

蛇紋岩および見立礫岩より溶出する無機成分が
植物の初期成長に及ぼす影響

**The effect on early growth of plant by mineral elements eluted
from Serpentinite and Mitate Conglomerate**

北九州市立大学国際環境工学部
環境化学プロセス工学科環境科学講座

2003511012

川端 充生

目次

Abstract	3
1. 緒言	4
2. 実験	7
2-1. 試料	
(1) 見立礫岩	7
(2) 蛇紋岩	7
2-2. 方法	
(1) 植物栽培（岩石-溶媒-植物系）	8
(2) 溶出実験（岩石-培養液系）	9
(3) 統計分析	10
3. 結果	11
3-1. 植物栽培	
(1) 各器官の伸長速度	11
(2) 各器官の重量	16
(3) 葉における多量元素含有量（N, P, K, Ca, Mg, Na）	21
(4) 葉における微量元素含有量（Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn）	25
3-2. 溶出実験	
(1) 見立礫岩添加によるの pH 緩衝効果の評価	32
(2) 微量元素変化量（Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn）	33
4. 考察	
4-1. 葉の乾燥重量と微量元素含有量（Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn）の関係	36
4-2. 溶媒中の Ni 含有量の変化と葉における含有量	41
5. 結言	44
5-1. 結果のまとめ	
5-2. 今後の課題	
6. 謝辞	44
7. 引用および参考文献	45

Abstract

見立礫岩および蛇紋岩の2種類の岩石を培養液に添加して15日間のハツカダイコンの栽培を行い、2種の岩石が各々植物の初期成長に及ぼす影響を調査した。15日間の栽培後、ダイコンの子葉、葉、茎、根の伸長および絶対乾燥重量を測定して成長量を調査した。さらに葉に関しては無機多量元素（N, P, K, Ca, Mg, Na）および無機微量元素（Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn）の含有量を測定した。

葉の乾燥重量については見立礫岩を添加した場合に Control（けい砂）と比較して重量が小さいことが認められたが、葉に蓄積された多量元素量については有意差が認められなかった。一方で見立礫岩を添加した場合には Cu が、蛇紋岩を添加した場合には Ni がハツカダイコンの葉に多く含有した。Ni を化学成分として含む蛇紋岩を添加した場合には、Ni が蛇紋岩より培養液に溶出し、植物体に吸収され葉に蓄積する結果となった。一方で見立礫岩の化学成分として Cu は含まれておらず、植物体に蓄積された Cu は培養液由来のものである。このことから見立礫岩を添加することによって、培養液中の Cu が積極的に植物体中に摂取され葉に蓄積したものと考えられる。

I had grown *Raphanus sativus* using culture solution added Mitate Conglomerate or Serpetinite for fifteen days to investigate the effect on early growth of the plant influenced by two kind of rocks. Rate of extension and dry weight of seed leaf, leaf, stalk and root were measured as growth increment after 15 days from beginning growth. The content of mineral macro-elements (N, P, K, Ca, Mg, Na) and mineral micro-elements (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn) in leaf were also measured.

Although it was significant that dry Weight of leaf in the case of added Mitate Conglomerate is lighter than added Silica sand (Control), the content of mineral macro-elements included in leaf was not different in the case of adding any rock. Content of Cu in leaf in the case of added Mitate Conglomerate and content of Ni in the case of added Serpetinite was better than control. Ni which is one of the elements composing Serpetinite eluted from Serpetinite and it was stored in leaf of *Raphanus sativus*. On the other hand, Cu included in leaf was taken from culture solution because Cu is not element composing Mitate Conglomerate. Therefore, addition of Mitate Conglomerate to culture solution caused positive ingestion of Cu from the culture solution to *Raphanus sativus* and Cu was stored in leaf.

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 (Table1)。

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 (Fig.1.)。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。

Table 1. 植物にとって十分量と考えられる必須栄養素濃度

多量栄養素		微量栄養素	
成分	乾物重当り濃度 [$\mu\text{g/g}$]	成分	乾物重当り濃度 [$\mu\text{g/g}$]
N	15000	Cl	100
K	10000	B	20
Ca	5000	Fe	100
Mg	2000	Mn	50
P	2000	Zn	20
S	1000	Cu	6
		Mo	0.1
		Ni	0.005

(引用：植物の生化学・分子生物学 2005)

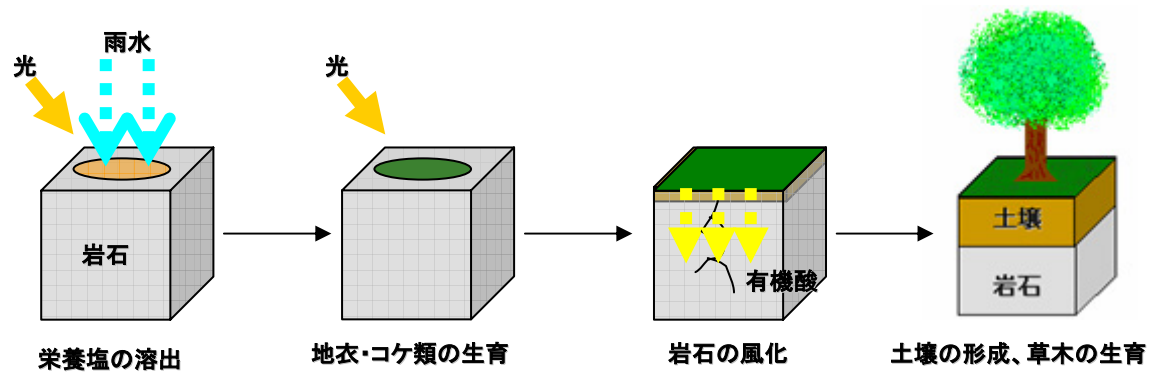


Fig.1.土壌の形成（前田、松尾；1980）

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。しかし一方で岩石によって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ある。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必須な元素も含まれているが、植物体に過剰に吸収されることによって生育は阻害される。

Cr, Ni, Co を多く含有する代表的な岩石としては、蛇紋岩（Serpentinite）について多くの報告がされている。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、菌根の栄養分体などを損失する。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）。

蛇紋岩のように植物の生育に障害をもたらす岩石が存在する一方で、土壌の活性化や水の機能化を促進させる岩石に関する研究も報告されている。その代表例が麦飯石であり、農業分野や医療分野など幅広い分野において実用化が期待されている。麦飯石とは岐阜県加茂郡白川町黒川産の石英斑岩の俗称であり、中国の黒龍江省でも産出される。麦飯石を用いた研究では、農業分野においては麦飯石の土壌添加によるコマツナの生体重増加および鮮度保持効果（石川 2004）、乳牛の試料への添加による乳量の増加効果（高橋 1990）などが報告されており、他の分野においては細菌に対する研究効果（大野 1985, 太田 1981）や接触皮膚炎に対する抗炎症効果なども報告されている。

また麦飯石を水に作用させることによってミネラルが溶出することが確認されており、その活性水を用いた研究では、小麦種子に対する生理的活性効果やコマツナの発芽および初期成育の促進効果が報告されている（石川 2004）。また麦飯石を作用させることによる pH 緩衝特性についても報告がなされている。

本研究試料として用いる見立礫岩は、宮崎県臼杵郡に分布する秩父帯見立層より産出される礫岩の俗称であり、既知な用途としては主に温浴施設である岩盤浴に利用され流通している。見立礫岩は麦飯石と類似した化学成分を保持していることから、麦飯石から溶出する無機成分が植物の生育に影響を及ぼすように、見立礫岩からも無機成分が溶出し植物の成長を促進させる可能性があると期待する。麦飯石と同様に土壌改良剤としての効果を認めることができれば、見立礫岩の新規用途としての可能性が広がるとともに、天然に産する岩石を土壌改良剤として用いることで、環境負荷の低減や安全性の面においても化学肥料の代替として期待できる。

本研究では岩石を土壌改良剤として用いるための基礎研究と位置づけ、（1）岩石の種類や化学性の相違が植物の伸長や栄養塩吸収にもたらす影響を調査すること（2）見立礫岩の植物の生育への効果を分析し、新規用途として土壌改良剤への利用可能性を調査することを目的として、見立礫岩あるいは蛇紋岩を培養液に添加して植物の栽培を行った。

2. 実験 (Materials and Methods)

2-1. 試料

● 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鉾山付近を模式地とする含花崗質岩礫岩である (加納、吉田、蛭子 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 II) 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。さらに蛍光 X 線分析を行った結果を Fig2 に示した。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る。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。

● 蛇紋岩 (Serpentine)

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°C 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 2. 蛍光 X 線分析結果

(蛍光 X 線分析装置 ; リガク・ZSX101e)

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

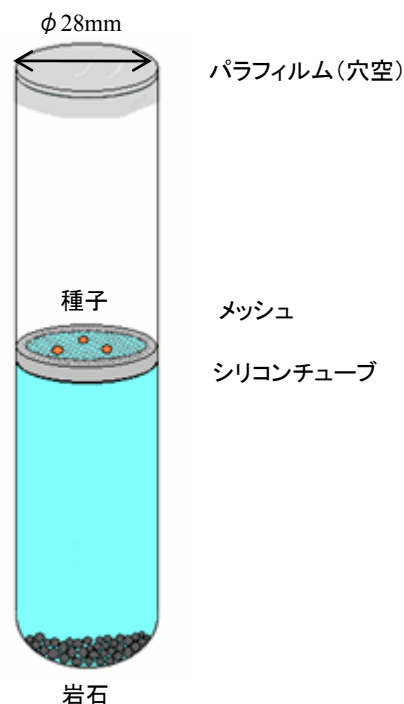


Fig.2. 植物栽培装置図

2-2. 方法

(1) 植物栽培 (植物-培養液-岩石系)

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ハツカダイコン (*Raphanus sativus* ; 榊タキイ種苗、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を用いた。岩石の添加量は培養液 50mL に対して絶対乾燥重量 0.5g、1.0g、2.0g の 3 段階に設定した。培養液としては Hoagland 培養液 (組成 : Table2) を用い、その濃度を原液 (High-Concentration ; 以下 High と表記) と 2 倍希釈 (Low-Concentration ; 以下 Low と表記) の 2 段階に設定した。見立礫岩と蛇紋岩の各岩石について、3 段階の添加量と 2 段階の培養液の全ての組み合わせで栽培を行い、各条件の反復数は 5 とした。Control としては物理的影響を考慮してけい砂 (Silica Sand ; 榊東化学、粒径 0.2-1.0mm) を培養液に添加し、他種岩石と同条件で栽培を行った。

