

**銅含有培養液において蛇紋岩および見立礫岩が
植物の初期成長に及ぼす影響**

**The effect of serpentine and Mitate conglomerate on growth of
seedling of plant in copper medium**

北九州市立大学大学院

環境工学専攻 環境バイオシステムコース

2007061005

川端 充生

目次

Abstract

1. 緒言
2. 実験
3. 結果
4. 考察
5. 結言
6. 付録
7. 引用および参考文献

Abstract

土壌の形成基盤である岩石は、種々の重金属を含有しており、岩石から溶出した重金属は植生分布や植物体の生育に影響を及ぼす。蛇紋岩は Ni を含有し、蛇紋岩地に生育する植物の多くは Ni 耐性を有すが、Ni 耐性だけでなく Cu, Co, Cd など他の重金属に対しても相互耐性を示す種もあり、また同じ種でも生態型の違いにより重金属への耐性が異なることも報告されている。本研究では微量栄養素として植物の生育に必要な不可欠で、自然界にも多量に存在する重金属 Cu に着目し、蛇紋岩および見立礫岩の 2 種類の岩石から溶出する重金属と培養液中における Cu の相互作用と、その相互作用がハツカダイコンの初期成長と栄養素・重金属吸収にもたらす影響について研究を行った。

Cu 濃度を調整した Hoagland 培養液に、一定量の見立礫岩、蛇紋岩、石英砂を添加し、20 で 15 日間、ハツカダイコンの水耕栽培を行った。その結果、いずれの岩石を添加した場合にも培養液中の Cu 濃度の増加に伴う主根伸長の減少が観察され、Cu 濃度が 1ppm に達すると植物体の多くは枯死した。Cu 濃度範囲 0~0.1ppm の培養液下では、蛇紋岩あるいは見立礫岩を添加した場合に石英砂を添加した場合と比較して有意に主根が長くなるという結果が得られた。このことから主根伸長は基盤となる岩石の影響を受け、蛇紋岩および見立礫岩には主根を伸長させる作用があることが分かった。

さらに培養液中の Cu 濃度が 0.25ppm に達すると、石英砂を添加したときと同様に見立礫岩を添加した場合にも主根伸長は観察されなかった。一方で蛇紋岩を添加した場合には他の岩石と比較して主根の長さは維持された。また根における Cu 濃度は蛇紋岩添加時 ($677 \pm 48 \mu\text{g/g-DW}$) に石英砂添加時 ($1071 \pm 349 \mu\text{g/g-DW}$) と比較して低い値を記録した。さらに蛇紋岩を添加したとき、葉の乾燥重量は維持され、葉における P, K, Ca 含有量が石英砂添加時と比較して多くなった。この結果から蛇紋岩を添加することによって培養液中の Cu ストレスが軽減され、主根伸長を維持することで、地上部への栄養素 P, K, Ca を十分に供給し、葉の成長を維持したと示唆される。

本研究の結果から、岩石に含有する成分が植物に対する重金属ストレスを緩和することが期待される。

1. 緒言 (Introduction)

植物の生育には無機栄養素が不可欠であり、一般的には植物が健全な機能を果たすために必要な相対的濃度によって、多量栄養素および微量栄養素植物に分類される。植物の必須元素として認知されているのは 17 元素であり、多量栄養素としては C, H, O, N, K, Ca, Mg, P, S が分類され、最も多い酸素と炭素を除くと、乾燥重 1g 当り 1,000-15,000 μg 含まれている。一方で微量栄養素としては Cl, B, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, Ni が属しており、その含有量は多量栄養素の 10^{-2} - 10^{-4} 以下である。

植物体にこれらの無機栄養素を供給し、生育基盤となるのは土壌であり、その土壌は岩石を母材として形成する。岩石から雨水に微量の無機成分が溶出し、岩石上に侵入してきた地衣類あるいはコケ類がその成分を吸収して生育し始める。これらの地衣類、コケ類の生育に伴い有機酸などの分泌物が生成され、これら分泌物が岩石を風化させる。風化した岩石の形状は変化し有機物が堆積して土壌を形成して、やがて高等植物が生育する環境を作り出す。また土壌形成後も岩石層 (C 層あるいは R 層) は植物根に対して物理的、あるいは化学的な影響を与え続ける。岩石から溶出する無機成分は岩石を構成する化学成分によって異なっていることから、基層となる岩石の種類はその基層上に生育する植物個体の成長や植生分布を決定する重要な因子である。

岩石を構成する化学成分には、P, K, Ca, Mg など植物の生育に必要不可欠な無機栄養素が多種含まれている。一方で岩石には、植物の生育を阻害する重金属を多量に含んでいるものも存在する。植物に生育障害をもたらす重金属としては、Ni, Cr, Co, Ti, Cd, Cu, Zn などが報告されている。岩石に含有する重金属は、水環境あるいは土壌中に溶出し植物体に吸収される。これらの重金属の中には、微量栄養素として植物に必須な元素も含まれている一方で、植物体に過剰に吸収されることで生育は阻害される。

これら重金属に対する植物の耐性は多数報告されている。またその耐性も 1 種類の金属だけでなく、数種の金属に対して相互耐性を持つことが近年報告されており、その耐性は植物種だけでなく生態型にも大きく依存している。*Silene vulgaris* の重金属耐性について、Zn, Cd, Pb 耐性を有す生態型では Cu への相互耐性は観察されなかった一方で、Co と Ni に対しては相互耐性を示すことが報告された (Schat and Ten Bookum, 1992)。Cu 耐性を有す *Mimulus guttatus* においては、Cd または Ni への耐性の向上は観察されなかった (Macnair et al., 2000) という報告に対して、Ni 耐性を有す蛇紋岩固有種の個体群では、Cu への相互耐性を示さなかった一方で、Cu 耐性植物 *Sillene paradoxa* の個体群では Ni との相互耐性が見出されている (Gonnelli et al., 2001)。農地土壌、蛇紋岩地、銅鉱山跡といった起源の異なる 3 つの生態型で生育する *Silene ameria* では、農地土壌生態型 *S. ameria* は Cu 毒性に耐性を示さない一方で、蛇紋岩地生態型と銅鉱山跡生態型の *S. ameria* は共に Cu に対して耐性を有し、この耐性を有す 2 つの生態型は、根端の分裂細胞の保護能力を向上させることで Cu 毒性を回避しているが、そのメカニズム生態型により異なっていた。 (Llugany, Lombini and Poschenrieder, 2003)。生態型は、植物の生育環境の適応により遺伝的に形成されるものである。したがって、生育環境を決定付ける一因であ

る岩石が植物の生育に与える影響を評価することは、植生形成を説明する上で重要であるが、岩石の影響を評価した例はほとんどない。

そこで本研究では、岩石が植物の栄養素吸収と初期成長に及ぼす影響、ならびに重金属耐性に及ぼす影響を評価することを目的とした。重金属としては Cu に注目した。Cu は貴重な資源として自然界に多量に存在する一方で、足尾銅山を始めとした公害の歴史を持つ有毒な重金属であり、Cu 汚染土壌の修復も重要な課題である。本研究では、Cu を含有させた培養液に岩石を添加し、岩石が植物の Cu 耐性に及ぼす影響を評価した。

2. 実験 (Materials and Methods)

2-1. 試料

● 蛇紋岩 (Serpentine rock)

蛇紋岩は、重金属 Cr, Ni, Co を多量に含有する代表的な岩石として多くの報告がなされている。蛇紋岩はカンラン岩が広域変性作用や変質作用を受けて形成される岩石であり、USA の西海岸やキューバ、イギリス、スペイン、イタリア、南アフリカ、ニューカレドニア、ニュージーランド、オーストラリア南西部など世界各国に分布し、日本においても北部では北海道の神居古潭変成帯、南部では糸魚川-静岡構造線から九州まで連なる黒瀬川構造体や三波川変成帯に至るまで幅広く分布している。蛇紋岩基層では、N, P, K の必要不可欠な多量栄養素が不足しており、Ni, Cr, Co といった植物に有害な重金属を高濃度含んでいる。また蛇紋岩地の重要な特徴として Ca/Mg モル比が非常に小さい (< 1) ことが周知されている (Kuruckeberg 1984)。このような化学的性質により蛇紋岩土壌に植生する植物では、身長や密度の縮小や根の伸長などの特徴を示す (Kuruckeberg 1984, Brooks 1987)。

蛇紋岩は風化を受けやすくもろく崩れやすいために、蛇紋岩基層に形成する表土層は比較的薄い。そのため侵食や採掘などの侵害によってその表土層を失いやすく、その結果保水性やカチオン交換容量、有機物量、植物必須栄養素、植物種子、菌根の栄養分などを損失する。さらに蛇紋岩基層では有害な重金属の他にも肺がんの原因となるアスベストを高濃度に含んでいることから、基層表面を植物被覆することが重要視され、蛇紋岩地の緑化方法について研究報告が多くなされている (O'DELL & CLAASSEN 2006)。また蛇紋岩地においては、過剰な Ni が農作物 (ダイコン) に生育障害をもたらすことも報告されている (前川、加護谷、田中、日下 1977)。

蛇紋岩は超塩基性の深成岩であり、色指数を指標にした分類では超マフィック岩 (超苦鉄質岩) に属する。主に蛇紋石からなり、まれに少量のマグネタイト、クロマイト、炭酸塩鉱物などを伴っている。蛇紋石や炭酸塩鉱物には網状構造がよく見られる。蛇紋岩はカンラン岩が変成作用を受けて形成する。カンラン岩が約 600 以下の温度下で熱水と反応することで、カン

ラン岩に含まれるカンラン石と輝石が蛇紋石に変化する。蛇紋石はリザータイト、クリソタイル、アンチゴライトなどの多形（同質異像）鉱物により構成される。変成作用が比較的低温で起こった場合にはリザータイトやクリソタイル、高温で起こった場合にはアンチゴライトに変化し、蛇紋石の構成鉱物となる（周藤、小山内 2004）。この中で石綿の原料となるのはクリソタイルであり、アスベスト症を発症する原因物質である。

