

第5回 イチゴに必要な養分とその働き

植物の必須元素

植物が成長するには17種類の元素が必要で、そのうち比較的多量に必要とする元素を多量必須元素といい、必要量が少ないものを微量必須元素という。現時点での多量必須元素は9種類、微量必須元素は8種類で、合計17種類が必須元素である（第1表）。このうちニッケルは30年前にはじめて微量必須元素であると指摘されたが、多くの研究者が同意したのはごく最近のことで、詳細については研究中である。これら必須元素のうち、水素、炭素、酸素は水と二酸化炭素で供給されることから、残りの14種類の元素が培養液の成分あるいは培地の構成成分から植物に供給される。さらに、特定の植物や特殊な環境のもとで植物の生育に有利に働く元素として、ケイ素 Si、ナトリウム Na、コバルト Co、アルミニウム Al、セレン Se などが有益元素とされていて、特にケイ素は細胞壁を強固にして病害虫の被害を軽減する作用がイチゴでもその効果が認められ注目されている。

第1表 植物体を構成する必須元素とその割合

多量必須元素	割合(%)	微量必須元素	割合(ppm)
<u>水素</u>	6	<u>塩素</u>	100
<u>炭素</u>	45	<u>銅</u>	6
<u>窒素</u>	1.5	<u>鉄</u>	100
<u>酸素</u>	45	<u>マンガン</u>	50
<u>カリウム</u>	1	<u>亜鉛</u>	20
<u>カルシウム</u>	0.5	<u>モリブデン</u>	0.1
<u>リン</u>	0.2	<u>ホウ素</u>	20
<u>マグネシウム</u>	0.2	<u>ニッケル</u>	?
<u>硫黄</u>	0.1		