培養装置としては試験管 (外径 30mm、内径 28mm、長さ 200mm) を用い、Fig.3 のように設置した。試験管上部は大気が循環する様に、数箇所穴を開けたパラフィルムでフタをした。装置は GROWTH CHAMBER 内に設置し、温度 25℃、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。

培養装置設置後、3 個体を播種し、1~2 日後に発芽した時点で 2 個体を間引き、残りの 1 個体を栽培した。栽培期間は播種日を 0 日として 15 日間とした。

15 日間の栽培後、植物体の全量および各器官（子葉、葉、茎、根）の伸長を測定し、伸長速度（mm/day）を求めた。子葉については 2 枚あるいは 3 枚、葉については全ての枚数の伸長を加算し、総和の伸長速度を算出した。植物体は超純水で洗浄し、80℃で 48 時間以上乾燥させた後、重量を測定した。さらに葉については粉末化し、元素分析により N 含有量を測定した（元素分析装置；ヤナコ・MT-6 CHN Corder）。残った粉末試料については、硝酸 1mL、過塩素酸 200 μ L、硫酸 100 μ L を加えて加熱分解し、10mL に定容後、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）で無機多量元素および微量元素含有量を測定した。ブランクについてはサンプルと同様に硝酸 1mL、過塩素酸 200 μ L、硫酸 100 μ L を加えて加熱し、10mL に定容した。

Table 3. Hoagland 培養液の組成と原液濃度

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	171.44	FeSO ₄ ·7H ₂ O	9.9560
KCl	57.20	MnSO ₄ ·5H ₂ O	2.1938
CaCl ₂ ·2H ₂ O	366.81	H ₃ BO ₃	2.8598
NaH ₂ PO ₄ ·2H ₂ O	100.74	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.8796
K ₂ SO ₄	66.85	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.0394
MgSO ₄ ·7H ₂ O	405.53	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	0.0092
		H ₂ SO ₄	1mL

(2) 溶出実験（溶媒-岩石系）

見立礫岩および蛇紋岩、けい砂（Control）のそれぞれを溶媒に添加し、その際の溶媒中の微量元素含有量を測定し、岩石添加による溶媒中の元素変化量を調査した。

溶媒は濃度 2 段階（High、Low）の Hoagland 培養液および超純水（以下 No と表記）を用い、岩石添加量は 0.5g、1.0g、2.0g（絶対乾燥重量/溶媒 50mL）に設定した。3 種の岩石種について、濃度 3 段階（High、Low、No）の溶媒、3 段階の岩石添加量の全ての組み合わせについて溶出実験を行い、反復数は 3 とした。

実験装置は植物栽培と同様の試験管を用い、溶媒 50mL に岩石を添加した後、パラフィルムで密封した。溶出実験では植物栽培と同様に、GROWTH CHAMBER 内に 15 日間静置した。

15 日後、ICP-AES により溶出液中の無機多量元素および微量元素含有量を測定した。

また見立礫岩の pH 緩衝効果を調査するため、見立礫岩を添加した溶出液について 5C ろ過し、ろ液について pH の測定を行った。pH の測定は岩石添加時を 0 日として 5 日、10 日、15 日経過後にそれぞれ行い、時系列での変化を観測した。

(3) 統計分析

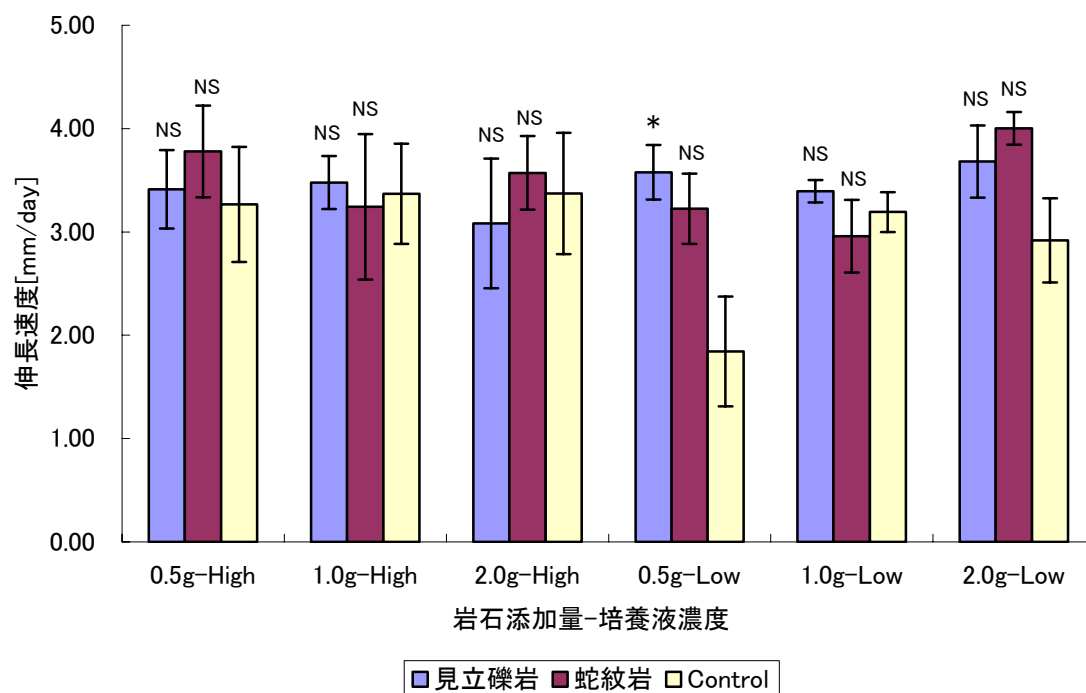
測定した植物体の各器官の伸長速度、絶乾重量、葉における各元素含有量について分散分析を行った (SPSS for Windows スタンダードバージョン)。因子は A : 岩石種 (見立礫岩、蛇紋岩、Control)、B : 岩石添加量 (0.5g, 1.0g, 2.0g-DW/培養液 50mL)、C : 培養液濃度 (High, Low) とし、各パラメータに有意差をもたらす主因子を調査した。さらに分散分析の結果より、有意確率 5% 以下の因子について、Tukey を用いて多重比較検定を行った。

3. 結果 (Results)