本研究では三波川変成帯（中生代白亜紀）に属する大分県大分市大黒（佐賀関半島）にて採集した蛇紋岩を用いた。三波川変成帯は糸魚川-静岡構造線の南側に沿って関東山地から九州東部の佐賀関半島まで連続する高圧型系列の変成帯である。採集した蛇紋岩について粉末 X 線回折を行った結果、主要な鉱物はアンチゴライトであった。また蛍光 X 線分析を行ったところ、Si の含有量は 36.3% と比較的小さく、一方で Fe (26.5%) および Mg (29.2%) を多量に含んでいた。また特徴的な化学成分としては Ni (1.77%) および Cr (0.83%) が比較的多量に含有していた (Table 1)。

● 見立礫岩 (Mitate Conglomerate)

見立礫岩は 1920 年加藤によって命名された岩石であり、宮崎県西臼杵郡日之影町見立鉱山付近を模式地とする含花崗質岩礫岩である（加納、吉田、蛸子 1961）。見立礫岩が分布する周辺地域では、秩父帯に属する地層と岩石が産地の大部分を占め、それらを不整合に覆って祖母山や傾山を中心に新第三紀の堆積岩と祖母山火山岩類が分布している（日本地質図大系九州地方 1995）。秩父帯に属す見立層は新第三紀中新世前期の堆積層であると考えられており、日之影川上流の山岳地帯に分布する礫岩層と砂岩層で形成されている。礫厚は 200-400m+ で東方ほど厚くなっており、礫径は 10-20cm で 1m に達するものもある。礫岩は亜円-亜角礫の巨礫、大礫、中礫が入り混じっており、礫種は砂岩、花崗岩、頁岩、チャート、珪質岩などである。礫は大崩山花崗岩類によって熱変成を受け、ホルンフェルス化している。

見立礫岩について粉末 X 線回折（リガク・XPD-DSC-X）を行った結果、主要な構成鉱物として石英（Quartz : SiO_2 ）、曹長石（Albite ; $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$ ）が得られた。蛍光 X 線分析を行った結果、Si を主要成分として、Fe, K, Al を多量に含み、Ca, Mg, P の多量栄養素の他にも Ti, Mn, Sr, Zr などの重金属を含んでいた (Table 1)。このように見立礫岩は非常に多種の化学成分を含んだ岩石である。

見立礫岩の既知な用途として、温浴施設である岩盤浴に利用され流通しているが、研究報告はなされていない。見立礫岩の Zr, Sr, Ti などの貴金属を有しており、この化学性から天然資源としての有用性も期待される。本研究では見立礫岩の新規用途の開拓を目標として、見立礫岩の生態生理学な効果を検証した。

2-2. 方法

(1) 植物栽培

見立礫岩および蛇紋岩が植物体の初期成長に及ぼす影響を調査するため、各岩石を添加した培養液を用いて植物体の水耕栽培を行った。植物体としては、短期間で十分な初期成長が期待でき、根菌の影響評価が不必要なアブラナ科の白長ハツカダイコン (*Raphanus sativus*; 株タキイ種苗、商品名: アイシクル) を用いた。

見立礫岩および蛇紋岩は、粉碎して粒径 1-2mm に篩い分けしたものを扱い、培養液 50mL に対して絶対乾燥重量 2 g を精密天秤で量りとして添加した。培養液としては 50% Hoagland 培養液 (組成: Table 2) を扱い、Cu 濃度を 0, 0.005, 0.02, 0.1, 0.25, 0.5, 1ppm の 7 段階に設定した。コントロールとしては、物理的影響を考慮して石英砂 (Silica sand; 株関東化学、粒径 0.2-1mm) を培養液に添加し、他種岩石と同条件で栽培を行った。

培養は試験管 (外径 30mm、内径 28mm、長さ 200mm) にシリコンチューブをはめ込み、メッシュ上に播種して行った (Fig.)。試験管上部は、大気が循環する様に 10 箇所穴を開けたパラフィルムでフタをした。播種後、GROWTH CHAMBER 内に設置し、温度 20 °C、光量子密度 $220.6 \pm 0.1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、照射時間 24L の一定条件で培養を行った。栽培期間は、播種日を 0 日として 15 日、31 日間とした。31 日間の栽培については岩石未添加の条件も設定した。

15 日間の栽培した植物体は、写真撮影後、超純水で洗浄し、80 °C で 48 時間以上乾燥させ重量を測定した。また撮影した画像から主根の長さを測定した。植物体は超純水で洗浄し、80 °C で 48 時間以上乾燥させた後、根、茎、葉、子葉の各乾燥重量を測定した。乾燥重量測定後、根、茎、葉、子葉の各部位を加えた試験管に、硝酸 2mL、過塩素酸 400 μL 、硫酸 200 μL を加えて湿式分解を行った。ドライブロックバスを 110 °C に設定して 2 時間以上加熱し、室温で放冷後に超純水 1.4mL を加えて 130 °C で 1 時間程度加熱した。さらに放冷後、10mL に定容し、メンブランフィルター (0.02mm) でろ過し、高周波誘導プラズマ発光分光分析装置 ICP-AES (パーキンエルマー・Optima 4300DV) で多量栄養素 P, K, Ca, Mg ならびに重金属 Cu, Ni, Fe の含有量を測定した。

31 日間栽培した植物体については、写真撮影後に実体顕微鏡で観察ならびに側根数を計測した。撮影した画像から根および茎の長さ、葉面積を算出した。植物体は超純水で洗浄し、80 °C で 48 時間以上乾燥させた後、根、茎、葉、子葉の各乾燥重量を測定した。

(2) エチレンの定性的評価

エチレンは代表的な植物ホルモン的一种であり、エチレン先駆体 1-アミノシクロプロパン-1-カルボン酸 (ACC) として植物根で生成され求基的に輸送される。植物体内で生成されたエチレンは、主根の伸長抑制や毛根の発達、葉の成熟など、植物の形態に大きな変化を及ぼす。本研究では、岩石が植物の形態変化に及ぼす影響とエチレン生成の関係を明らかにするため、エチレンの定性的評価を行った。

(2-1) 銀イオンの添加

植物のエチレン生成およびその効果の阻害剤として銀イオンが周知されている（高田, 1981 ; M. Beyer, 1979 ）。Hoagland 培養液中の Cu 濃度を 0, 0.1, 0.25ppm に調整し、培養液中の Ag^+ 濃度が 0.01mM, 0.1mM になるように硝酸銀を加えた。培養液に播種後、(1)と同様の条件で 15 日間栽培し、主根の伸長量を観察した。添加した岩石種は見立礫岩、蛇紋岩、石英砂の 3 種、反復数は 3 とした。

(2-2) 培養液中のエチレンの測定

植物体内で生成されたエチレンが培養液中に放出され、植物の主根の伸長に影響を及ぼしている可能性を検証するため、培養液中のエチレンの測定を行った。

超純水で湿らせた脱脂綿上にハツカダイコンの種子を播種し発芽させた。発芽から 2 日目の幼苗 5 個体を無作為にメッシュ上に移し、岩石を添加した Cu 濃度 0, 0.1, 0.25ppm の Hoagland 培養液に移し、播種から 15 日間栽培した。

15 日間の栽培後、植物体を取り出した培養液 40mL を、真空にした真空捕集ビンにシリンジで打ち込み、培養液（液相）中の気体を気相に追い出した。真空捕集ビンに窒素を流し込み、大気圧に戻した後、ガスタイトシリンジでヘッドスペースの気体を抜き取り、ガスクロマトグラフで測定した。機器は GC-148B、キャリアガスは N_2 （流量：30mL/min、圧力 600kPa）、使用カラムはステンレスカラム 2.0mm×3.0mm、注入口温度 200、検出器は FID（200）を使用した。

(3) 統計分析

統計には分散分析を採用した（SPSS for Windows スタンダードバージョン）。因子は岩石種（見立礫岩、蛇紋岩、石英砂）、培養液中 Cu 濃度（0, 0.005, 0.02, 0.1, 0.25, 0.5, 1ppm）とし、各パラメータに有意差をもたらす主因子を調査した。さらに分散分析の結果より、有意確率 5% 以下の因子について、Tukey を用いて多重比較検定を行った。

3. 結果 (Results)

3-1. 植物栽培

(1) 各器官の初期成長 (乾燥重量) と形態的变化 (主根伸長、茎伸長、比葉面積)

Cu 濃度を 0, 0.005, 0.02, 0.1, 0.25, 0.5, 1ppm の 7 段階に設定した Hoagland 培養液に、見立礫岩あるいは蛇紋岩、石英砂をそれぞれ添加して、15 日間ならびに 31 日間栽培したハツカダイコンの主根伸長 (Fig.2a : 15 日間栽培試料、2b : 31 日間栽培試料、Table 3a) 茎伸長 (Table 3c) 比葉面積 (以下 SLA ; Specific Leaf Area) (Table 3d) を画像解析からそれぞれ算出した。また各岩石を添加した場合の植物体の根、茎、葉、子葉の乾燥重量を Fig.1 に示した (31 日間栽培した場合には、葉、子葉の落葉が観察されたことから、葉と子葉の乾燥重量は示していない。SLA は落葉していない葉から算出した)。

15 日間栽培した植物体の根および茎の身長、各部位 (根、茎、葉、子葉) 乾燥重量、植物体乾燥重量、さらに 31 日間栽培した植物体の根、茎の身長ならびに乾燥重量、SLA、側根数 (Table 3b) について、二元配置分析を行った。15 日間の栽培では、添加する岩石種の違いによって主根身長 ($p < 0.001$)、植物体乾燥重量 ($p < 0.01$) ならびに葉の乾燥重量 ($p < 0.05$) に有意差が生じ、培養液中の Cu 濃度の違いによって主根身長および植物体乾燥重量、根、葉、子葉の各乾燥重量に有意差が生じた ($p < 0.001$)。また 31 日間の栽培では、岩石種の違いによって主根身長 ($p < 0.001$)、側根数 ($p < 0.01$)、SLA ($p < 0.01$) に有意差が生じ、Cu 濃度の違いによって主根身長 ($p < 0.001$)、側根数 ($p < 0.001$)、根 ($p < 0.001$) および茎乾燥重量 ($p < 0.01$)、SLA ($p < 0.001$) に有意差が生じた。