第2表は必須元素と植物体内での働きをまとめたものである。

第2表 必須元素と植物体内での主な働き

元素	おもな 吸収形態	植物体内でのおもな働き
多量必須元素（炭素、酸素、水素を除く）*1		
窒素（N）	NH_4^+ NO_3^-	タンパク質を構成するアミノ酸、葉緑素、各種補酵素、核酸（DNA*2、RNA*2）など植物体の生命にかかわる成分の構成成分。光合成にも強く関与。作物の生育、収量、品質に大きな影響を与える
リン（P）	H_2PO_4^- HPO_4^{2-}	生物としての遺伝情報を伝達する核酸（DNA*2、RNA*2）のほか、リン脂質の重要な構成成分。アデノシン三リン酸（ATP）として体内のエネルギー移動に関与。多くのタンパク質、補酵素、植物体内での化学的な反応のもとになる物質の構成成分
カリウム（K）	K^+	植物体では、カリウムを構成成分とする生理的に重要な有機化合物は認められていない。細胞内の浸透圧や pH の調節、多くの酵素の活性化にかかわる。気孔の開閉にもかかわり光合成に影響する
カルシウム（Ca）	Ca^{2+}	細胞壁や細胞膜などの構造の維持や膜の透過性に関与。細胞内での刺激などのさまざまな情報を伝達する物質としての働きをもつ
マグネシウム（Mg）	Mg^{2+}	葉緑素の構成成分として重要。光合成の過程で生じる中間産物とリンの結合にかかわる酵素の働きを助けることで、間接的に植物体内のリンの移動にも関与している
イオウ（S）	SO_4^{2-}	イオウを含むアミノ酸（メチオニン、システイン、シスチンなど）としてタンパク質を構成する。光合成などの生体内反応や代謝調節に重要な役割。ビタミンや補酵素の構成成分でもある
微量必須元素		
鉄（Fe）	Fe^{2+} Fe^{3+}	葉緑素の合成に必要な先駆け物質の合成に関与することで、葉緑素合成に密接に関係。タンパク質と結合して電子伝達や酸化還元反応の触媒反応を増大させる
マンガン（Mn）	Mn^{2+}	植物体内の酸化還元系の制御や、光合成での水の光分解にともなう酸素（ O_2 ）発生に関与。呼吸など体内での有機酸代謝にかかわる酵素の活性化
亜鉛（Zn）*3	Zn^{2+}	タンパク質合成にかかわる酵素の構成成分として重要な働き。RNA*2 分解酵素の活性を調節して、体内での RNA レベルに影響
銅（Cu）	Cu^{2+}	葉緑体中のプラストシアニンというタンパク質に多く含まれており、光合成での電子伝達や呼吸に重要な働き
ホウ素（B）	B(OH)_3	他の元素とちがい、分子の形態（ $\text{B(OH)}_3 = \text{H}_3\text{BO}_3$ ）で吸収されると考えられている*4。カルシウムと同様に細胞壁の構造維持に重要な働きをする。植物体内での糖の移動や生長ホルモンの調節にも関与
モリブデン（Mo）	MoO_4^{2-}	窒素の同化に必要な硝酸還元酵素の構成成分。根粒菌をはじめとする生物学的窒素固定で、分子状の窒素（ N_2 ）をアンモニア（ NH_3 ）に還元する酵素（ニトロゲナーゼ）の構成要素であることから、窒素固定に大きく影響する
塩素（Cl）	Cl^-	光合成の明反応で、酸素発生をともなう反応をマンガン（Mn）とともに触媒する働き。細胞内の浸透圧や pH の調節にもかかわる
ニッケル（Ni）*5	Ni^{2+}	植物体内で生じる尿素の分解酵素（ウレアーゼ）の構成成分として重要。ウレアーゼの働きをとおり植物体内の窒素の栄養に関与
* 1：多量必須元素は全部で9元素であり、この表に示した6元素のほかに炭素（C）、酸素（O）、水素（H）が含まれる。これらの元素のおもな供給源は、Cが大気中の二酸化炭素（CO_2）、OはCO_2のほか、大気中の酸素（O_2）や水（H_2O）からである。これらはいずれも、植物体を構成する有機物の最も基本的な構成成分である * 2：DNA＝デオキシリボ核酸、RNA＝リボ核酸 * 3：かつて、亜鉛は植物成長ホルモン（オーキシン）の活性成分であるインドール酢酸（IAA）の調節に関与するとされていた。しかし、その後の実験で、それとは異なる結果が出されてきて、現段階ではZnとIAAとの関係に明確な結論が得られていない * 4：ホウ酸（$\text{B(OH)}_3 = \text{H}_3\text{BO}_3$）が水溶液で十分に解離していないと考えられるためである（山内、2002） * 5：Niを微量必須元素に含めることについては、現時点で必ずしも完全に同意されているとはいえない。詳細は本章8-8項参照 上記の多量必須元素、微量必須元素のほかに、必ずしも必須ではなく、特定の植物に対して有益な働きをする元素（有益元素）として、ケイ素（Si）、ナトリウム（Na）、コバルト（Co）、アルミニウム（Al）、セレン（Se）などがある		