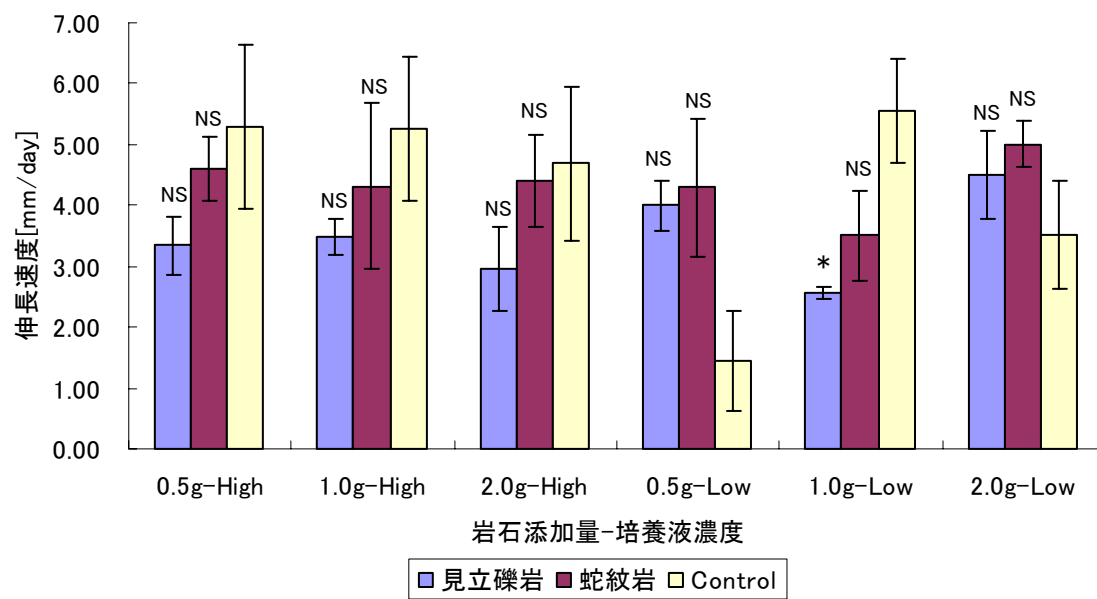
3-1. 植物栽培

(1) 各器官の伸長

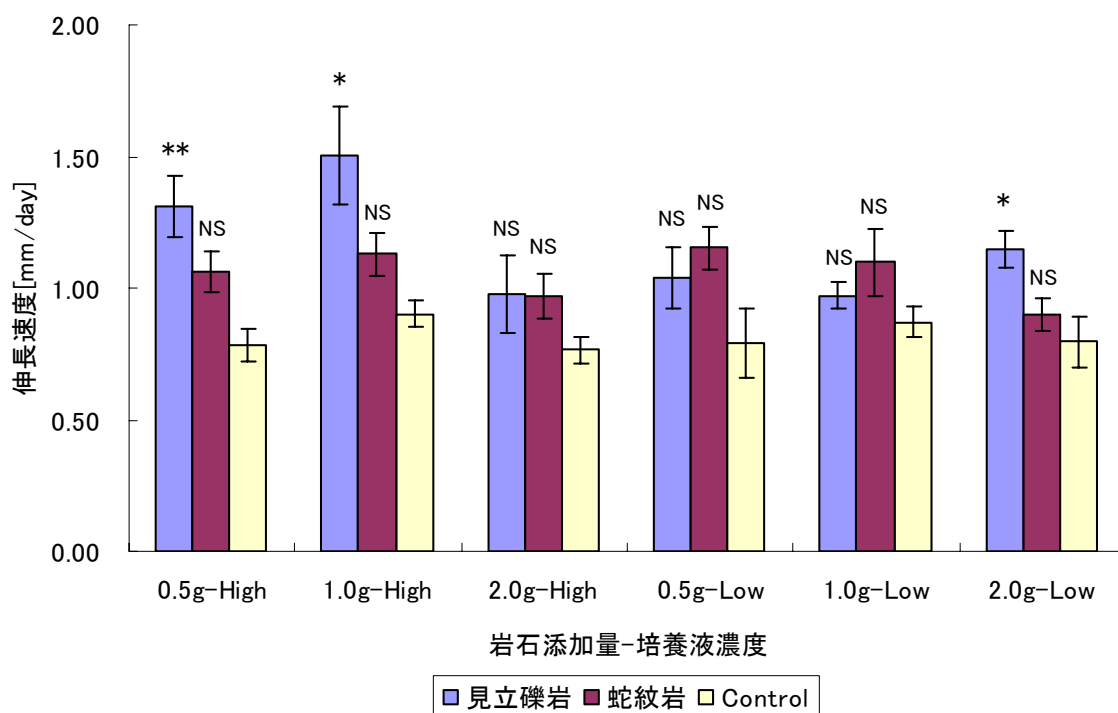
15 日間の栽培後の各器官の伸長速度について、各栽培条件における平均値を求めた (Fig.3)。子葉については岩石添加量 0.5g かつ培養液濃度 Low の条件においてのみ、見立礫岩を添加した場合に Control よりも有意に伸長速度が大きいことが認められた ($p<0.05$)。蛇紋岩についてはいかなる条件においても子葉の伸長速度に対して Control との間に有意差は認められなかった。葉については見立礫岩 1.0g を Low 培養液に添加した場合に、Control よりも伸長速度が小さいことが認められた ($p<0.05$)。茎については見立礫岩を High 培養液に 0.5g ($p<0.01$) または 1.0g ($p<0.05$) 添加した場合および Low 培養液に 2.0g 添加した場合 ($p<0.05$) に、Control と比較して伸長速度が大きいことが認められた。根の伸長速度は、見立礫岩については 0.5g あるいは 2.0g を Low 培養液に添加した場合 (いずれも $p<0.05$)、蛇紋岩については 2.0g を High 培養液 ($p<0.05$) あるいは Low 培養液 ($p<0.01$) に添加した場合に Control よりも大きいことが認められた。



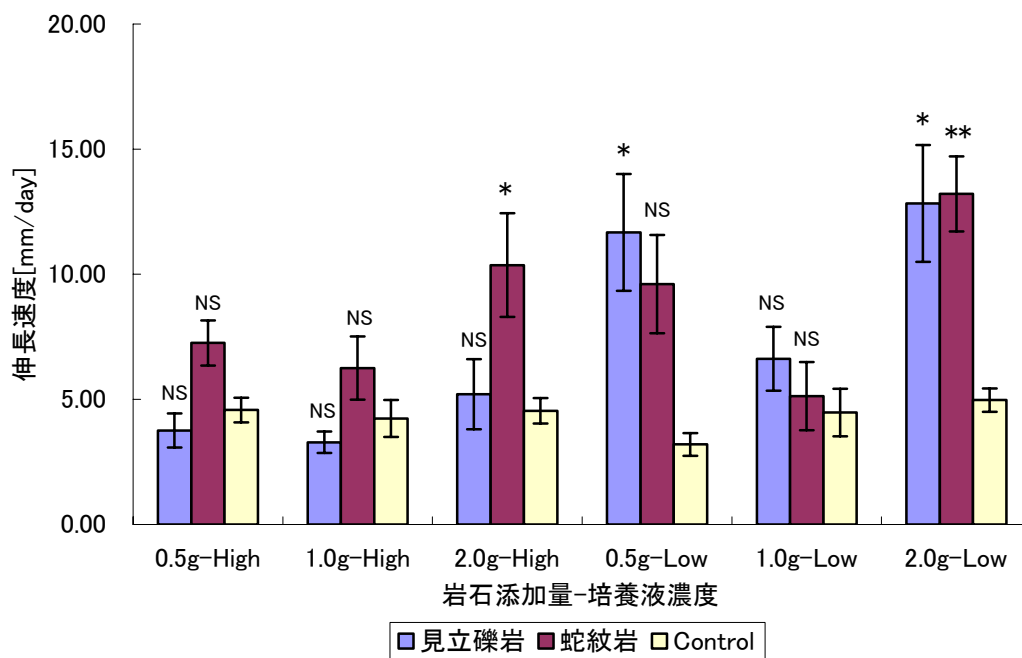
各栽培条件における子葉の総和の伸長速度(15日間)



各栽培条件における葉の総和の伸長速度(15日間)



各栽培条件における茎の伸長速度(15日間)



各栽培条件における根の伸長速度(15日間)

Fig.3. 各栽培条件で15日間栽培後のハツカダイコンの伸長速度

Tukeyを用いて算出したControlに対する有意差を示す。NS (not significant) ; * $p < 0.05$ (significant) ; ** $p < 0.01$ (highly significant) ; *** $p < 0.001$ (very highly significant). バーは標準誤差を示す。反復数 $n=5$ 。

子葉の総和、葉の総和、茎、根の伸長速度について分散分析を行った結果を Table4 に示した。分散分析表より、子葉、葉の伸長速度についてはいずれの因子に関しても有意差が認められなかった。茎については岩石種の違いおよび岩石添加量の違いにより、伸長速度に有意差が生じることが認められた。また根の伸長速度に関しては、岩石種、岩石添加量、培養液濃度のいずれの因子によっても有意差が認められ、また岩石種と培養液濃度の交互作用によっても有意差が認められた。

また添加した岩石種別に分類し、各器官の伸長速度を示した (Fig.4)。岩石種別に Tukey により多重検定を行った結果、岩石種の違いによる有意差が認められた茎および根については、見立礫岩あるいは蛇紋岩を添加したいずれの場合にも、伸長速度が Control よりも大きいことが認められた。特に茎については見立礫岩、根については蛇紋岩を添加した場合に伸長速度が大きい傾向が見られた。

結果より、見立礫岩あるいは蛇紋岩を添加することによって、茎および根の伸長速度が大きくなったが、子葉および葉の伸長速度にもたらす影響力は低いことが分かった。

Table 4. 各器官の伸長速度に関する分散分析表; NS (not significant) ; *p < 0.05 (significant) ; **p < 0.01 (highly significant) ; ***p < 0.001 (very highly significant).

分散分析表-子葉の伸長速度

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	4.06	2	2.03	2.27	0.1104 NS
B(岩石添加量)	0.98	2	0.49	0.55	0.5790 NS
C(培養液濃度)	0.85	1	0.85	0.95	0.3319 NS
A * B	4.41	4	1.10	1.24	0.3031 NS
A * C	3.06	2	1.53	1.71	0.1876 NS
B * C	2.35	2	1.18	1.32	0.2742 NS
A * B * C	1.61	4	0.40	0.45	0.7711 NS
誤差	62.44	70	0.89		

分散分析表-葉の伸長速度

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	13.51	2	6.76	1.81	0.1715 NS
B(岩石添加量)	1.74	2	0.87	0.23	0.7926 NS
C(培養液濃度)	3.73	1	3.73	1.00	0.3213 NS
A * B	25.91	4	6.48	1.73	0.1522 NS
A * C	14.12	2	7.06	1.89	0.1587 NS
B * C	9.12	2	4.56	1.22	0.3014 NS
A * B * C	23.11	4	5.78	1.55	0.1983 NS
誤差	261.52	70	3.74		

分散分析表-茎の伸長速度

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	1.72	2	0.86	16.95	0.0000 ***
B(岩石添加量)	0.34	2	0.17	3.29	0.0429 *
C(培養液濃度)	0.11	1	0.11	2.18	0.1444 NS
A * B	0.07	4	0.02	0.36	0.8392 NS
A * C	0.21	2	0.10	2.06	0.1352 NS
B * C	0.21	2	0.11	2.07	0.1333 NS
A * B * C	0.44	4	0.11	2.14	0.0847 NS
誤差	3.56	70	0.05		

分散分析表-根の伸長速度

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	279.29	2	139.64	12.49	0.0000 ***
B(岩石添加量)	180.49	2	90.25	8.07	0.0007 ***
C(培養液濃度)	132.74	1	132.74	11.87	0.0010 ***
A * B	86.51	4	21.63	1.93	0.1144 NS
A * C	168.44	2	84.22	7.53	0.0011 **
B * C	30.74	2	15.37	1.37	0.2598 NS
A * B * C	28.42	4	7.10	0.64	0.6390 NS
誤差	782.86	70	11.18		