植物体の乾燥重量は、添加岩石種に限らず Cu 濃度の増加に伴って減少した (Fig.1)。コントロールでは、培養液中の Cu 濃度の増加に伴って減少し、0.5ppm 以上では 0, 0.005ppm と比較して有意に小さい値を記録した。見立礫岩を添加した場合には、乾燥重量は 0ppm で最大値を記録し、0.02ppm で一度減少するものの 0.1ppm で乾燥重量は増加し、0.25ppm を超過すると有意な減少を示した。蛇紋岩

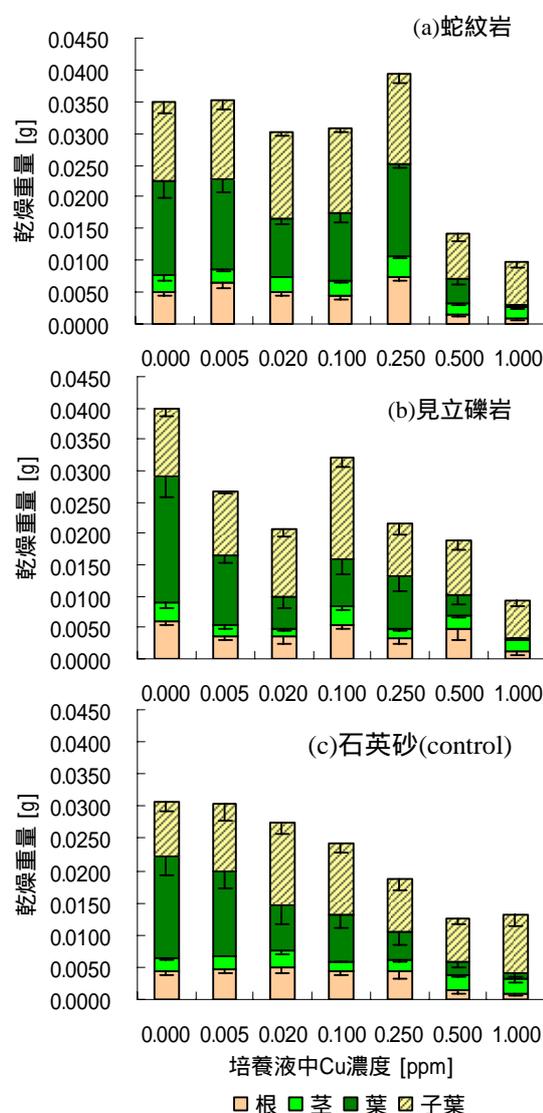


Fig.1.ハツカダイコンの乾燥重量; 15 日間栽培後、80 で 48h 以上絶乾); (a)蛇紋岩添加、(b)見立礫岩添加、(c)石英砂添加、bar : 標準誤差を示す。

を添加した場合には、Cu 濃度 0.25ppm に達するまで

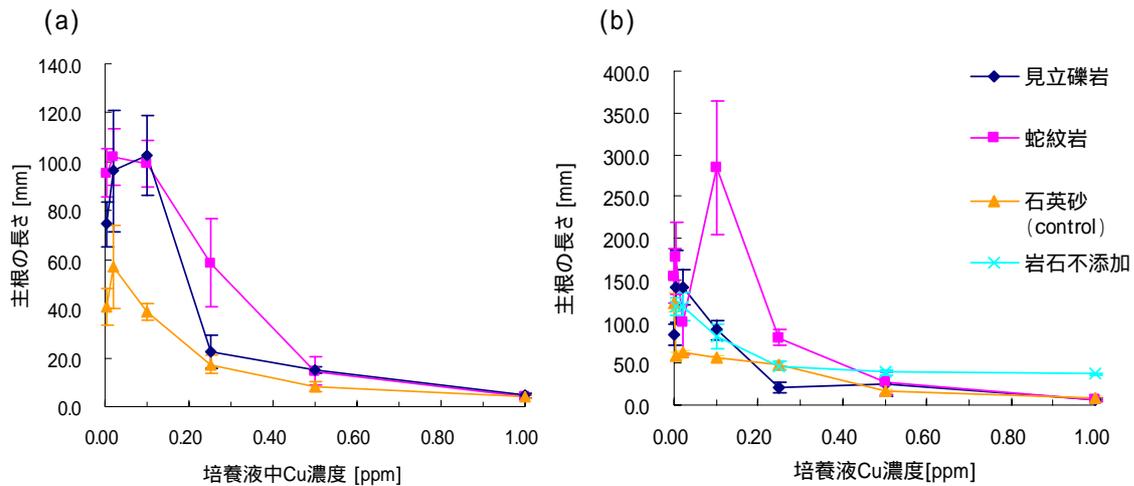


Fig.2. ハツカダイコンの主根身長；(a) 15 日間栽培、(b) 31 日間栽培、bar は標準誤差

乾燥重量は維持され、0.5ppm 以上で有意な減少を示した。器官別に見ると、根および葉の乾燥重量は、培養液中 Cu 濃度の増加に伴って添加岩石種に限らず有意に減少した一方で、茎の乾燥重量に有意な減少は見られなかった。子葉の乾燥重量は、コントロールでは Cu 濃度の変化に伴う有意な増減は認められなかった一方で、見立礫岩添加時には Cu 濃度 0.25ppm 以上、蛇紋岩添加時には Cu 濃度 0.5ppm 以上で有意に小さい値を記録した。

15 日間ならびに 31 日間栽培したハツカダイコンの主根の長さは、乾燥重量と同様に培養液中の Cu 濃度の増加に伴って減少した (Fig.2A,B、Table 3a)。15 日間栽培したハツカダイコンについて、Cu 濃度 0-0.1ppm の範囲では、蛇紋岩あるいは見立礫岩のいずれを添加した場合にもコントロール (石英砂添加) より大きな平均値を記録した。このうち蛇紋岩を添加した場合には Cu 濃度 0.005, 0.1ppm 培養液で、見立礫岩を添加した場合には Cu 濃度 0.1ppm 培養液でそれぞれ有意差が認められた。Cu 濃度 0.25ppm の培養液では、見立礫岩を添加した場合にコントロールと同様に主根伸長は抑制された一方で、蛇紋岩を添加した場合には半数の試料で主根伸長が維持されていた。培養液中 Cu 濃度が 0.5ppm に達すると、いずれの岩石を添加した場合にも主根伸長は抑制された。31 日間栽培した試料についても、15 日間栽培した試料と同様の傾向が見られたが、見立礫岩を添加した場合にはコントロールとの有意差は認められなかった。一方で蛇紋岩を添加した場合には、Cu 濃度 0.1, 0.25ppm の培養液でコントロールとの有意差が認められた。

31 日間栽培したハツカダイコンの側根数は、いずれの岩石を添加した場合にも培養液の Cu 濃度が 0ppm のとき最大値を示した (Table 3b)。Cu 濃度の増加に伴って側根数は減少したが、蛇紋岩を添加した場合には、Cu 濃度 0.25ppm でコントロールと比較して有意に大きな値を記録した。一方で見立礫岩を添加した場合には、いずれの Cu 濃度においてもコントロールとの有意差は認められなかった。Cu 濃度が 0.25ppm を上回ると、側根の発達の抑制が多数の植物試料において観察されたが、側根の発達を示すパラメータは測定しておらず、評価は困難であ

った。

SLA は単位葉量当りの葉面積で表され、葉の厚さを示す指標である。すなわち SLA 値が大きいほど葉量に対して葉面積が大きく、薄い葉であることを示している。コントロールでは Cu 濃度が 1ppm の時に最大値を示し、蛇紋岩を添加した場合にも同様に Cu 濃度 1ppm で最大値を記録した (Table 3d)。蛇紋岩を添加した際には、Cu 濃度 0.005-0.1ppm の範囲において SLA 値は比較的小さく、0.005ppm のときに最小値を記録した。一方で見立礫岩を添加した場合には、蛇紋岩とは対照的に Cu 濃度 0.005ppm のとき最大値を記録し、コントロールと比較しても有意差が認められた。また有意差は認められなかったが、Cu 濃度 0.02, 0.1ppm の培養液に見立礫岩を添加した場合にも SLA は大きな値を記録した。このことから Cu 濃度 0.005-0.1ppm の培養液において見立礫岩を添加した場合には薄い葉が、蛇紋岩を添加した際には厚い葉が形成されることが分かった。このような SLA 値の相違は、光合成機能に大きな影響を与えることが考えられることから、岩石が光合成能に与える影響を検証する上で興味深い結果となった。

31 日間栽培したハツカダイコンの茎の身長については、添加する岩石、培養液中の Cu 濃度に関わらず有意差は得られなかった (Table 3c)。

(2) 各器官における多量成分含有量 (N, P, K, Ca, Mg)

15 日間栽培したハツカダイコンの根、茎、葉、子葉の各部位における P, K, Ca, Mg の含有量を測定した (Table 4)。添加岩石種ならびに培養液中 Cu 濃度の 2 因子について二元配置分散分析を行った結果、添加する岩石種の違いが因子となって、茎における P ($p < 0.05$) および K ($p < 0.05$)、葉における P ($p < 0.05$)、Ca ($p < 0.01$)、Mg ($p < 0.01$)、子葉における P ($p < 0.01$)、Ca ($p < 0.05$)、Mg ($p < 0.01$) 含有量にそれぞれ有意差が認められた。また培養液中 Cu 濃度の相違によっては、根、茎、葉、子葉の全ての部位における P, K, Ca, Mg 含有量に有意差が認められた ($p < 0.001$, 子葉における Mg 含有量のみ $p < 0.01$)。