多量必須元素の機能

・窒素

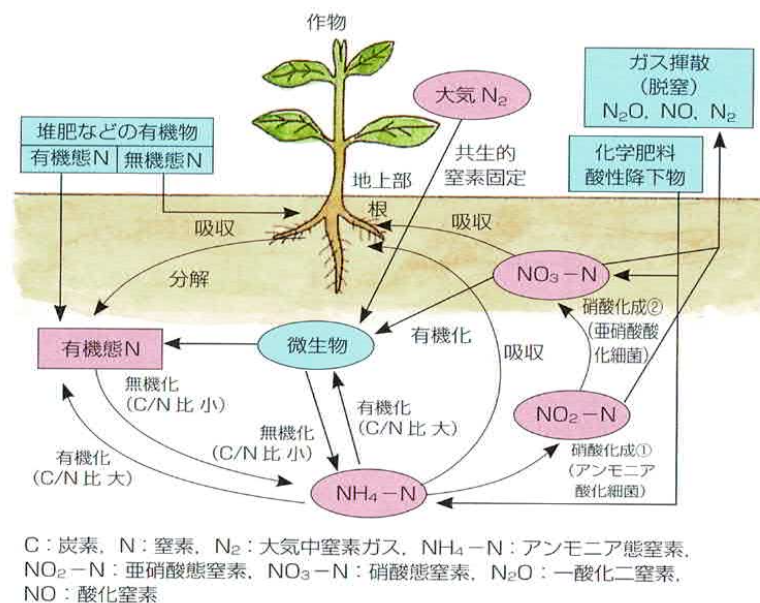
窒素(N)は、植物の体を作るタンパク質、体内でのさまざまな反応に関わっている酵素タンパク質、光合成を司る葉緑体タンパク質などの構成成分として、植物体の生命維持に重要な役割を果たしている。このため、窒素は作物

生産に重要な養分で植物体の要求量が多いが、特に、1株あたりの培地量が制限される高設イチゴ栽培では生育の制限因子になりやすい。

植物体が吸収・利用可能な可給態窒素が不足すると、古い葉（下位葉）のタンパク質を分解して新しい葉（上位葉）に移行させて再利用する。そのため、葉色が淡緑色から黄色に老化して枯れていく窒素欠乏症は下位葉から上位葉へと移動していく。逆に、窒素が植物体の要求以上に供給されると、葉色が濃緑色になって栄養成長期間が長くなり、イチゴでは発生する花房間の葉数が増加して葉柄長が長くなるなどの過剰障害が発生する。また、糸状菌による病害や害虫の被害も受けやすくなる。

イチゴでは窒素過多となるとタンパク質が必要以上に合成されるが、その合成には光合成産物の糖（デンプンやショ糖など）が利用されるので、植物体内の糖含量が低下して、果実内の糖やクエン酸、ビタミンCなどの品質に関わる成分も低下する。

植物の根から吸収される14の元素はすべて無機態(イオンの形態)として吸収される。培土には有機態と無機態の窒素が含まれているが、有機態の窒素は微生物によって、有機態(タンパク質など)→アミノ酸→アンモニア態窒素の過程を経て無機態窒素に分解される。アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)は酸素が存在する好気的条件下で、① $\text{NH}_4\text{-N}$ →亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$) ② $\text{NO}_2\text{-N}$ →硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)へと変化する。①の段階ではアンモニア酸化細菌が、②の段階では亜硝酸酸化細菌が関与している(第1図)。これらの細菌類を一括して硝化菌といっている。