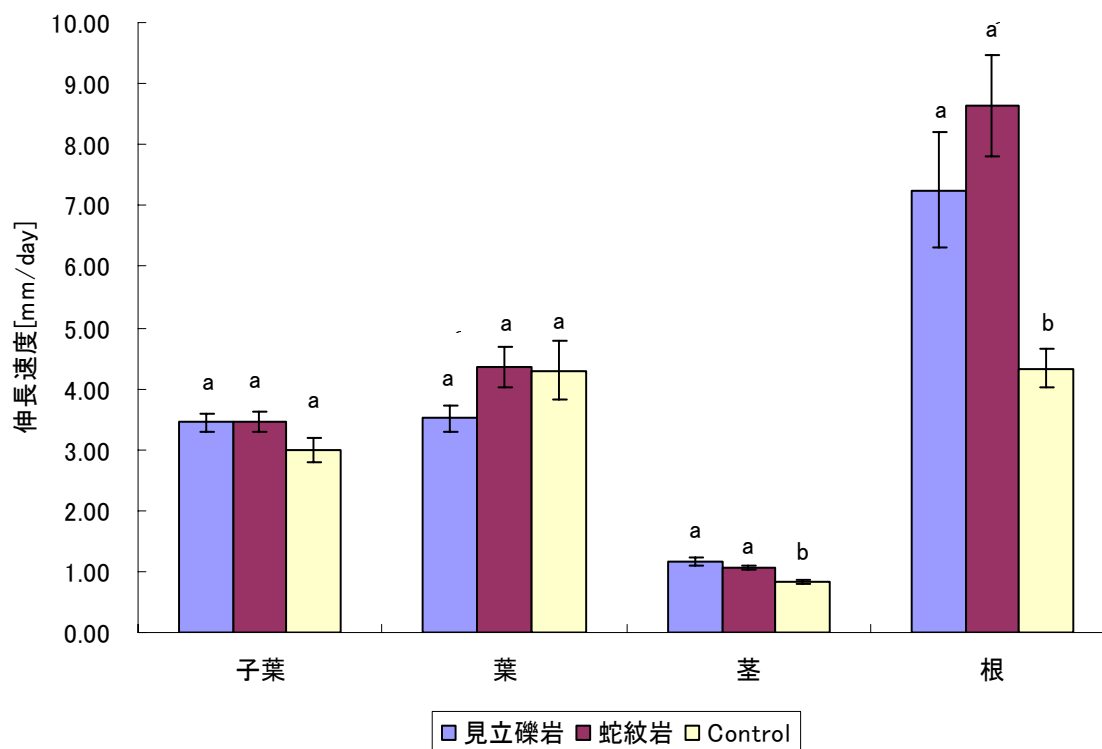
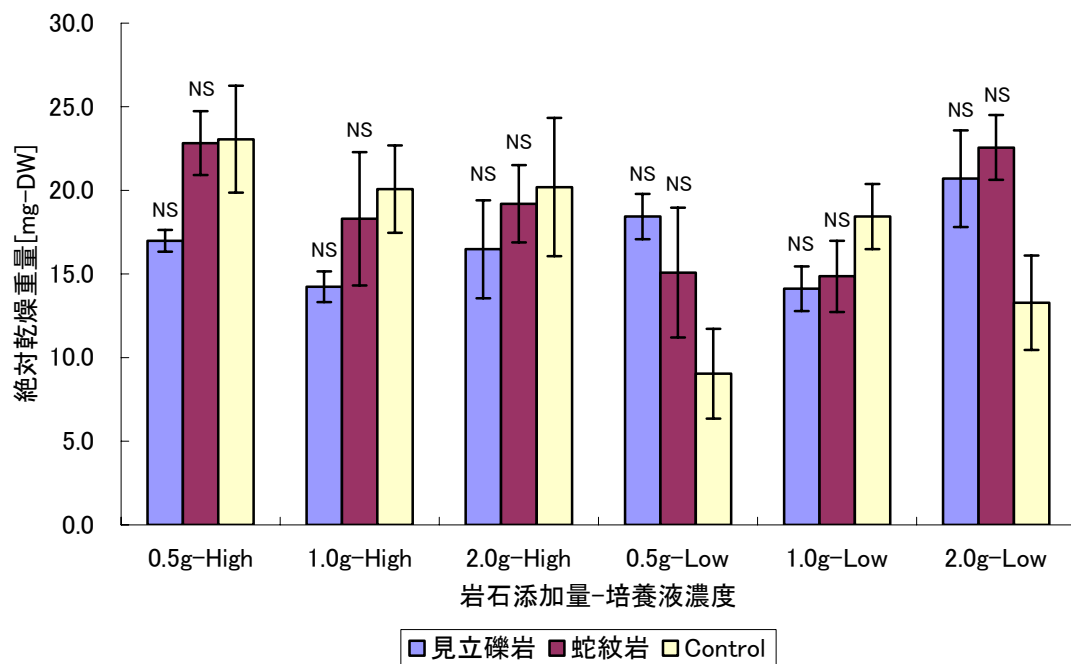


Fig.4. 各器官の岩石種別伸長速度

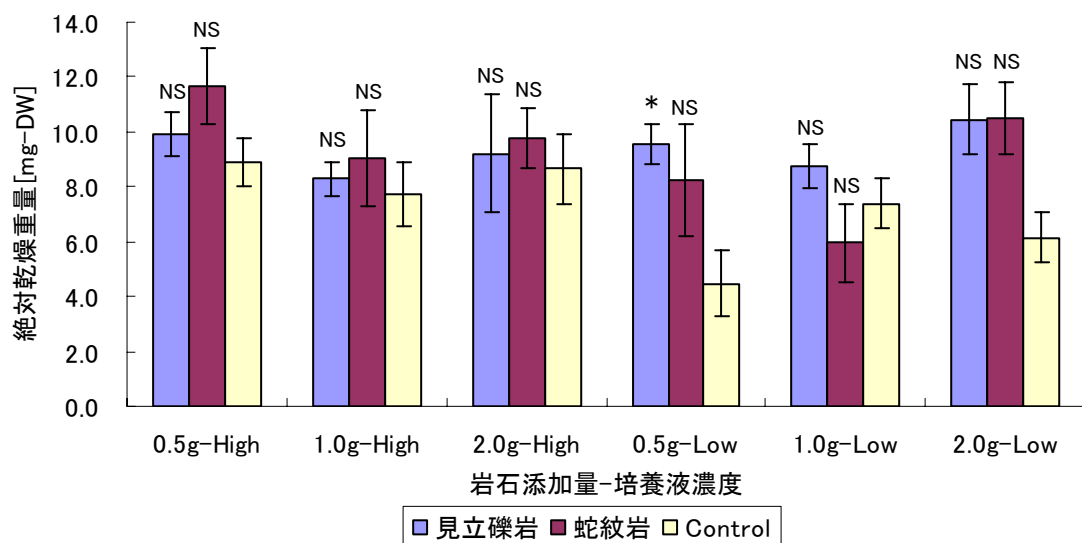
Tukey を用いて岩石種間（見立礫岩、蛇紋岩、Control）の多重比較を行った結果を示す。両者間の有意水準 $p < 0.05$ の場合、 $a > b$ と分類する。 ab は a, b 両者に対して NS ($p > 0.05$)。

(2) 各器官の重量

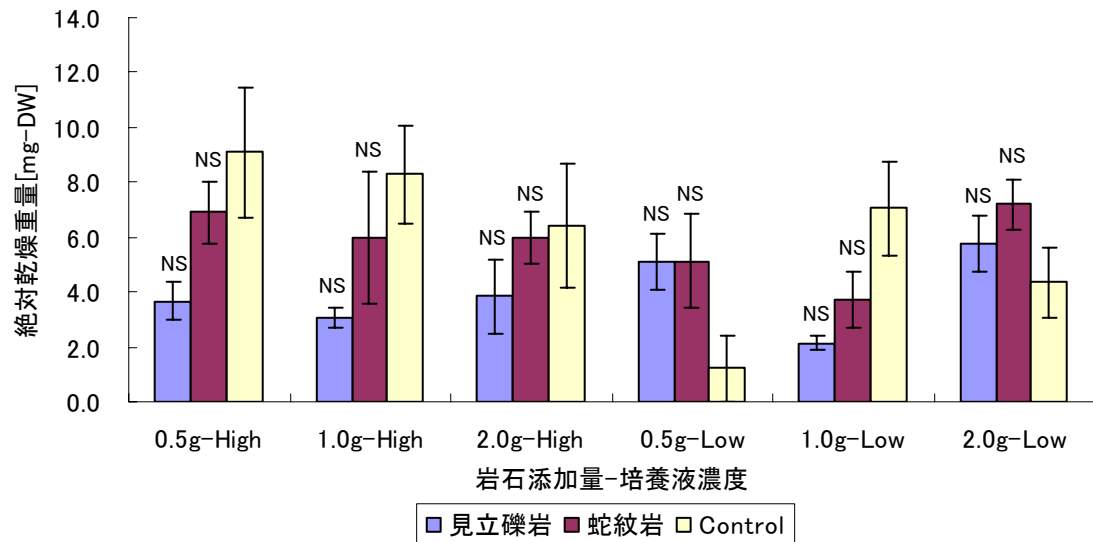
15日間栽培後、80℃で48時間以上乾燥させた植物体の全量および各器官（子葉、葉、茎、根）の重量を測定した。Fig.5に各栽培条件における乾燥重量を示した。全量および葉、根の重量については、見立礫岩、蛇紋岩のいずれを添加した場合にも Control と比較して有意差は認められなかった。一方で子葉については、見立礫岩 0.5g を Low 培養液に添加した場合に Control よりも重量が大きいことが認められた ($p<0.05$)。茎については、Low 培養液に見立礫岩あるいは蛇紋岩を 2.0g 添加した場合に Control よりも重量が大きいことが認められた（いずれも $p<0.05$ ）。



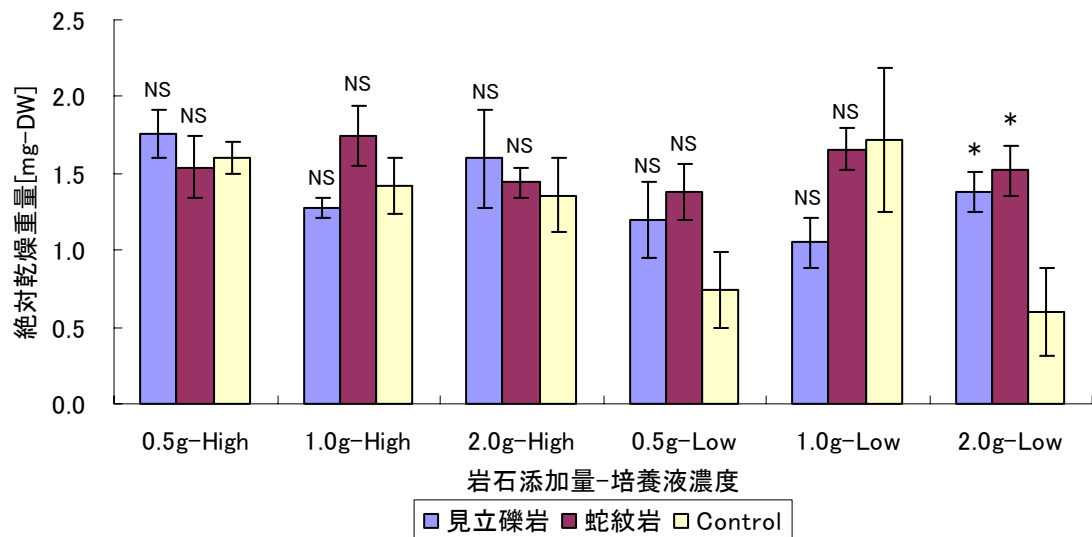
各栽培条件における植物体の全絶対乾燥重量(15日間)