P 含有量は、いずれの岩石を添加した場合にも Cu 濃度 0.1ppm の培養液で最大値を示し、特に見立礫岩を添加した場合に大きな値を示した (Table 4a)。蛇紋岩添加では、Cu 濃度 0.25ppm 培養液で栽培した際の根および葉において、見立礫岩添加では、Cu 濃度 0.1ppm 培養液で栽培した際の茎および葉においてコントロールと比較して有意に大きな値を記録した。

K 含有量は、いずれの岩石を添加した場合にも類似した吸収傾向を示し、培養液中 Cu 濃度 0.1ppm のときに最大値を示した (Table 4b)。蛇紋岩添加では Cu 濃度 0.1ppm 培養液における茎、0.25ppm 培養液における葉、見立礫岩添加では Cu 濃度 0.02ppm ならびに 0.1ppm 培養液における茎の K 含有量について、コントロールとの有意差が認められた。

Ca 含有量についても K と同様に、添加岩石種に関係なく Cu 濃度 0.1ppm 培養液で栽培した場合に最大値を記録した (Table 4c)。Cu 濃度 0.1ppm 培養液に蛇紋岩あるいは見立礫岩のいずれを添加した場合にも、茎における Ca 含有量がコントロールと比較して有意に大きな値を記録した。また蛇紋岩に関しては、Cu 濃度 0.25ppm 培養液に添加した場合の葉における Ca 含有量についても、コントロールと比較して有意に大きな値を示した。

Mg 含有量も Cu 濃度 0.1ppm 培養液で栽培した場合に最大値を記録し、特に蛇紋岩を添加したときに大きな値を示した (Table 4d)。蛇紋岩の添加では、Cu 濃度 0.005ppm 培養液で栽培した茎、0.1ppm 培養液で栽培した根および茎、0.25ppm 培養液で栽培した根、葉、子葉、0.5ppm 培養液で栽培した茎、子葉の各部位において、コントロールと比較して有意に多量の Mg が含有していた。見立礫岩添加では、各部位における Mg 含有量にコントロールとの有意差は認められなかった。

(3) 各器官における微量成分 (重金属) 含有量 (Fe, Ni, Cu)

多量成分と同様に、15 日間栽培したハツカダイコンの根、茎、葉、子葉の各部位における微量成分 Fe, Ni, Cu の含有量を測定した (Table 5a,b,c)。多量成分含有量と同様に二元配置分散分析を行った結果、添加する岩石種の違いが因子となって、根における Fe ($p<0.001$)、Ni ($p<0.001$)、茎における Cu ($p<0.05$)、葉における Ni ($p<0.001$)、子葉における Cu ($p<0.01$)、Fe ($p<0.01$)、Ni ($p<0.05$) 含有量にそれぞれ有意差が認められた。また培養液中 Cu 濃度の相違によっては、根における Cu ($p<0.001$)、Fe ($p<0.001$)、Ni ($p<0.01$)、茎における Cu ($p<0.001$)、Fe ($p<0.001$)、Ni ($p<0.001$)、葉における Fe ($p<0.01$)、子葉における Cu ($p<0.001$)、Fe ($p<0.001$) 含有量にそれぞれ有意差が認められた。

Cu の含有量は、培養液中の Cu 濃度の増加に伴い増加した (Table 5a)。しかし蛇紋岩を添加した場合には培養液中 0.25ppm で最大値を示し、0.5ppm を超過すると減少した。これは 0.5ppm 以上で生育が抑制されたためであるといえる。Cu は根および子葉に多く供給される傾向が見られた。

Fe の含有量は、コントロールあるいは見立礫岩を添加した場合には Cu 濃度 0.1ppm のときに最大値を記録したが、蛇紋岩を添加した場合には 0.1ppm ではコントロールと比較して有意に低い値を示し、0.25ppm で最大値を記録した (Table 5b)。コントロールでは Fe は根あるいは子葉に多く供給されていたが、見立礫岩を添加した場合には比較的葉にも多く分配されていた。

Ni は Hoagland 培養液中には含有しておらず、蛇紋岩由来の成分である。蛇紋岩を添加した場合の Ni の含有量は、培養液中の Cu 濃度の増加に伴って有意な減少を示し、Cu 濃度が 0.5ppm に達すると吸収量は大きく低下した (Table 5b)。

3-2. エチレンの定性的評価

(1) Ag⁺添加実験

エチレンの生成および効果を阻害する Ag⁺を培養液中に添加してハツカダイコンの栽培を行った。各 Ag⁺濃度で 15 日間栽培した際の主根伸長量を Fig.4 に示したが、Ag⁺添加による主根伸長量の有意な変化は、観察されなかった。

(2) 培養液中エチレンの測定

エチレン標準ガス（純エチレン 99.5%；ジーエルサイエンス株）を用いて培養液中のエチレンを測定した結果、保持時間 11 分付近にエチレンのピークが検出された。

真空管を用いて培養液中から気相に脱気した気体を測定したが、培養液中 Cu 濃度、添加岩石種に関係なく、エチレンのピークを観察することは出来なかった。検出限界の測定を未実施のため、エチレンの生成の有無を検証することは困難であった。

4. 考察 (Discussion)

4-1. 蛇紋岩による Cu ストレスの緩和効果 (Ni と Cu の競合的吸収)

15 日間栽培したハツカダイコンの乾燥重量について、コントロールでは Cu 濃度の増加に伴って有意に減少したが、このとき茎および子葉の乾燥重量は有意な減少を見せず、根および葉の乾燥重量のみ有意に減少した (Fig.1c)。一方で蛇紋岩を添加した場合には、Cu 濃度が増加しても乾燥重量は十分に維持され、Cu 濃度 0.25ppm において根および葉の乾燥重量は最大値を記録した (Fig.1a)。Cu 濃度 0.25ppm の培養液でハツカダイコンを栽培した際、見立礫岩添加時、あるいはコントロールでは主根伸長が完全に抑制されていた一方で、蛇紋岩を添加した際には半数の試料で主根伸長が維持されていた (Fig.2a, Table 3a)。31 日間の栽培では、Cu 濃度 0.25ppm の培養液に蛇紋岩を添加したとき、コントロールと比較して有意な主根伸長が認められた (Fig.2b, Table 3a)。この結果から、蛇紋岩によって培養液中の Cu ストレスが緩和され主根伸長が維持されたと考えられる。また Cu 濃度 0.25ppm 培養液に蛇紋岩を添加したとき、側根数もコントロールと比較して有意に大きな値を示していた (Table 3b)。この側根数の増加は主根伸長の維持によって生じたと考えられる。

Cu0.25ppm 培養液に蛇紋岩を添加した際、葉における P, K, Ca, Mg 含有量が、コントロールと比較して有意に大きな値を記録した (Table 4a,b,c,d)。根の重要な機能として、地上部への栄養素供給能がある。根は土壌中においてより広範囲から養分を取り入れるために側根と根毛を

発達させ、表面積を広げることで多量の栄養素を吸収するため、側根の発達は地上部への栄養素を供給する上で極めて重要である。したがって Cu0.25ppm 培養液に蛇紋岩を添加した際の、葉における栄養素供給量の増加は、主根伸長の維持に伴う側根数の増加が要因となっていると考察できる。Cu 濃度 0.25ppm に達しても葉における乾燥重量が維持されたことも、葉の発達に必要な栄養素が十分に供給されたためであると考えられる。以上の結果から、蛇紋岩を添加することで、Cu 毒性下においても地上部の発達を維持することができた。すなわち蛇紋岩には Cu 毒性を緩和し、植物の成長を補助する効果があることが明確に示された。

蛇紋岩が Cu 毒性を緩和するメカニズムを検証するため、根における Cu 濃度と主根伸長の関係を示した (Fig.3a,b,c)。培養液中 Cu 濃度 0.25ppm に蛇紋岩を添加したとき、根における Cu 濃度はコントロールと比較して低い値を記録した。したがって、蛇紋岩を添加することによって根における Cu の濃度が低減され、Cu ストレスを軽減することができたと考えられる。

また蛇紋岩の Cu ストレス緩和効果には、蛇紋岩に含有する Ni が関与していたと推察される。蛇紋岩から Hoagland 培養液に Ni が溶出してくることは確認されており、実際に植物体にも吸収されていた (Table 5c)。根における Cu と Ni 濃度の関係を Fig.4 に示した。培養液中の Cu 濃度が 0.005, 0.02, 0.1ppm と低濃度の培養液においては、根に Ni が吸収されていた。しかし培養液中の Cu 濃度が 0.5ppm に達すると、根における Cu の吸収量が急激に増加し、Ni の吸収量は低減した。培養液中の Cu 濃度が 0.25ppm のときには、根における Cu の吸収量が増加しているが、その一方で Ni も十分に吸収されていた。このように Ni と Cu は競合的に吸収された

