table 1-9 培養液中の pH の経時変化（第 4 章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	7.42	7.33	7.23	7.23	7.53	7.21	6.62
Crystalline clay	7.49	7.40	7.31	7.26	7.63	7.33	6.70
Non-Crystalline clay	7.50	7.44	7.38	7.36	7.66	7.40	6.74

Table 1-10 培養液の EC の経時変化（第 4 章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	0.81	0.71	0.48	0.57	0.77	0.94	0.96
Crystalline clay	0.63	0.92	0.48	0.53	0.68	0.82	0.88
Non-Crystalline clay	0.70	0.55	0.43	0.47	0.64	0.77	0.88

単位（dS/m）

Table 1-11 硝酸態窒素のみかけの成分吸収速度の推移（第4章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	3.53	6.44	9.64	5.32	3.05	1.79	4.17
Crystalline clay	4.06	5.48	9.10	5.15	3.49	2.23	4.20
Non-Crystalline clay	3.53	6.31	9.40	5.89	3.65	2.59	4.36

単位（me/plant/day）

Table 1-12 リンのみかけの吸収成分速度の推移（第 4 章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Cotrol	0.74	1.80	2.47	1.42	0.98	0.62	1.37
Crystalline clay	0.89	1.55	2.40	1.42	1.01	0.76	1.14
Non-Crystalline clay	0.82	1.63	2.45	1.43	1.05	0.78	1.21

単位 (me/plant/day)

Table1-13 カリウムイオンのみかけの成分吸収速度
の推移（第4章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	1.60	3.49	4.82	2.60	2.14	0.95	2.44
Crystalline clay	1.98	2.92	4.97	2.82	2.23	1.29	2.42
Non-Crystalline clay	1.65	3.36	4.96	2.85	2.23	1.65	2.58

単位（me/plant/day）

Table 1-14

カルシウムイオンのみかけの成分吸収速度の推移（第4章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	1.98	1.93	4.00	2.49	1.85	0.37	1.28
Crystalline clay	2.05	1.75	3.71	2.28	0.93	1.32	1.27
Non-Crystalline clay	1.89	1.88	3.93	2.70	1.97	1.32	1.49

単位（me/plant/day）

Table 1-15

マグネシウムイオンのみかけの成分吸収速度の推移
(第4章)

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	0.33	1.55	1.35	0.91	0.26	0.39	0.61
Crystalline clay	0.56	1.41	1.19	0.92	0.18	0.57	0.56
Non-Crystalline clay	0.41	1.42	1.08	1.92	0.65	0.30	0.66

単位 (me/plant/day)

Table 1-16

硝酸態窒素のみかけの成分吸収濃度の推移（第4章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	12.47	9.97	12.63	10.28	5.50	6.87	8.81
Crystalline clay	12.85	9.18	12.36	11.53	6.13	8.25	9.22
Non-Crystalline clay	14.13	10.56	12.54	10.30	5.85	8.02	8.88

単位（n/w(me/l)）

Table 1-17

リンのみかけの成分吸収濃度の推移（第4章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Cotrol	2.61	2.78	3.23	2.73	1.77	2.39	2.90
Crystalline clay	2.81	2.59	3.26	3.19	1.77	2.80	2.49
Non-Crystalline clay	3.26	2.72	3.27	2.50	1.68	2.40	2.47

単位（n/w(m e/l)）

Table 1-18

カリウムイオンのみかけの成分吸収濃度の推移（第 4 章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	5.66	5.41	6.32	5.03	3.85	3.65	5.15
Crystalline clay	6.28	4.88	6.75	6.32	3.91	4.77	5.31
Non-Crystalline clay	6.62	5.62	6.62	5.00	3.56	5.11	5.25

単位（n/w (me/l)）

Table 1-19

カルシウムイオンのみかけの成分吸収濃度の推移（第4章）

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	7.01	2.99	5.23	4.80	3.33	1.44	2.71
Crystalline clay	6.50	2.93	5.04	5.10	1.63	4.86	2.80
Non-Crystalline clay	7.57	3.14	5.25	4.72	3.16	4.09	3.04

単位（n/w (me/l)）

Table 1-20

マグネシウムイオンのみかけの成分吸収濃度の推移
(第4章)

	5/6	5/15	5/24	5/31	6/9	6/21	7/5
Control	1.18	2.40	1.76	1.76	0.47	1.50	1.30
Crystalline clay	1.77	2.36	1.62	2.06	0.31	2.12	1.22
Non-Crystalline clay	1.64	2.38	1.44	3.36	1.05	0.93	1.35

単位 (n/w(me/l))



写真 1 第 2 章 実験 I の 栽培 風景



写真 2 第 3 章 実験 II の 播 種 時



写真 3 第 3 章 実験 II の 栽培 風景



写真 4 第 3 章 実験 II の トマト の 果実 (未分析試料)