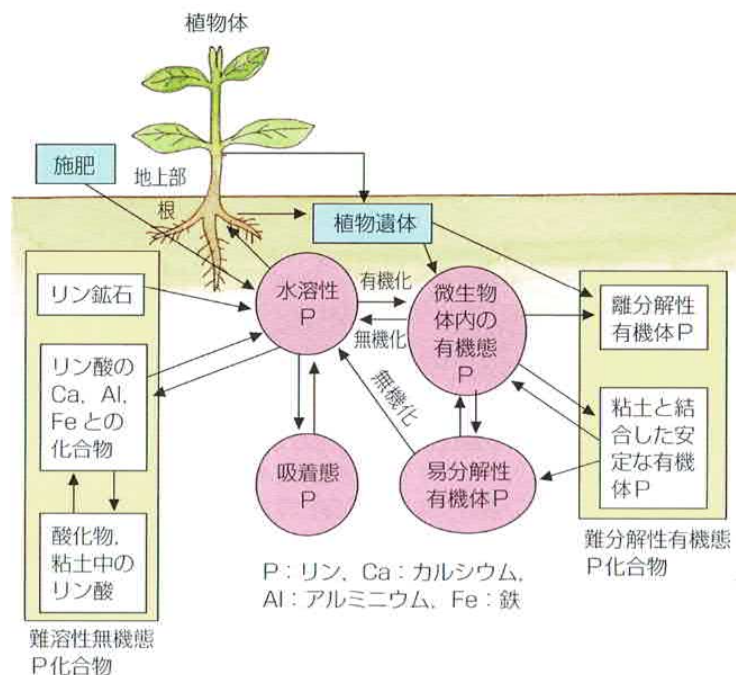
第1図 土壌(培地)中での窒素の形態変化

・リン

リン(P)は、デオキシリボ核酸 (DNA) やリボ核酸 (RNA) などの構成成分である。これらの核酸は植物体内でのタンパク質の合成や遺伝情報の伝達などに重要な働きをする。また、アデノシン三リン酸 (ATP) など、植物体内のエネルギー変換の役割を果たす構成成分でもある。

培地中にイチゴに吸収されやすい形態(可給態)のリンが不足すると、窒素と同じように、吸収されて蓄積されていた下位葉のリンが新しい組織である上位葉に送り込まれる。そのため、リンの欠乏症状は下位葉から現れる。葉が紫色を含んだ濃緑色になり、茎や葉が細く薄くなる。

リンの供給源は動物や微生物由来の有機態と、リン灰石(アパタイト)などの鉱物やこれを原料とした無機態があり、化学合成肥料を施与するイチゴ栽培では主として水溶性の無機態リンが供給される。しかし、無機態リンも有機物を含む培地では、一部の水溶性リンが化学的な形態変化を繰り返して循環している(第2図)。



第2図 土壌(培地)中でのリンの形態変化と循環

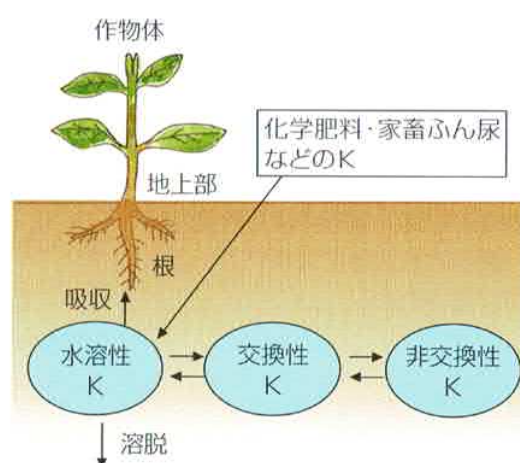
無機態リンは、培地中で吸着活性の高いアルミニウム(Al)や鉄(Fe)と結合して水に溶けにくい難溶性となり、根から吸収されにくくなりやすい(第2図)。イチゴをはじめとした施設園芸用化成肥料では、リンとの結合を防ぐために錯塩(キレート)鉄を配合している肥料もある。

リンは無機態の肥料としては水に溶けやすいリン酸二水素イオン(H_2PO_4^-)がほとんどで、主にリン酸二水素アンモニウム($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)が配合されている。

リンは培地中で拡散しやすい性質があるので全体に薄く分布している。根がその周辺の培地溶液からリン(H_2PO_4^-)を吸収すると、すぐにその周辺のリン濃度が低下して、拡散によるリン濃度の補給では根からのリン吸収速度に対応しきれなくなる。これに対して、植物(イチゴなど)は積極的に根の表面積を増やして、根と培地溶液中のリンが接触しやすい環境を作ろうとする。つまり、根を十分に張り巡らして土壤溶液との接触面を増やすことで、低濃度のリンから必要量のリンを吸収する。したがって、リンの吸収には根張りをよくして根圏を広げる環境を整えることが重要である。