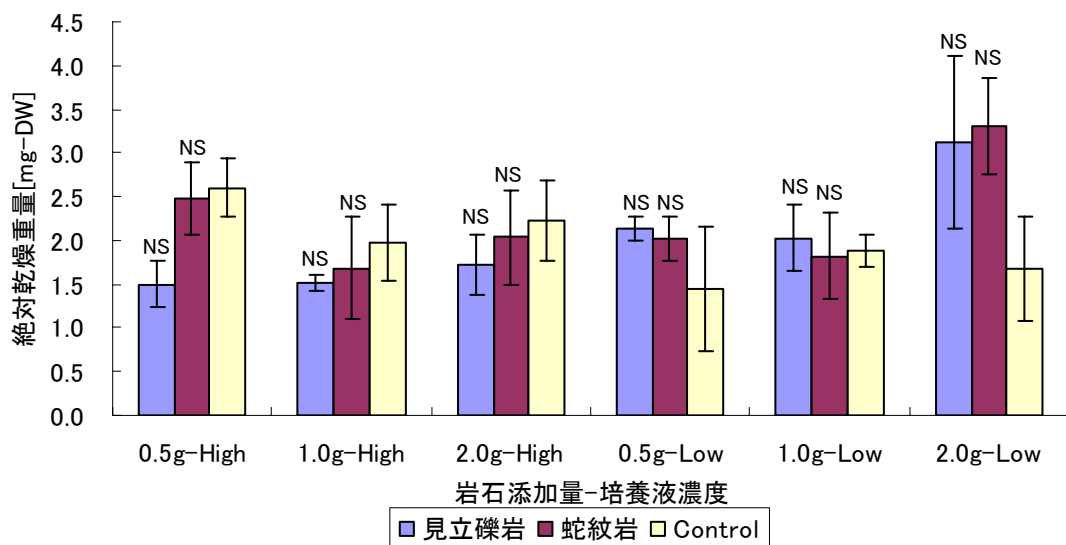
各栽培条件における子葉の絶対乾燥重量(15日間)



各栽培条件における葉の絶対乾燥重量(15日間)



各栽培条件における茎の絶対乾燥重量(15日間)



各栽培条件における根の絶対乾燥重量(15日間)

Fig.5.各栽培条件で15日間栽培後のハツカダイコンの絶対乾燥重量

Tukey を用いて算出した Control に対する有意差を示す。NS (not significant) ; * $p < 0.05$ (significant) ; ** $p < 0.01$ (highly significant) ; *** $p < 0.001$ (very highly significant). バーは標準誤差を示す。反復数 $n=5$ 。

また全絶対乾燥重量および各器官の絶対乾燥重量について分散分析を行った結果を Table5 に示した。分散分析表より、全絶対乾燥重量については培養液濃度の違いによって有意差が認められ、また岩石種と培養液濃度の交互作用によっても有意差が認められた。葉の絶対乾燥重量については岩石種の違いによって有意差が認められ、また岩石種と培養液濃度の交互作用によっても有意差が認められた。茎の絶対乾燥重量については岩石種あるいは培養液濃度の違いによってそれぞれ有意差が認められたが、交互作用には有意差が認められなかった。子葉および根の絶対乾燥重量に関しては各因子による有意差は認められなかった。

Table 5. 各器官の伸長速度に関する分散分析表 ; NS (not significant) ; * $p < 0.05$ (significant) ; ** $p < 0.01$ (highly significant) ; *** $p < 0.001$ (very highly significant).

分散分析表-全絶対乾燥重量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	62	2	31.0	0.90	0.4116 NS
B(岩石添加量)	63	2	31.5	0.91	0.4061 NS
C(培養液濃度)	169	1	169.0	4.90	0.0301 *
A * B	191	4	47.8	1.39	0.2477 NS
A * C	324	2	161.9	4.69	0.0122 *
B * C	195	2	97.3	2.82	0.0663 NS
A * B * C	176	4	44.0	1.28	0.2878 NS
誤差	2450	71	34.5		

分散分析表-子葉の絶対乾燥重量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	487	2	244	1.81	0.1712 NS
B(岩石添加量)	393	2	196	1.46	0.2396 NS
C(培養液濃度)	16	1	15.5	0.12	0.7353 NS
A * B	472	4	118	0.88	0.4824 NS
A * C	471	2	235	1.75	0.1815 NS
B * C	418	2	209	1.55	0.2189 NS
A * B * C	452	4	113	0.84	0.5050 NS
誤差	9561	71	135		

分散分析表-葉の絶対乾燥重量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	79.4	2	39.7	3.78	0.0275 *
B(岩石添加量)	4.8	2	2.4	0.23	0.7956 NS
C(培養液濃度)	36.3	1	36.3	3.46	0.0671 NS
A * B	74.8	4	18.7	1.78	0.1420 NS
A * C	77.2	2	38.6	3.68	0.0303 *
B * C	36.1	2	18.1	1.72	0.1863 NS
A * B * C	57.8	4	14.4	1.38	0.2509 NS
誤差	745	71	10.5		

分散分析表-茎の絶対乾燥重量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	1.64	2	0.82	3.34	0.0412 *
B(岩石添加量)	0.55	2	0.27	1.11	0.3345 NS
C(培養液濃度)	2.23	1	2.23	9.06	0.0036 **
A * B	2.38	4	0.60	2.43	0.0558 NS
A * C	0.79	2	0.40	1.61	0.2067 NS
B * C	1.34	2	0.67	2.73	0.0721 NS
A * B * C	1.53	4	0.38	1.56	0.1947 NS
誤差	17.44	71	0.25		

分散分析表-根の絶対乾燥重量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	34.5	2	17.3	1.20	0.3077 NS
B(岩石添加量)	45.4	2	22.7	1.58	0.2142 NS
C(培養液濃度)	6.3	1	6.3	0.44	0.5107 NS
A * B	59.8	4	15.0	1.04	0.3942 NS
A * C	26.7	2	13.4	0.93	0.4007 NS
B * C	10.3	2	5.2	0.36	0.6997 NS
A * B * C	34.9	4	8.7	0.60	0.6604 NS
誤差	1023	71	14.4		

さらに各器官の絶対乾燥重量を岩石種別に分類した (Fig.6)。Tukey による多重比較検定を行った結果、全絶対乾燥重量、子葉および根の絶対乾燥重量に関しては添加した岩石種によって有意差が認められなかった。葉に関しては見立礫岩を添加した場合に Control よりも重量が小さいことが認められた。茎に関しては蛇紋岩を添加した場合に Control と比較して重量が大きいたことが認められた。

結果より、見立礫岩の添加により葉の絶対乾燥重量は減少し、蛇紋岩の添加によつては茎の絶対乾燥重量は増加することが分かった。

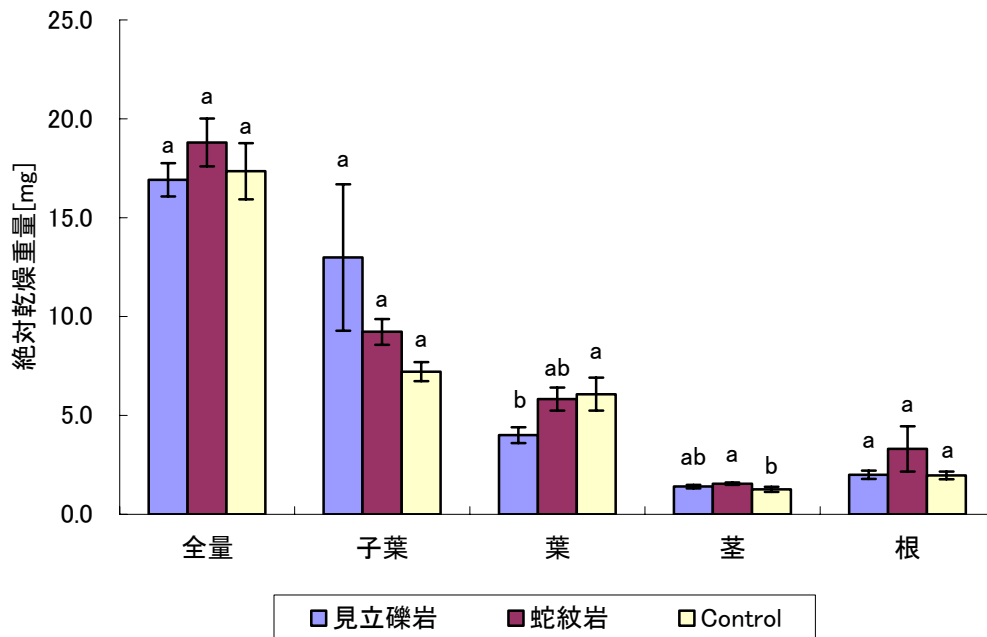


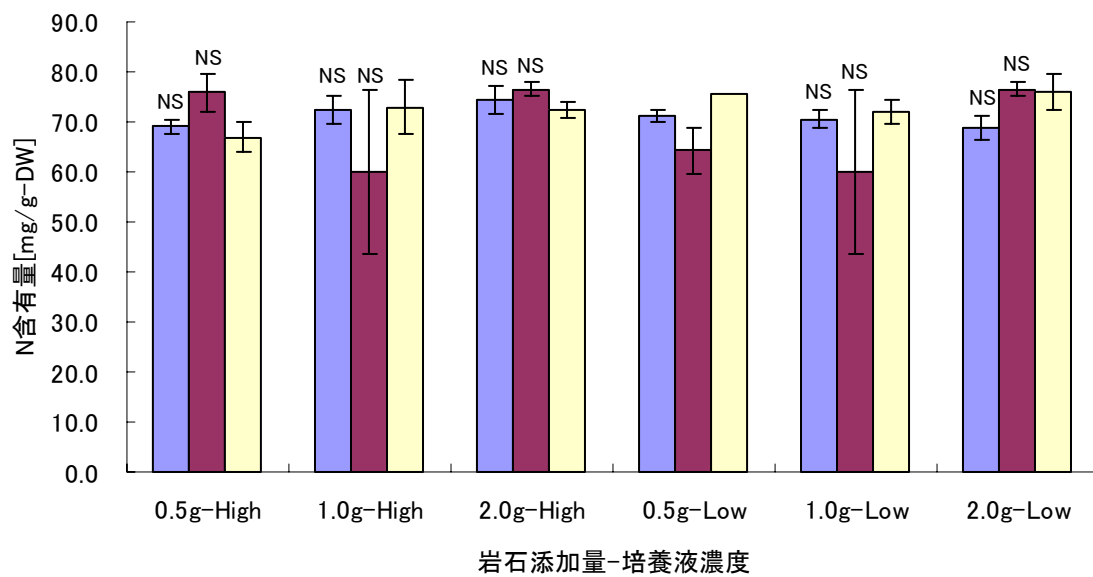
Fig.6. 各器官の岩石種別絶対乾燥重量

Tukey を用いて岩石種間（見立礫岩、蛇紋岩、Control）の多重比較を行った結果を示す。両者間の有意水準 $p < 0.05$ の場合、 $a > b$ と分類する。ab は a, b 両者に対して NS ($p > 0.05$)。