写真 5 第 2 章および第 3 章で用いた黒ボク土壌断面



写真 6 第 2 章および第 3 章で用いた黒ボク土壌



写真 7 第 2 章および第 3 章で用いた沖積土

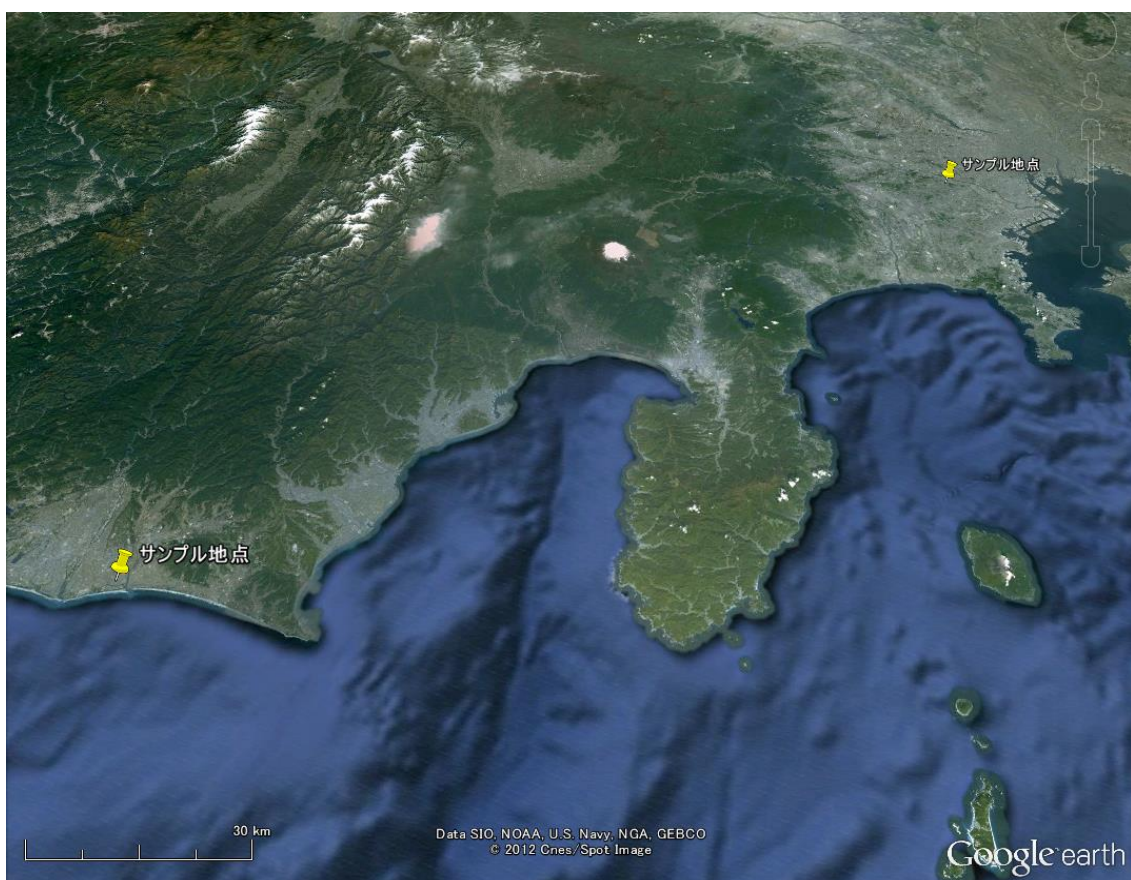


写真 8 第 2 章 および 第 3 章 で 用 い た 土 壌 地 点
(Google earth)



写真 9 本報告で使用した明治大学生田校舎ガラス温室



写真 10 第 2 章および第 3 章で用いた 1/5000a ワグ
ネルポット (株藤本科学工業製)



写真 11 第 2 章および第 3 章で用いた育苗培土プライムミックス TKS-2 (株サカタのタネ製)



写真 12 第 2 章および第 3 章で用いた育苗用バーミキュライト No.2 (株)ベルテミック製)



写真 12 第 3 章 で用いたパーライト（株国華園）



写真 13 第 4 章 播種時の様子



写真 14 第 4 章 播種時後 3 日目の様子



写真 15 第 4 章 播種時後 6 日目の様子



写真 15 第 4 章仮植の様子（播種時後 6 日目）



写真 16 第 4 章のトマトの水耕栽培風景



写真 17 第 4 章のトマトの水耕栽培培養液の様子（非晶質区）



写真 18 本報告で用いた水耕肥料（㈱大塚アグリテクノ，大塚ハウス1号）



写真 19 本報告で用いた水耕肥料（㈱大塚アグリテクノ，大塚ハウス 2 号）



写真 20 第 4 章で用いた水耕ベッド（全農製, スーパー
ドレインベッド 55）



写真 21 第 4 章で用いた水耕シート（㈱アキレス製，アキレスマジキリⅡ.厚さ 0.5mm）



写真 22 第 4 章 で用いたエアチューブ（株）貝沼産業, HI-SOFT)



写真 23 第 4 章で用いたエアストーン（㈱水作製、水作エイト交換プラストン）



写真 24 第 4 章で用いたエアーポンプ（㈱大晃機械工業製,DF-60）



写真 25 第 4 章 で用いたバスポンプ（株 仲 佐 製 ,NBP-10）



写真 26 本報告で用いたトマトトーン（㈱日産化学工業製）



写真 27 第 4 章で用いた銀黒ダブルマルチ（㈱みかど工業製,規格 SB95)