・カリウム

カリウム(K)は、自然界では土壤中の鉱物(長石や雲母)に多量に含まれている。しかし、鉱物中に含まれるカリウムは非交換性でこのままでは根から吸収されない。非交換性カリウムは土壤の風化によって鉱物から徐々に放出されて土壤粒子に引きつけられて保持される。この状態のカリウムは交換性カリウムといい、土壤溶液に溶けている陽イオン(Ca^{2+} や Mg^{2+} など)との交換反応で土壤中に放出されてカリウムイオン(K^+)として水に溶けた状態で存在する(第3図)。しかし、イチゴなど化成肥料で栽培する場合は、カリウムはもっぱら硝酸カリウム(KNO_3)が水に溶けた状態の水溶性カリウム(K^+)として供給される。

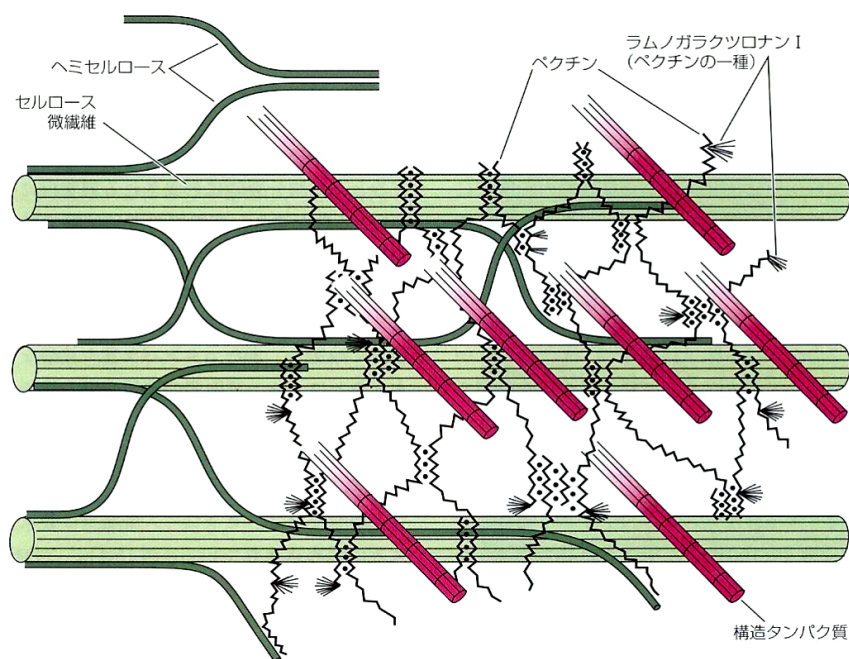


第3図 土壌中でのカリウムの形態変化と循環

カリウムは窒素やリンと違い、植物体内で有機化合物としての存在はなく、常にイオンとして存在しているので、過剰障害が現れることはほとんどない。カリウムの主な働きとしては、細胞内の浸透圧の調整や物質移動の運搬に関わる生理作用を担っている。具体的には、光合成の光リン酸化反応での ATP 生産の促進、タンパク質や炭水化物の合成、移動を助ける体内浸透圧の調整機能などである。現象としては、茎や根を丈夫にし、暑さ寒さに対する抵抗性を高める。さらに、日照不足による成長速度の低下を抑制するなどの作用がある。

・カルシウム

カルシウム(Ca)は、植物体内の有機酸と結合して膜構造維持に重要な働きをしている。たとえば、細胞壁構成要素の一つであるペクチンをつなぎ合わせる架橋体として細胞壁の緩みを抑制して植物体や果実の硬化を促進する(第4図)。植物体内での移動がしにくい成分なので、カルシウムが欠乏すると新葉成長点の組織が崩壊して、葉が奇形となって現れる。カルシウムの供給を主に化成肥料による場合、培地中にカリウムが大量に蓄積しているとカルシウム(Ca^{2+})が多く含まれていてもカルシウム欠乏が起こりやすい。