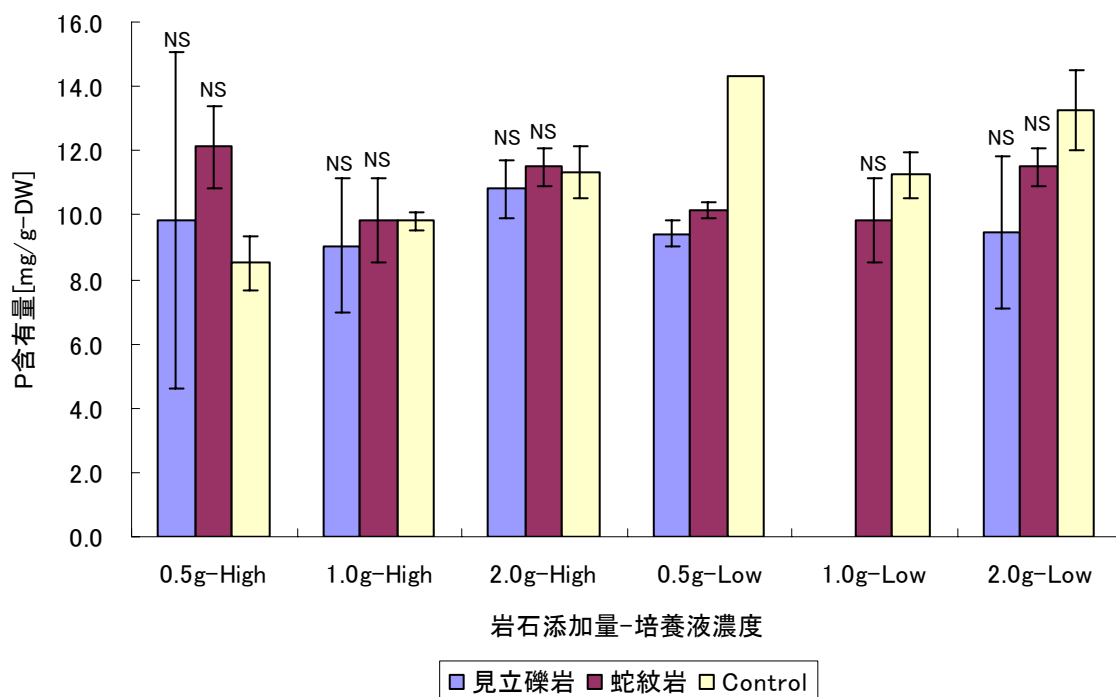
(3) 葉における多量元素含有量 (N, P, K, Ca, Mg, Na)

15 日間栽培後のハツカダイコンの絶対乾燥重量に関して、添加する岩石種によって有意差が認められた葉について各多量元素含有量 (N, P, K, Ca, Mg, Na) を ICP-AES で測定した。各試料の測定結果からブランクを差し引いた多量元素含有量を絶対乾燥重量 1g 当りに換算した結果を示した (Fig.7)。

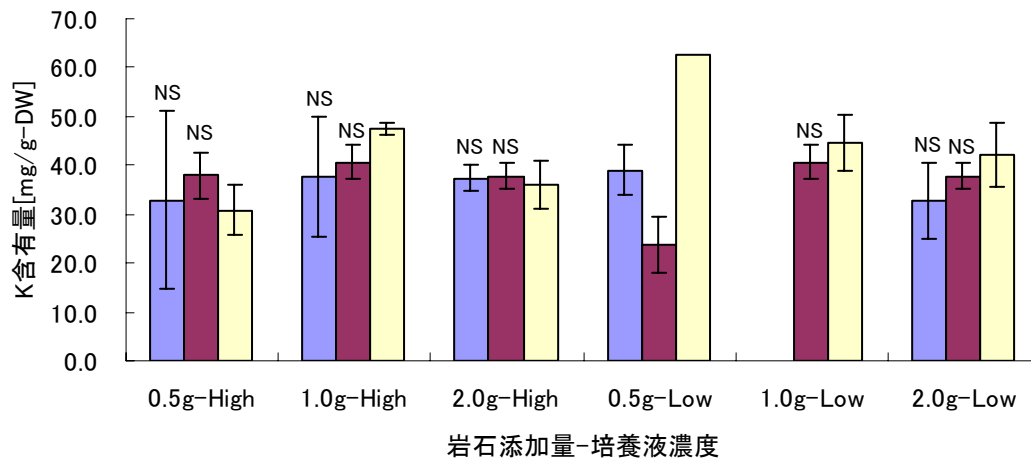
Na については見立礫岩 1.0g を High 培養液に添加した場合に Control よりも含有量が多いことが認められたが ($p < 0.05$)、N, P, K, Ca, Mg についてはいずれの条件で見立礫岩または蛇紋岩を添加した場合においても、Control と比較して有意差が認められなかった ($p > 0.05$)。