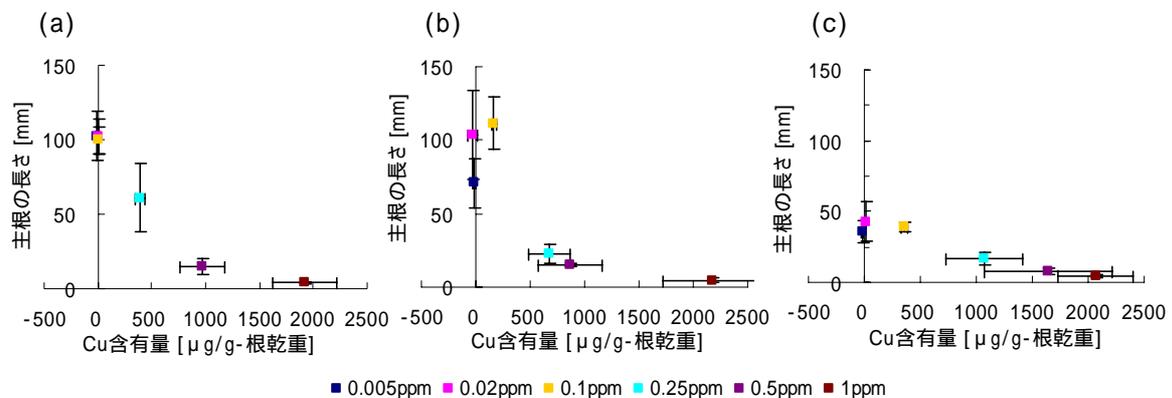
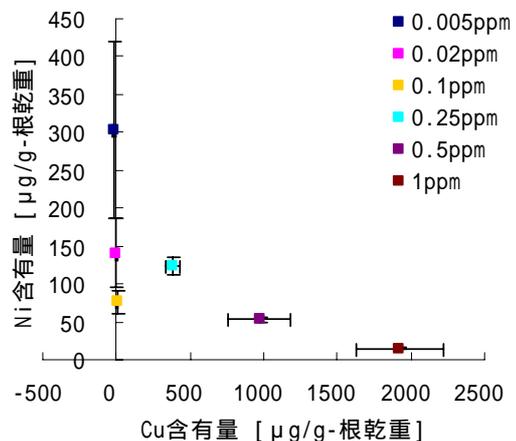


Fig.3. 根における Cu 濃度と主根伸長量の関係 (上); (a)蛇紋岩添加、(b)見立礫岩添加、(c)石英砂添加 (control) 凡例は培養液中の Cu 濃度を示す、栽培期間は 15 日間、bar は標準誤差 SE

Fig.4.(右) 根における Cu と Ni の関係(蛇紋岩添加) ; 凡例は培養液中の Cu 濃度、栽培期間は 15 日間、bar は標準誤差 SE



と示唆された。この考察を実証するためには、(1)各 Cu 濃度の培養液に蛇紋岩を添加した際に溶出する Ni の含有量を明らかにすること、(2)コントロールに溶出量に相当する Ni を添加し、同様の曲線が得られるか検証する必要がある。しかし、Ni だけでなく Fe や Zn、Mn など他の金属が相互的に作用している可能性もあるため、Ni だけでなく種々の金属の相互作用を解析しなければならない。

4.3. 主根伸長とエチレンの関係（エチレン生成抑制剤としての岩石の有用性の検証）

Cu 含有培養液に蛇紋岩あるいはを添加することによって、ハツカダイコンに有意な主根伸長の増加が観察された（Fig.2a,b、Table 3a）。主根伸長に大きな影響を及ぼす因子として、植物ホルモンの一種であるエチレンが作用している可能性について考察した。

一般に、エチレンは根の伸長生長を阻害し肥大生長を促進する。蛇紋岩あるいは見立礫岩を添加した場合、培養液中の Cu 濃度が 0-0.1ppm の範囲においてもコントロールと比較して主根伸長が促進された。したがって蛇紋岩あるいは見立礫岩を添加スルコトによってエチレン生成が抑制され、主根伸長が促進されたと仮説立てた。

この仮説を実証するために、エチレンの阻害剤である Ag^+ を培養液中に添加して主根伸長を観察した。岩石の添加によりエチレン生成を抑制しているのであれば、 Ag^+ を添加することによって、コントロールにおいても主根伸長が促進すると推測した。しかし、 Ag^+ を添加した場合にもコントロールにおける主根伸長の促進は見られず、一方で蛇紋岩あるいは見立礫岩を添加した場合の主根伸長がやや抑制された（有意差はなし）。根が浸水することにより比較的低濃度のエチレンが根の伸長を促進する場合もあることから、本研究からは、蛇紋岩あるいは見立礫岩がエチレンの生成を抑制あるいは促進したかを決定付けることはできない。

本研究の方法では培養液中のエチレンを脱気して回収したが、回収率の測定が必要である。また本研究では水耕栽培を行ったが、エチレンの前駆物質 ACC がエチレンに変換されるためには十分な酸素が必要である。したがって水耕栽培条件下では、根における酸素欠乏が生じるために、ACC の状態で地上部に輸送されてからエチレンに変換される可能性が高い。この結果から、本実験条件下で岩石がエチレンの生成にもたらす地上部で生成され発散されるエチレンの測定、あるいは植物体内の ACC 量を測定することが必要である。また根の伸長生長を検証する上では、エチレンだけでなく、インドール酢酸やアブシジン酸などの植物ホルモンとの相互作用も考慮して検証していく必要があるといえる。

5. 結言 (Conclusion)

5-1. 結果のまとめ

- (1) 蛇紋岩を添加することで、培養液中の Cu 毒性を緩和し、植物根の発達（主根伸長と側根発現）による地上部への栄養素供給機能の維持により、葉の発達を補助するという効果が期待された。
- (2) Cu 培養液に蛇紋岩を添加することで、根において Ni と Cu が競合的に吸収されている可能性が示唆された。この競合的吸収により、Cu の吸収が抑制され、Cu ストレスを緩和したというプロセスが推察された。
- (3) 蛇紋岩や見立礫岩がエチレンの生成抑制剤として機能している可能性を検証したが、本研究では解析に至らなかった。

5-2. 今後の課題

本研究では溶液中の重金属の相互作用の解析が不十分である。各 Cu 濃度の培養液における、種々の岩石中の重金属の溶出量と、Cu を含めた培養液中の各成分の動態を明確にすることで培地環境を正確に把握することが必要である。

岩石の効果としてエチレンの生成を抑制している可能性を挙げたが、十分な検証が必要である。本研究と同じ水耕栽培の実験系においても、密閉空間でハツカダイコンを栽培し、地上部から発散されるエチレン量を測定することが望まれる。また植物体中のエチレン前駆物質 ACC を測定することで岩石がエチレン生成に及ぼす影響をより明確にできると考える。またエチレンの生成抑制効果を評価するためには、エチレンによる果実の成熟が報告されているカキ果実やイチゴなどを植物体として採用し、岩石と共に密閉容器中に加え、エチレン生成量と成熟度を検証する方法も考えられる。

6. 付録

Table 1. 蛍光 X 線分析結果 (数値は%、蛍光 X 線分析装置 ; リガク・ZSX101e)

化学成分	Si	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Al	Ni	Cr	Ti	Zr	Sr
蛇紋岩	36.3	-	-	2.65	29.2	-	26.5	0.28	2.41	1.77	0.83	-	-	-
見立礫岩	51.1	0.23	7.64	2.11	1.35	1.19	21.8	0.38	12.7	-	-	1.37	0.07	0.09

Table 2. Hoagland 培養液 (50%) の組成と濃度 (表記の Cu 濃度は 0.005ppm の場合)

多量栄養素		微量栄養素	
成分	培養液中濃度[mg/L]	成分	培養液中濃度[mg/L]
NH ₄ NO ₃	85.72	FeSO ₄ ·7H ₂ O	4.9780
KCl	28.60	MnSO ₄ ·5H ₂ O	1.0969
CaCl ₂ ·2H ₂ O	183.405	H ₃ BO ₃	1.4299
NaH ₂ PO ₄ ·2H ₂ O	50.37	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.4398
K ₂ SO ₄	33.425	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.0197
MgSO ₄ ·7H ₂ O	202.765	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.0046
		H ₂ SO ₄	0.5mL

Table 3a. 主根伸長量 (mm) 括弧内は標準誤差 SE (±)

数値右上のアルファベットは培養液中 Cu 濃度間の有意差を示す (p<0.05)

数値右下は添加岩石種間の有意差を示す ; ***p<0.001, **p<0.01, *p<0.05, NS p>0.05 (有意差なし)

添加岩石種	栽培期間	培養液中 Cu 濃度						
		0	0.005	0.02	0.1	0.25	0.5	1
蛇紋岩	15 日間	107 ^a _{NS} (19.7)	95.5 ^a _{**} (10.1)	102 ^a _{NS} (11.4)	99.5 ^a _{**} (9.4)	58.7 ^{ab} _{NS} (17.9)	14.6 ^b _{NS} (5.5)	3.9 ^b _{NS} (0.79)
	31 日間	154 ^{ab} _{NS} (32.1)	176 ^{ab} _{NS} (43.7)	97.9 ^{ab} _{NS} (36.9)	284 ^a _* (79.7)	80.2 ^b _{***} (9.3)	27.3 ^b _{NS} (13.7)	6.1 ^b _{NS} (1.0)
見立礫岩	15 日間	121 ^a _{NS} (19.4)	74.4 ^{ab} _{NS} (9.4)	96.2 ^a _{NS} (24.6)	103 ^a _{**} (16.2)	22.4 ^{bc} _{NS} (6.7)	14.9 ^{bc} _{NS} (1.3)	4.6 ^c _{NS} (1.0)
	31 日間	83.6 ^{ab} (12.3)	142 ^a _{NS} (43.0)	141 ^a _{NS} (21.5)	90.3 ^{ab} _{NS} (11.5)	21.0 ^b _{NS} (5.8)	25.2 ^b _{NS} (14.9)	6.6 ^b _{NS} (1.9)
石英砂 (コントロール)	15 日間	74.1 ^a (13.3)	40.8 ^{ab} (7.6)	57.3 ^a (17.1)	38.9 ^{ab} (3.3)	17.3 ^b (3.7)	8.1 ^b (2.0)	4.2 ^b (0.87)
	31 日間	63.8 ^a (11.6)	52.5 ^{ab} (5.2)	50.8 ^{ab} (2.8)	37.1 ^{bc} (2.9)	17.5 ^{cd} (4.1)	10.9 ^d (2.6)	6.4 ^d (1.7)
岩石不添加	31 日間	No date	71.4 _{NS} (9.9)	79.4 _{NS} (16.6)	52.0 _{NS} (15.0)	18.9 _{NS} (4.8)	12.1 _{NS} (3.2)	8.8 _{NS} (1.1)

Table 3b. 側根数 (本)