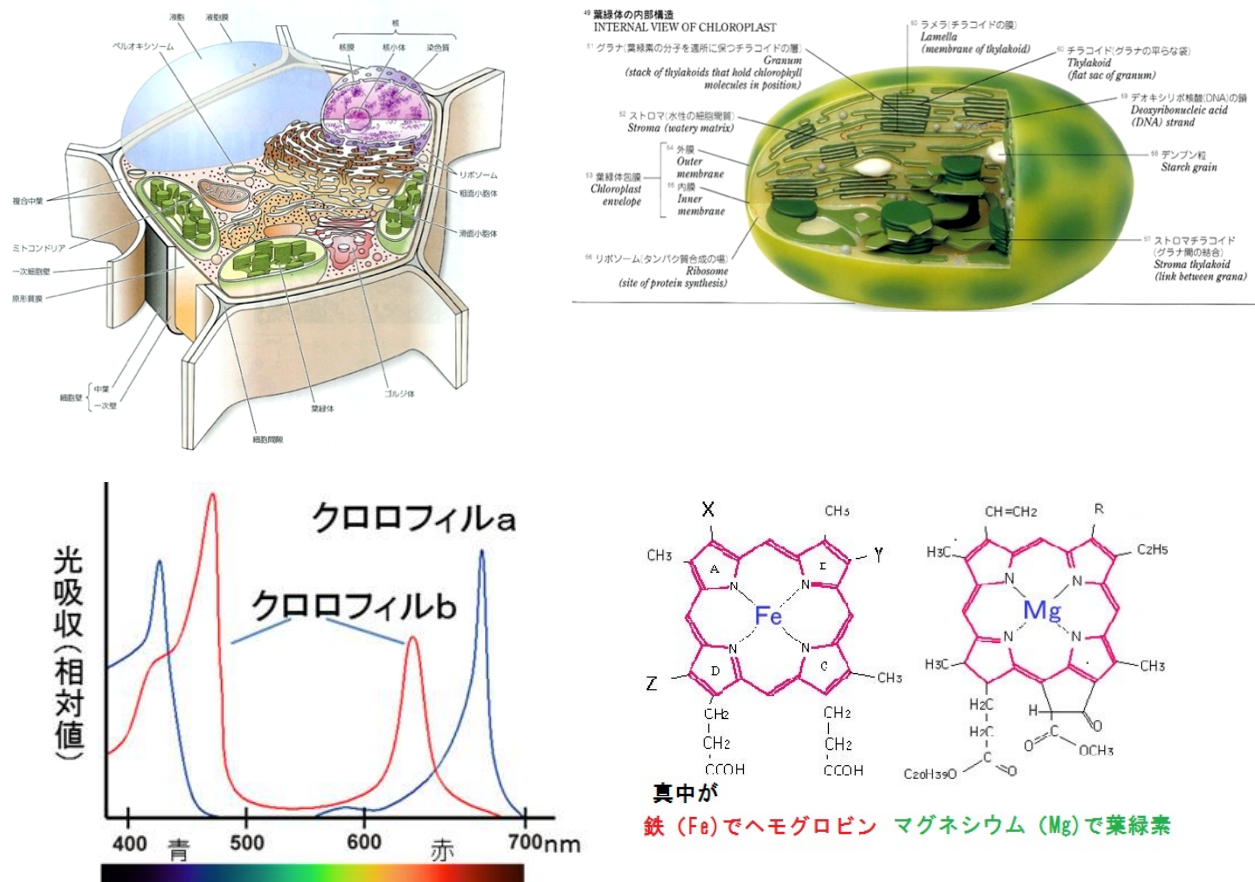
第4図 細胞壁の主要な構造要素とその推定配置

・マグネシウム

マグネシウム(Mg)は、葉緑素の構成要素として植物には欠かせない重要な養分である(第5図)。マグネシウムは植物体内で移動しやすいので、マグネシ

ウムが欠乏すると下位葉から上位葉へと移動する。したがって、欠乏症状は下位葉から発生する。欠乏症状としては、葉緑素が合成されなくなるので、葉脈が緑色でも葉脈の間が黄化したり、黄緑色の斑点が数珠上につながって見えたりする。