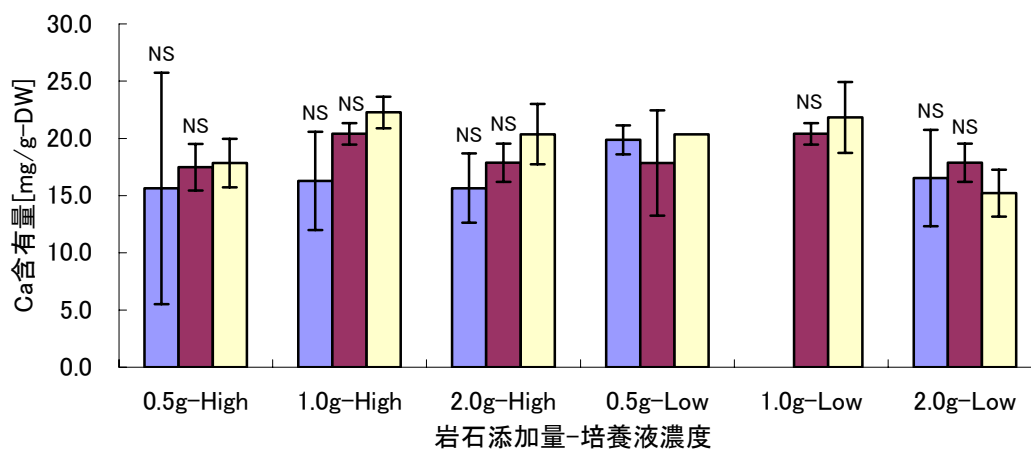
葉(絶対乾燥重量1g)におけるN含有量



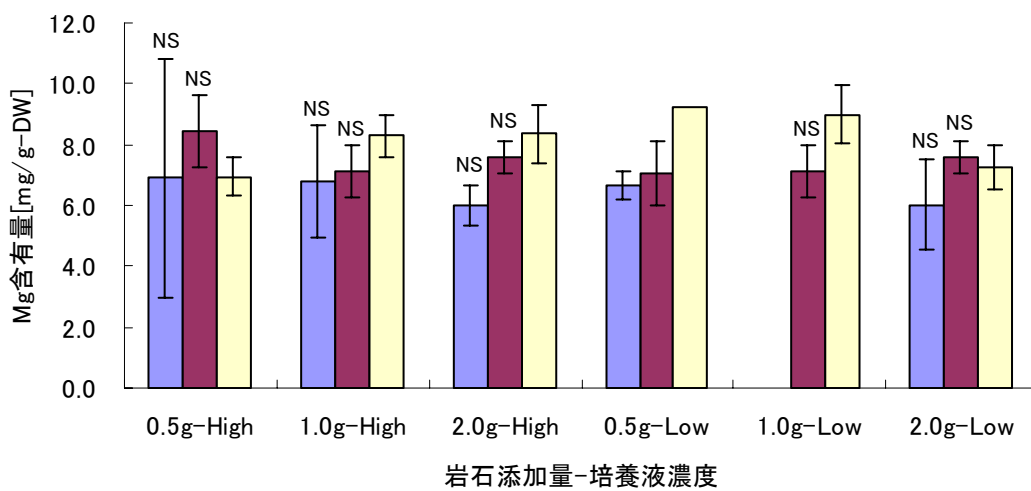
葉(絶対乾燥重量1g)におけるP含有量



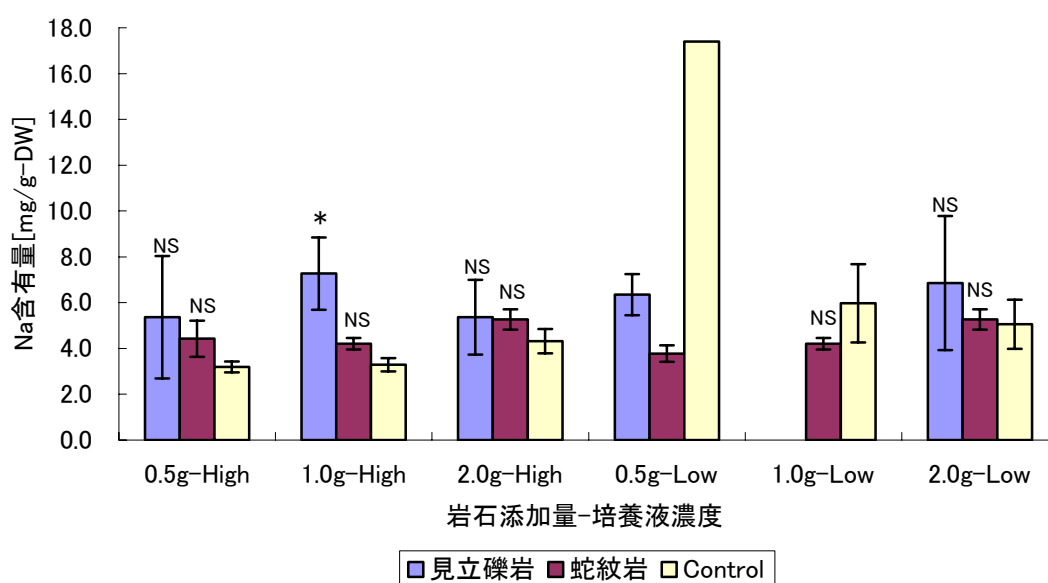
葉(絶対乾燥重量1g)におけるK含有量



葉(絶対乾燥重量1g)におけるCa含有量



葉(絶対乾燥重量1g)におけるMg含有量



葉(絶対乾燥重量1g)におけるNa含有量

Fig.7. 15 日間栽培後のハツカダイコンの葉における多量元素含有量

Tukey を用いて算出した Control に対する有意差を示す。NS (not significant) ; * $p < 0.05$ (significant) ; ** $p < 0.01$ (highly significant) ; *** $p < 0.001$ (very highly significant). バーは標準誤差を示す。Control, 0.5g-Low では反復が得られず。

また各多量元素について分散分析を行った結果を Table6 に示した。分散分析表より、葉における Na 含有量に関しては、岩石種あるいは培養液濃度の違いにより有意差が認められ、さらに全ての交互作用によっても有意差が認められた。一方で、葉における N, P, K, Ca, Mg 含有量に関しては、いずれの因子によっても有意差は認められなかった。

Table 6. 葉における多量元素含有量に関する分散分析表 ; NS (not significant) ; * $p < 0.05$ (significant) ; ** $p < 0.01$ (highly significant) ; *** $p < 0.001$ (very highly significant).

分散分析表-葉における N 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	31.9	2	16.0	0.17	0.8413 NS
B(岩石添加量)	184	2	91.8	1.00	0.3749 NS
C(培養液濃度)	12.6	1	12.6	0.14	0.7129 NS
A * B	156	4	39.0	0.42	0.7907 NS
A * C	84.0	2	42.0	0.46	0.6359 NS
B * C	111	2	55.3	0.60	0.5517 NS
A * B * C	804	4	201	2.18	0.0815 NS
誤差	5522	60	92.0		

分散分析表-葉における P 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	28.2	2	14.1	1.66	0.2011 NS
B(岩石添加量)	10.3	2	5.15	0.61	0.5498 NS
C(培養液濃度)	10.2	1	10.2	1.20	0.2779 NS
A * B	5.0	4	1.25	0.15	0.9634 NS
A * C	27.6	2	13.8	1.62	0.2082 NS
B * C	4.53	2	2.27	0.27	0.7670 NS
A * B * C	28.7	3	9.57	1.13	0.3480 NS
誤差	408	48	8.50		

分散分析表-葉における K 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	781	2	391	2.51	0.0920 NS
B(岩石添加量)	75.7	2	37.9	0.24	0.7846 NS
C(培養液濃度)	21.7	1	21.7	0.14	0.7103 NS
A * B	341	4	85.1	0.55	0.7012 NS
A * C	806	2	403	2.60	0.0855 NS
B * C	297	2	149	0.96	0.3916 NS
A * B * C	820	3	273	1.76	0.1680 NS
誤差	7145	46	155		

分散分析表-葉における Ca 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	50.7	2	25.4	0.58	0.5625 NS
B(岩石添加量)	53.3	2	26.6	0.61	0.5469 NS
C(培養液濃度)	0.52	1	0.52	0.01	0.9134 NS
A * B	30.0	4	7.49	0.17	0.9517 NS
A * C	21.3	2	10.7	0.24	0.7838 NS
B * C	32.6	2	16.3	0.37	0.6900 NS
A * B * C	34.5	3	11.5	0.26	0.8509 NS
誤差	2091	48	43.6		

分散分析表-葉における Mg 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	18.7	2	9.36	1.74	0.1861 NS
B(岩石添加量)	3.97	2	1.99	0.37	0.6931 NS
C(培養液濃度)	0.14	1	0.14	0.03	0.8710 NS
A * B	2.40	4	0.60	0.11	0.9779 NS
A * C	2.49	2	1.24	0.23	0.7943 NS
B * C	3.15	2	1.57	0.29	0.7476 NS
A * B * C	8.06	3	2.69	0.50	0.6844 NS
誤差	258	48	5.38		

分散分析表-葉における Na 含有量

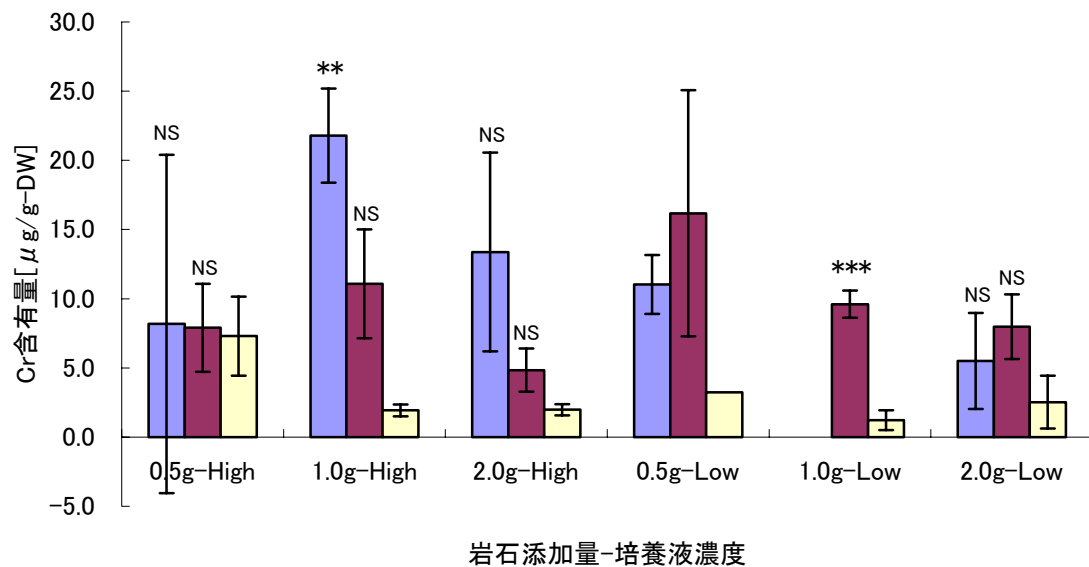
因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	58.2	2	29.1	3.92	0.0266 *
B(岩石添加量)	27.5	2	13.8	1.85	0.1679 NS
C(培養液濃度)	58.1	1	58.1	7.82	0.0074 **
A * B	80.9	4	20.2	2.72	0.0403 *
A * C	102	2	50.9	6.85	0.0024 **
B * C	51.8	2	25.9	3.48	0.0386 *
A * B * C	87.8	3	29.3	3.94	0.0136 *
誤差	357	48	7.4		

(4) 葉における微量元素含有量 (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn)

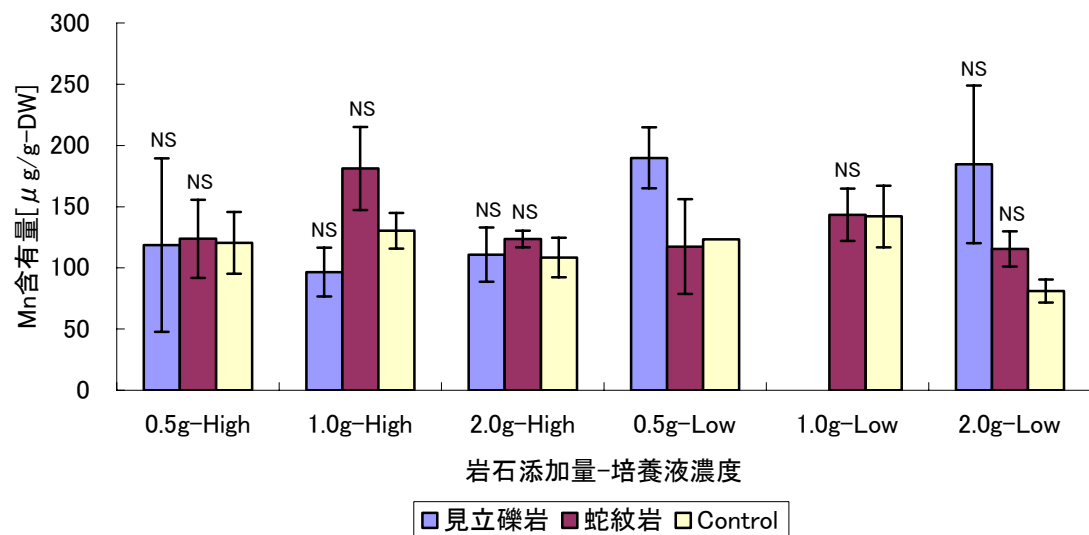
多量元素と同様に、15 日間栽培したハツカダイコンの葉に含有する微量元素量 (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn) を ICP-AES で測定した。各試料の測定結果からブランクを差し引いた多量元素含有量を絶対乾燥重量 1g 当りに換算したその結果を示した (Fig.8)。

Cr については見立礫岩 1.0g を High 培養液に添加した場合 ($p<0.01$) と蛇紋岩 1.0g を Low 培養液に添加した場合 ($p<0.001$) に、Control と比較して葉における含有量が多いことが認められた。また Fe に関しても Cr と同様に、見立礫岩 1.0g を High 培養液に添加した場合 ($p<0.05$) と蛇紋岩 1.0g を Low 培養液に添加した場合 ($p<0.01$) に、Control と比較して葉における含有量が多いことが認められた。Ni については蛇紋岩を添加した場合に、いずれの岩石添加量および培養液濃度においても Control と比較して含有量が多いことが認められた (全て $p<0.001$)。見立礫岩を添加した場合にはいずれの条件においても Control と比較して Ni 含有量に有意差が認められなかった ($p>0.05$)。Cu については見立礫岩 1.0g を High 培養液に、あるいは 2.0g を