添加岩石種	栽培期間	培養液中 Cu 濃度						
		0	0.005	0.02	0.1	0.25	0.5	1
蛇紋岩	31 日間	140 ^a _{NS} (31)	104 ^{ab} _{NS} (21)	61 ^{abc} _{NS} (18)	75 ^{abc} _{NS} (24)	135 ^a _{***} (10)	25 ^b _{NS} (3.5)	11 ^c _{NS} (2.1)
見立礫岩	31 日間	123 ^a _{NS} (24)	111 ^{ab} _{NS} (7.8)	74 ^{ab} _{NS} (22)	86 ^{ab} _{NS} (2.5)	67 ^{ab} _{NS} (4.9)	38 ^{ab} _{NS} (19)	27 ^b _{NS} (13)
石英砂 (コントロール)	31 日間	122 ^a (9.9)	59 ^b (11)	63 ^b (5.5)	57 ^b (13)	48 ^{bc} (11)	17 ^{bc} (3.5)	9 ^c (4.6)
岩石不添加	31 日間	No date	118 _{NS} (15)	118 _{NS} (24)	83 _{NS} (6.4)	47 _{NS} (11)	40 _{NS} (9.3)	38 _{NS} (5.2)

Table 3c. 茎の伸長量 (mm)

添加岩石種	栽培期間	培養液中 Cu 濃度						
		0	0.005	0.02	0.1	0.25	0.5	1
蛇紋岩	31 日間	17.0 ^a _{NS} (1.6)	11.4 ^a _{NS} (5.1)	13.0 ^a _{NS} (1.3)	14.2 ^a _{NS} (2.8)	13.5 ^a _{NS} (1.1)	7.6 ^a _{NS} (2.1)	14.1 ^a _{NS} (0.3)
見立礫岩	31 日間	15.9 ^a _{NS} (0.6)	10.4 ^a _{NS} (1.2)	18.6 ^a _{NS} (4.6)	15.0 ^a _{NS} (4.2)	16.1 ^a _{NS} (2.5)	15.3 ^a _{NS} (3.4)	10.1 ^a _{NS} (1.1)
石英砂 (コントロール)	31 日間	14.1 ^a (0.5)	12.6 ^a (4.7)	13.1 ^a (3.6)	13.6 ^a (1.3)	13.4 ^a (1.0)	9.26 ^a (1.0)	6.7 ^a (0.8)
岩石不添加	31 日間	No date	13.3 _{NS} (1.2)	11.6 _{NS} (0.4)	12.5 _{NS} (1.3)	12.0 _{NS} (0.9)	11.2 _{NS} (0.2)	9.4 _{NS} (3.5)

Table 3d. 比葉面積 (SLA ; cm²/g)

添加岩石種	栽培期間	培養液中 Cu 濃度[ppm]						
		0	0.005	0.02	0.1	0.25	0.5	1
蛇紋岩	31 日間	186 ^{bc} _{NS} (27.6)	81.3 ^c _{NS} (18.3)	101 ^c _{NS} (29.8)	102 ^c _{NS} (11.1)	139 ^{bc} _{NS} (39.5)	265 ^{ab} _{NS} (10.1)	396 ^a _{NS} (44.7)
見立礫岩	31 日間	166 ^a _{NS} (46.8)	347 ^a _{**} (60.7)	185 ^a _{NS} (22.1)	194 ^a _{NS} (64.8)	234 ^a _{NS} (9.7)	146 ^a _{NS} (53.6)	186 ^a _{NS} (67.1)
石英砂 (コントロール)	31 日間	190 ^a (3.4)	94.0 ^{ab} (14.8)	91.4 ^{ab} (23.4)	59.3 ^b (21.3)	153 ^{ab} (36.0)	113 ^{ab} (32.0)	205 ^a (2.6)
岩石不添加	31 日間	No date	176 _{NS} (20.8)	183 _{NS} (46.0)	186 _{NS} (28.2)	149 _{NS} (37.8)	223 _{NS} (26.2)	222 _{NS} (36.4)

Table 4a. 各部位における P 含有量 (μg) 括弧内は標準誤差 SE (\pm)数値右上のアルファベットは培養液中 Cu 濃度間の有意差を示す ($p < 0.05$)数値右下は添加岩石種間の有意差を示す ; *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, NS $p > 0.05$ (有意差なし)

岩石種	蛇紋岩				見立礫岩				石英砂			
Cu [ppm]	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉
0.005	86.7 ^{ab} _{NS} (15.4)	25.0 ^{ab} _{NS} (4.6)	139.9 ^b _{NS} (16.9)	145.9 ^a _{NS} (20.2)	57.8 ^b _{NS} (13.0)	17.9 ^b _{NS} (2.6)	101.6 ^b _{NS} (13.2)	143.2 ^a _{NS} (11.8)	73.9 ^c (13.4)	16.7 ^d (1.5)	90.8 ^b (21.5)	103.8 ^b (13.5)
0.02	81.8 ^a _{NS} (8.6)	25.0 ^b _{NS} (3.2)	87.5 ^c _{NS} (8.9)	132.2 ^{ab} _{NS} (8.1)	57.0 ^b _{NS} (15.8)	20.4 ^b _{NS} (3.6)	44.0 ^b _{NS} (15.1)	89.7 ^a _{NS} (33.9)	74.2 ^c (6.2)	16.7 ^{cd} (1.8)	68.6 ^b (32.5)	105.3 ^b (17.1)
0.1	38.5 ^{abc} _{NS} (3.2)	39.9 ^a _* (3.2)	180.8 ^a _{NS} (5.9)	153.3 ^a _{NS} (19.9)	141.6 ^a _{NS} (27.0)	48.2 ^a _{**} (7.5)	327.0 ^a _* (89.3)	106.0 ^a _{NS} (32.0)	98.2 ^a (12.9)	24.1 ^a (1.7)	152.3 ^a (12.7)	83.7 ^a (20.3)
0.25	77.6 ^{ab} _* (16.2)	21.1 ^b _{NS} (4.0)	136.5 ^b _{**} (5.7)	96.6 ^{abc} _{NS} (14.3)	31.8 ^b _{NS} (8.2)	11.5 ^b _{NS} (3.4)	78.6 ^b _{NS} (21.3)	68.6 ^a _{NS} (7.9)	27.4 ^b (9.8)	13.1 ^b (1.4)	36.1 ^b (19.5)	69.4 ^b (15.8)
0.5	37.8 ^{bc} _{NS} (13.7)	17.1 ^b _{NS} (3.4)	18.3 ^d _{NS} (7.2)	44.3 ^c _* (9.3)	24.3 ^b _{NS} (9.1)	15.7 ^b _{NS} (2.6)	21.8 ^b _{NS} (15.7)	85.5 ^a _{***} (16.7)	42.5 ^c (15.8)	16.3 ^{bc} (9.1)	6.1 ^b (3.3)	-0.88 ^b (3.0)
1	5.2 ^c _{NS} (2.0)	18.9 ^b _{NS} (1.8)	8.4 ^d _{NS} (2.6)	76.7 ^{bc} _{NS} (10.0)	9.2 ^b _{NS} (4.8)	20.5 ^b _{NS} (0.92)	6.2 ^b _{NS} (3.3)	81.8 ^a _{NS} (8.2)	8.5 ^{bc} (2.3)	18.8 ^{bc} (2.0)	8.1 ^b (3.0)	95.3 ^b (18.4)

Table 4b. 各部位における K 含有量 (μg)

岩石種	蛇紋岩				見立礫岩				石英砂			
Cu [ppm]	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉
0.005	5.9 ^c _{NS} (7.8)	3.5 ^c _{NS} (1.5)	46.1 ^b _{NS} (8.8)	38.6 ^{bc} _{NS} (4.5)	1.2 ^b _{NS} (3.9)	-3.0 ^c _{NS} (2.1)	38.2 ^a _{NS} (4.6)	43.2 ^b _{NS} (7.3)	2.3 ^c (4.4)	-6.0 ^d (1.3)	26.7 ^b (7.7)	29.1 ^b (16.6)
0.02	18.5 ^{bc} _{NS} (2.2)	22.4 ^c _{NS} (6.4)	23.8 ^b _{NS} (3.5)	56.2 ^{bc} _{NS} (5.4)	13.3 ^b _{NS} (4.7)	39.9 ^{bc} _{**} (4.1)	9.1 ^a _{NS} (7.0)	39.8 ^b _{NS} (17.0)	19.4 ^c (1.4)	3.8 ^{cd} (2.1)	19.5 ^b (12.1)	32.8 ^b (1.9)
0.1	103.0 ^a _{NS} (2.4)	108.7 ^a _* (2.4)	129.7 ^a _{NS} (3.0)	140.4 ^a _{NS} (6.0)	92.1 ^a _{NS} (2.2)	106.0 ^a _* (6.2)	103.7 ^a _{NS} (21.6)	145.7 ^a _{NS} (4.0)	103.6 ^a (3.9)	90.2 ^a (3.5)	108.2 ^a (8.8)	127.2 ^a (5.5)
0.25	94.8 ^a _{NS} (1.1)	81.1 ^{ab} _{NS} (0.90)	96.5 ^a _* (1.1)	84.7 ^b _{NS} (1.5)	81.1 ^{ab} _{NS} (6.7)	57.8 ^b _{NS} (11.9)	87.9 ^a _{NS} (6.1)	68.4 ^b _{NS} (15.8)	62.6 ^b (14.9)	51.7 ^b (11.3)	49.2 ^b (16.9)	50.1 ^b (15.8)
0.5	47.5 ^b _{NS} (1.1)	55.2 ^{bc} _{NS} (24.9)	50.2 ^b _{NS} (17.8)	40.0 ^c _{NS} (15.9)	67.7 ^{ab} _{NS} (28.5)	34.4 ^{bc} _{NS} (12.7)	70.5 ^a _{NS} (58.1)	51.9 ^b _{NS} (15.3)	19.3 ^c (3.6)	43.0 ^{bc} (12.8)	27.3 ^b (7.1)	44.1 ^b (11.4)
1	34.2 ^{bc} _{NS} (9.0)	53.4 ^{bc} _{NS} (5.6)	14.8 ^b _{NS} (6.5)	76.9 ^{bc} _{NS} (8.7)	40.1 ^{ab} _{NS} (17.3)	36.5 ^{bc} _{NS} (7.9)	20.5 ^a _{NS} (4.9)	44.7 ^b _{NS} (5.9)	33.6 ^{bc} (10.8)	40.4 ^{bc} (6.6)	14.6 ^b (9.5)	64.3 ^b (9.6)