培地中に十分なマグネシウム (Mg^{2+}) があっても、カリウム (K^+) が多量に蓄積したところでは、カルシウム (Ca^{2+}) と同じようにカリウム吸収の拮抗作用により、マグネシウムの吸収が低下する。



・イオウ

イオウ (S) は、タンパク質の構成成分で、窒素と非常によく似た働きがある。したがって、その欠乏症状も窒素と区別が付きにくいですが、窒素欠乏との違いは、植物体が比較的大きいにも関わらず、葉色が薄くなるという点である。イチゴを含む一般的な施設栽培では、硫酸マンガン ($MnSO_4 \cdot 5H_2O$) や硫酸マグネシウム ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) などの硫酸根 (SO_4^{2-}) として含まれているので不足することはない。

微量必須元素の機能

・鉄

鉄 (Fe) は、葉緑素の前駆体であるポルフィリンの合成に関わっている。また、光合成の化学反応に関わる酵素の構成成分でもある。このため、鉄が不足すると葉緑素の合成が順調に進まない。したがって、鉄の欠乏症状はマグネシウムとよく似ている。ただし、鉄は植物体内で移動しにくいいため、上位葉から葉脈の黄白化(クロロシス)が進む。一方、マグネシウム欠乏症では、クロロシスが下位葉から始まるので、欠乏症状に違いがでる。

一般に化成肥料を用いる施設栽培では鉄欠乏になることはあまりない。しかし、極端なアルカリ性に培地が傾くと鉄は難溶性の沈殿となるので、鉄欠乏をおこしやすい。このような場合は、培地の pH を適正值まで下げる必要があるが、下げすぎて酸性になりすぎると鉄が過剰にイオン化して培地溶液に溶け出して、逆に、過剰害が発生する。

・亜鉛

亜鉛 (Zn) は、タンパク質合成に関わる酵素の構成成分として重要な働きをして、RNA の分解酵素の活性を調節して、遺伝情報の伝達に関わる RNA レベルの均衡を保持する重要な働きがある。

亜鉛は鉄やマンガンと同じように、培土がアルカリ化すると不溶性となるので、欠乏症状が出やすい。また、リンが過剰な培地条件下では、不溶性のリン酸亜鉛となって析出するので、培地の適正な pH の管理が必要である。

・銅

銅 (Cu) は、葉緑体中のプラストシアニンというタンパク質に多く含まれ、光合成での電子伝達系に重要な働きをしている。

銅も他の微量必須元素と同様に、培地がアルカリ性であると不溶化して根からの吸収が妨げられる。

ホウ素

ホウ素 (B) は、カルシウムと同じようにペクチンの構成成分の一つで、細胞壁の構造維持に重要な働きをする。ホウ素も高いアルカリ性条件下では不溶化して欠乏症状が出やすくなる。ホウ素が欠乏するとカルシウムも欠乏して細胞壁が緩くなり、病原菌の侵入や果実の軟化などの現象として現れる。

- ・モリブデン

モリブデン (Mo) は、硝酸還元酵素の構成成分で、根から吸収された硝酸態窒素からアミノ酸を合成する過程で重要な働きをする。微量必須元素の中でも最も要求量が少ない元素であるので、欠乏症状が出ることは極めてまれである。モリブデンは他の微量必須元素と違い、培地の pH が低下して酸性になることで鉄やアルミニウムと結合して不溶化する。

- ・塩素

塩素 (Cl) は、光合成のチラコイド反応で酸素発生を伴う反応を触媒する働きなどがある。植物体が必要とする十分な量は、雨水、河川、井戸水、水道水など、ほとんどすべての水に十分含まれているので、欠乏症状が出ることはまずない。

- ・ニッケル

ニッケル (Ni) は、最も新しく微量必須元素として認められた元素であるが、植物栄養の研究者すべてが認めたわけではない。作用も植物体内で発生する尿素の分解酵素（ウレアーゼ）の構成成分とされている。