Table 4c. 各部位における Ca 含有量 (μg)

岩石種	蛇紋岩				見立礫岩				石英砂			
	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉
0.005	3.4 ^a _{NS} (0.84)	3.2 ^b _{NS} (0.75)	17.1 ^c _{NS} (3.3)	46.7 ^a _{NS} (16.3)	2.0 ^a _{NS} (0.50)	1.6 ^b _{NS} (0.34)	12.8 ^{bc} _{NS} (1.7)	30.3 ^a _{NS} (1.3)	73.9 ^b (13.4)	16.7 ^a (1.5)	90.8 ^b (21.5)	103.8 ^{ab} (13.5)
0.02	2.4 ^a _{NS} (0.32)	3.5 ^b _{NS} (0.25)	10.9 ^c _{NS} (2.3)	62.8 ^{bc} _{NS} (4.9)	1.4 ^a _{NS} (0.25)	2.8 ^b _{NS} (0.63)	6.1 ^c _{NS} (3.0)	113.4 ^a _{NS} (88.8)	74.2 ^b (6.2)	16.7 ^a (1.8)	68.6 ^b (32.5)	105.3 ^{ab} (17.1)
0.1	34.2 ^a _{NS} (2.6)	33.7 ^a _* (2.6)	368.7 ^a _{NS} (10.0)	98.9 ^b _{NS} (15.0)	24.9 ^a _{NS} (2.2)	30.3 ^a _* (6.1)	340.7 ^a _{NS} (40.6)	58.0 ^a _{NS} (18.6)	98.2 ^a (12.9)	24.1 ^a (1.7)	152.3 ^a (12.7)	83.7 ^{ab} (20.3)
0.25	27.4 ^a _{NS} (2.8)	29.7 ^a _{NS} (3.8)	186.7 ^b _* (5.2)	211.1 ^c _{NS} (2.8)	18.8 ^a _{NS} (2.9)	14.1 ^b _{NS} (1.9)	125.5 ^b _{NS} (21.4)	151.7 ^a _{NS} (30.2)	27.4 ^{ab} (9.8)	13.1 ^a (1.4)	36.1 ^b (19.5)	69.4 ^a (15.8)
0.5	44.7 ^a _{NS} (21.7)	19.6 ^{ab} _{NS} (9.7)	27.4 ^c _{NS} (13.9)	47.8 ^c _{NS} (9.2)	24.9 ^a _{NS} (12.6)	10.1 ^b _{NS} (2.4)	30.5 ^{bc} _{NS} (25.4)	68.2 ^a _{NS} (12.7)	42.5 ^{ab} (15.8)	16.3 ^a (9.1)	6.1 ^b (3.3)	-0.88 ^b (3.0)
1	3.6 ^a _{NS} (0.86)	7.7 ^b _{NS} (0.78)	2.4 ^c _{NS} (1.7)	38.4 ^c _{NS} (7.4)	5.4 ^a _{NS} (3.0)	8.1 ^b _{NS} (1.7)	2.15 ^c _{NS} (1.1)	25.6 ^a _{NS} (7.3)	8.5 ^b (2.3)	18.8 ^a (2.0)	8.1 ^b (3.0)	95.3 ^{ab} (18.4)

Table 4d. 各部位における Mg 含有量 (μg)

岩石種	蛇紋岩				見立礫岩				石英砂			
	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉
0.005	2.4 ^{ab} _{NS} (0.48)	2.7 ^{ab} _{**} (0.30)	9.1 ^b _{NS} (1.8)	22.8 ^a _{NS} (6.5)	1.6 ^a _{NS} (0.39)	1.5 ^c _{NS} (0.34)	6.6 ^{bc} _{NS} (0.70)	16.2 ^a _{NS} (0.56)	1.4 ^c (0.26)	1.1 ^d (0.34)	7.1 ^b (2.3)	14.8 ^b (4.3)
0.02	1.8 ^a _{NS} (0.35)	3.1 ^b _{NS} (0.42)	5.3 ^c _{NS} (0.91)	25.1 ^{ab} _{NS} (1.5)	1.1 ^a _{NS} (0.23)	2.1 ^c _{NS} (0.33)	2.7 ^c _{NS} (1.3)	46.9 ^a _{NS} (35.1)	1.4 ^c (0.14)	1.9 ^{cd} (0.33)	4.4 ^b (2.8)	15.3 ^b (1.1)
0.1	25.4 ^{abc} _{**} (2.3)	25.3 ^a _{**} (2.3)	157.4 ^a _{NS} (5.1)	50.3 ^a _{NS} (7.4)	17.7 ^a _{NS} (3.0)	21.0 ^a _{NS} (3.8)	152.6 ^a _{NS} (16.0)	28.8 ^a _{NS} (9.3)	10.7 ^a (1.4)	12.8 ^a (3.75)	132.2 ^a (8.4)	29.0 ^a (9.9)
0.25	16.9 ^{ab} _* (2.8)	25.1 ^b _{NS} (2.9)	81.5 ^b _{**} (1.2)	94.8 ^{abc} _* (0.65)	8.8 ^a _{NS} (2.0)	11.3 ^b _{NS} (1.9)	55.3 ^b _{NS} (10.8)	72.7 ^a _{NS} (10.4)	7.3 ^b (3.0)	10.6 ^b (1.9)	20.8 ^b (14.4)	46.3 ^b (13.4)
0.5	26.5 ^{bc} _{NS} (13.7)	13.0 ^b _{**} (4.5)	15.4 ^d _{NS} (7.1)	33.8 ^c _* (7.2)	11.3 ^a _{NS} (6.1)	7.9 ^{bc} _{NS} (1.7)	15.5 ^{bc} _{NS} (12.1)	56.1 ^a _{***} (10.6)	16.9 ^c (6.7)	14.1 ^{bc} (1.7)	8.1 ^b (3.1)	1.5 ^b (1.0)
1	2.1 ^c _{NS} (0.46)	8.2 ^b _{NS} (1.4)	2.3 ^d _{NS} (1.0)	35.2 ^{bc} _{NS} (5.1)	2.8 ^a _{NS} (1.4)	7.0 ^{bc} _{NS} (1.0)	2.2 ^c _{NS} (1.3)	38.9 ^a _{NS} (5.6)	2.2 ^{bc} (0.65)	5.9 ^{bc} (1.0)	2.2 ^b (1.0)	34.5 ^b (5.7)

Table 5a. 各部位における Cu 含有量 (μg)

岩石種	蛇紋岩				見立礫岩				石英砂			
Cu [ppm]	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉
0.005	-0.062 ^b _{NS} (0.056)	-0.14 ^a _{NS} (0.079)	0.022 ^b _{NS} (0.080)	0.11 ^b _{NS} (0.056)	-0.032 ^b _{NS} (0.023)	-0.030 ^a _{NS} (0.074)	-0.071 ^b _{NS} (0.034)	0.21 ^{bc} _{NS} (0.025)	-0.078 ^c (0.046)	-0.14 ^a (0.018)	-0.022 ^b (0.065)	0.024 ^d (0.040)
0.02	0.0060 ^b _{NS} (0.033)	-0.019 ^a _{NS} (0.038)	-0.053 ^b _{NS} (0.022)	0.24 ^b _{NS} (0.28)	0.0017 ^b _{NS} (0.073)	0.14 ^a _{NS} (0.025)	-0.017 ^b _{NS} (0.051)	0.055 ^c _{NS} (0.10)	0.038 ^c (0.048)	-0.10 ^a (0.039)	1.8 ^a (1.8)	-0.024 ^d (0.0011)
0.1	0.0087 ^b _{***} (0.023)	-0.081 ^a _* (0.023)	0.27 ^a _{NS} (0.069)	0.41 ^b _{NS} (0.052)	0.87 ^a _{NS} (0.14)	-0.0069 ^a _{NS} (0.023)	0.24 ^a _{NS} (0.067)	0.72 ^{ab} _{NS} (0.22)	1.5 ^b (0.092)	-0.020 ^a (0.038)	0.14 ^b (0.066)	0.47 ^c (0.029)
0.25	2.9 ^a _{NS} (0.34)	-0.087 ^a _{NS} (0.021)	0.63 ^a _{NS} (0.17)	1.2 ^a _{NS} (0.27)	2.2 ^a _{NS} (0.15)	-0.081 ^a _{NS} (0.012)	0.54 ^a _{NS} (0.15)	1.1 ^a _{NS} (0.40)	2.8 ^a (0.47)	-0.050 ^a (0.038)	0.22 ^b (0.12)	1.6 ^{ab} (0.30)
0.5	1.7 ^a _{NS} (0.38)	0.099 ^a _S (0.039)	0.22 ^a _{NS} (0.061)	1.2 ^a _{NS} (0.18)	2.6 ^a _{NS} (0.69)	0.094 ^a _{NS} (0.015)	0.19 ^a _{NS} (0.11)	1.1 ^a _{NS} (0.21)	1.7 ^{ab} (0.60)	-0.20 ^a (0.049)	-0.26 ^b (0.055)	3.0 ^a (0.51)
1	1.6 ^a _{NS} (0.17)	0.17 ^a _S (0.084)	0.0016 ^b _{NS} (0.0073)	0.65 ^{ab} _{NS} (0.12)	1.8 ^a _{NS} (0.42)	0.21 ^a _{NS} (0.10)	0.19 ^a _{NS} (0.13)	0.50 ^{ab} _{NS} (0.21)	1.9 ^{ab} (0.32)	0.24 ^a (0.076)	0.050 ^b (0.019)	1.2 ^{bc} (0.40)

Table 5b. 各部位における Fe 含有量 (μg)

岩石種	蛇紋岩				見立礫岩				石英砂			
Cu [ppm]	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉
0.005	0.17 ^c _{NS} (0.067)	0.041 ^c _{NS} (0.036)	0.050 ^b _{NS} (0.0061)	0.054 ^{bc} _{NS} (0.016)	0.47 ^b _{NS} (0.14)	0.018 ^c _{NS} (0.0088)	0.036 ^a _{NS} (0.016)	0.052 ^b _{NS} (0.016)	0.63 ^c (0.12)	0.023 ^d (0.0081)	0.047 ^b (0.010)	0.058 ^b (0.023)
0.02	0.28 ^c _{NS} (0.056)	0.032 ^c _{NS} (0.022)	0.059 ^b _{NS} (0.0083)	0.094 ^{bc} _{NS} (0.019)	0.50 ^b _{NS} (0.073)	0.012 ^{bc} _{NS} (0.0048)	0.018 ^a _{NS} (0.023)	0.20 ^b _{NS} (0.15)	0.70 ^c (0.38)	0.0027 ^{cd} (0.0085)	0.0032 ^b (0.017)	0.093 ^b (0.019)
0.1	0.038 ^a _{NS} (0.013)	0.034 ^a _{NS} (0.013)	0.37 ^a _{NS} (0.034)	0.57 ^a _{NS} (0.13)	3.2 ^a _{NS} (1.1)	0.048 ^a _{NS} (0.020)	0.24 ^a _{NS} (0.080)	0.56 ^a _{NS} (0.050)	5.7 ^a (0.52)	0.12 ^a (0.040)	0.30 ^a (0.16)	0.51 ^a (0.073)
0.25	1.97 ^a _{NS} (0.33)	0.19 ^{ab} _{NS} (0.024)	0.71 ^a _{NS} (0.107)	0.28 ^b _{NS} (0.040)	1.6 ^{ab} _{NS} (0.41)	0.21 ^b _{NS} (0.028)	0.41 ^a _{NS} (0.17)	0.28 ^b _{NS} (0.070)	3.7 ^b (0.67)	0.22 ^b (0.029)	0.13 ^b (0.081)	0.71 ^b (0.19)
0.5	0.74 ^b _{NS} (0.20)	0.086 ^{bc} _{NS} (0.068)	0.061 ^b _{NS} (0.035)	0.30 ^c _{NS} (0.058)	1.4 ^{ab} _{NS} (0.56)	0.20 ^{bc} _{NS} (0.14)	0.40 ^a _{NS} (0.29)	0.57 ^b _{NS} (0.19)	2.3 ^c (0.65)	0.18 ^{bc} (0.051)	0.13 ^b (0.063)	1.4 ^b (0.32)
1	0.10 ^c _{NS} (0.042)	-0.081 ^{bc} _{NS} (0.0030)	-0.012 ^b _{NS} (0.0073)	0.054 ^{bc} _{NS} (0.039)	0.39 ^{ab} _{NS} (0.084)	0.093 ^{bc} _{NS} (0.090)	0.19 ^a _{NS} (0.15)	0.11 ^b _{NS} (0.035)	1.1 ^{bc} (0.18)	0.052 ^{bc} (0.050)	-0.0047 ^b (0.0061)	0.32 ^b (0.12)

Table 5c. 各部位における Ni 含有量 (μg)

岩石種	蛇紋岩				見立礫岩				石英砂			
	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉	根	茎	葉	子葉
0.005	2.6 ^{a***} (0.85)	-0.11 ^{aNS} (0.38)	1.6 ^{aNS} (0.38)	0.86 ^{abNS} (0.89)	-0.40 ^{aNS} (0.50)	-0.51 ^{aNS} (0.41)	-0.56 ^{aNS} (0.55)	0.13 ^{aNS} (0.44)	0.25 ^a (0.15)	-0.38 ^a (0.38)	-1.5 ^a (0.72)	0.050 ^a (0.32)
0.02	0.80 ^{a**} (0.37)	-0.44 ^{aNS} (0.32)	0.93 ^{abNS} (0.44)	1.0 ^{a**} (0.29)	0.15 ^{aNS} (0.37)	-0.056 ^{aNS} (0.50)	-0.69 ^{aNS} (0.36)	0.23 ^{aNS} (0.55)	-0.64 ^a (0.26)	-0.46 ^a (0.29)	-0.61 ^a (0.15)	0.41 ^a (0.66)
0.1	0.32 ^{a***} (0.045)	0.0059 ^{a*} (0.018)	0.49 ^{bNS} (0.078)	0.31 ^{b**} (0.054)	0.067 ^{aNS} (0.069)	-0.0082 ^{aNS} (0.0077)	0.018 ^{aNS} (0.014)	0.031 ^{aNS} (0.017)	0.0012 ^a (0.015)	0.012 ^a (0.0058)	0.0089 ^a (0.011)	0.060 ^a (0.013)
0.25	0.92 ^{a***} (0.032)	0.14 ^{aNS} (0.0087)	1.0 ^{a*} (0.11)	0.33 ^{b**} (0.058)	-0.24 ^{aNS} (0.037)	0.066 ^{aNS} (0.044)	0.10 ^{aNS} (0.014)	0.035 ^{aNS} (0.026)	0.019 ^a (0.024)	0.13 ^a (0.029)	0.11 ^a (0.021)	0.045 ^a (0.014)
0.5	0.11 ^{a**} (0.011)	0.096 ^{aNS} (0.048)	0.090 ^{cNS} (0.036)	0.064 ^{cNS} (0.012)	0.024 ^{aNS} (0.0043)	0.018 ^{aNS} (0.010)	0.021 ^{aNS} (0.0089)	-0.011 ^{aNS} (0.0089)	0.0010 ^a (0.0062)	0.0073 ^a (0.0051)	-0.0027 ^a (0.0047)	-0.026 ^a (0.0051)
1	0.014 ^{aNS} (0.0028)	0.0077 ^{aNS} (0.0055)	0.016 ^{cNS} (0.0039)	0.029 ^{cNS} (0.0083)	0.017 ^{aNS} (0.0065)	-0.0074 ^{bNS} (0.012)	-0.0059 ^{aNS} (0.0058)	-0.010 ^{aNS} (0.0058)	0.0044 ^a (0.0066)	-0.014 ^a (0.0043)	0.017 ^a (0.0018)	-0.0079 ^a (0.0057)

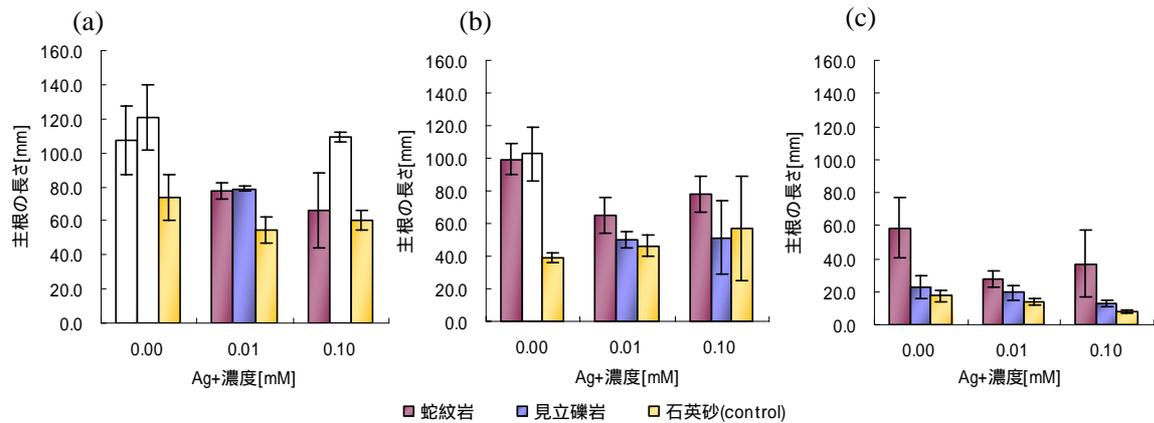


Fig.4. Ag⁺イオン添加による主根伸長量の変化 ; (a)Cu0ppm, (b)Cu0.1ppm, (c)Cu0.25ppm

7. 引用および参考文献 (References)

- 植物の生化学・分子生物学 (2005); Bob B.Buchanan, Wilhelm Gruissem, Russell L.Jones 編、
 (株)学会出版センター 1093-1132
- 記載岩石学 岩石学のための情報収集マニュアル (2002); 周藤賢治、小山内康人 著、
 (株)共立出版
- Ryan E. O'dell, Victor P. Claassen (2006) Relative performance of native and exotic grass species in
 response to amendment if drastically disturbed serpentine substrates. *Journal of Applied Ecology* **43**:
 898-908
- 日本地質図大系九州地方 (1995); 通商産業省工業技術院地質研究所 監修、(株)朝倉書店
- Brooks, R.R. (1987) *Serpentine and its Vegetation; A Multi-disciplinary Approach*. Discorides Press,
 Portland, OR.
- Kruckeberg, A.R. (1984) *California Serpentine: Flora Vegetation, Geology, Soils, and Management*
 Problems. University of California Press, Berkeley, CA.
- 加護谷栄章、前川往亮、田中平義、日下昭二 (1977) 蛇紋岩質土壌における作物の生育障害に
 ついて 第2報 層位別可給態 Ni, Mn, Mg の分布について; 兵庫県農業総合センター研究報告
 第26号
- 前川往亮、加護谷栄章、田中平義、日下昭二 (1977) 蛇紋岩質土壌における作物の生育障害に
 ついて 第3報 ダイコンの生育障害とその対策; 兵庫県農業総合センター研究報告第26号
- 太田光輝 (1981) カーネーション萎ちょう細菌病防除に関する研究; 関西病虫害研究会報
- 加藤武夫 (1920) 見立礫岩; 地質雑