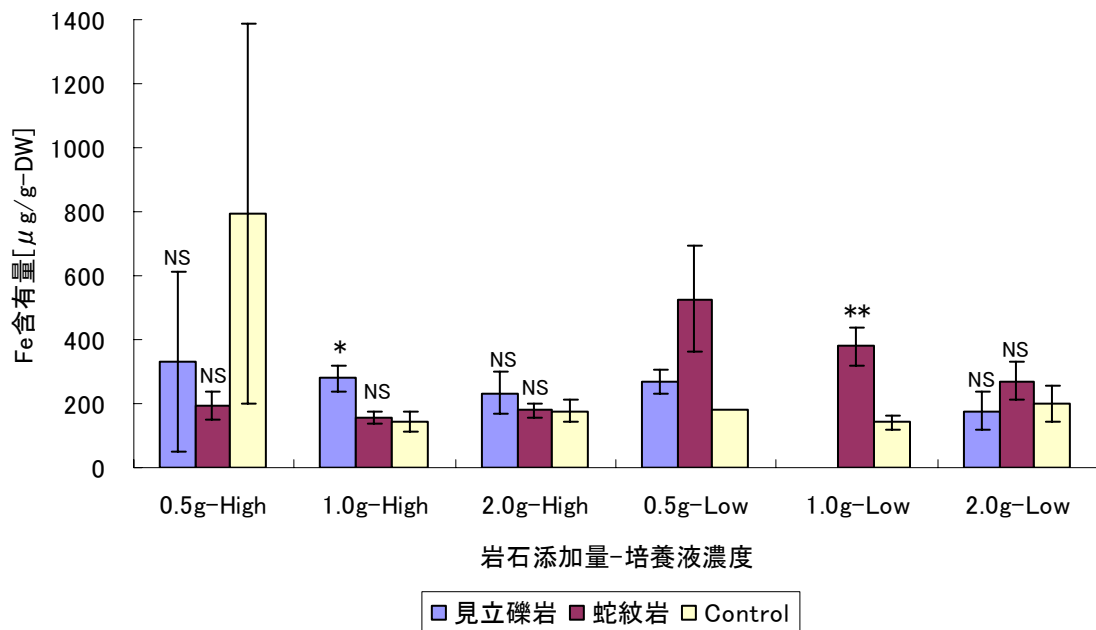
Low 培養液に添加した場合に Control と比較して含有量が多いことが認められた ($p<0.01$, $p<0.001$)。蛇紋岩を添加した場合についてはいずれの条件においても Control と比較して Cu 含有量に有意差は認められなかった ($p>0.05$)。Mn および Zn の含有量に関しては見立礫岩、蛇紋岩をいずれの条件で添加した場合にも Control との間に有意差は認められなかった ($p>0.05$)。



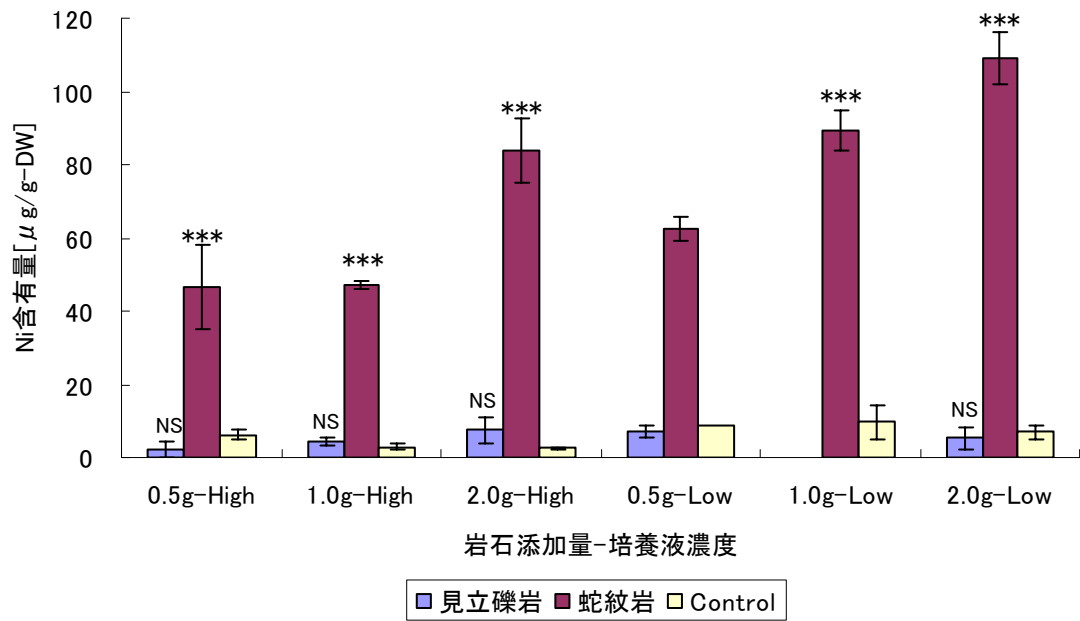
葉(絶対乾燥重量1g)におけるCr含有量



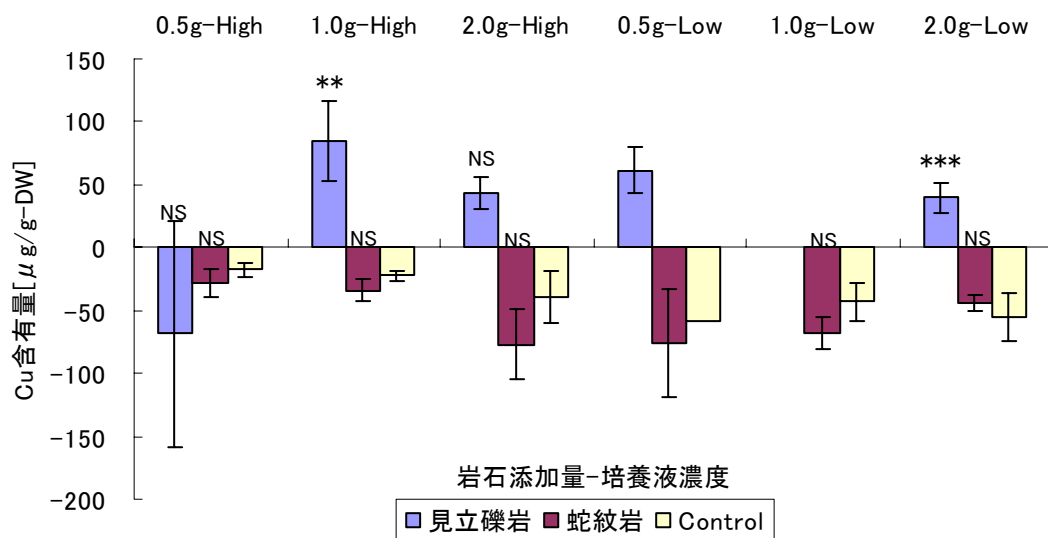
葉(絶対乾燥重量1g)におけるMn含有量



葉(絶対乾燥重量1g)におけるFe含有量



葉(絶対乾燥重量1g)におけるNi含有量



葉(絶対乾燥重量1g)におけるCu含有量

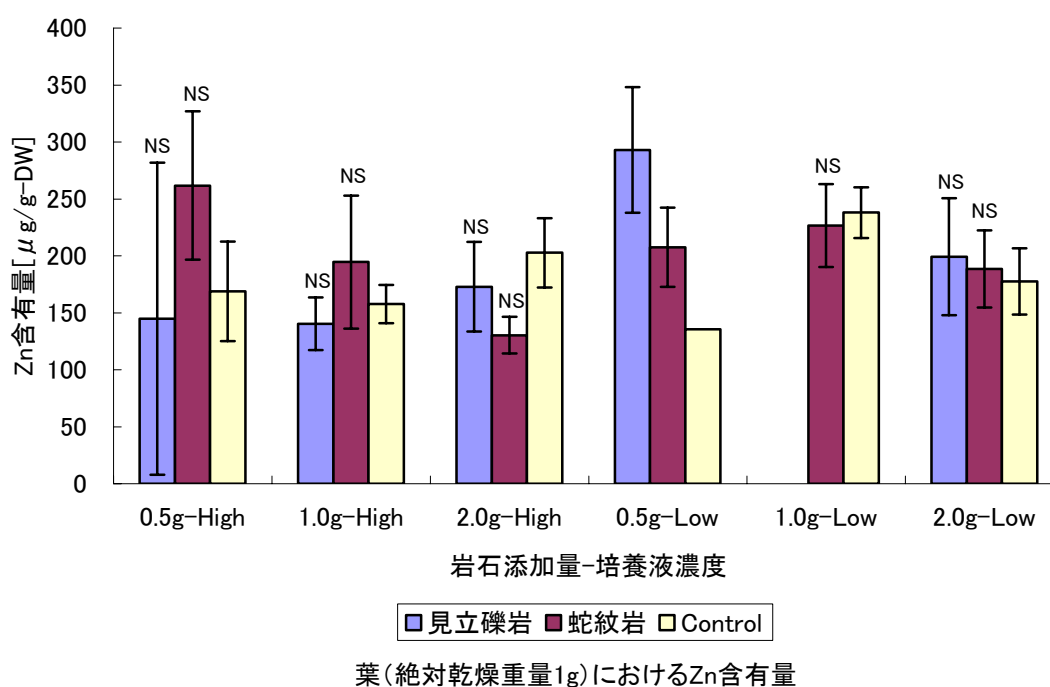


Fig.8. 15 日間栽培後のハツカダイコンの葉における微量元素含有量

Tukey を用いて算出した Control に対する有意差を示す。NS (not significant) ; * $p < 0.05$ (significant) ; ** $p < 0.01$ (highly significant) ; *** $p < 0.001$ (very highly significant). バーは標準誤差を示す。Control,, 0.5g-Low では反復が得られず。見立礫岩、1.0g-Low は 5 反復全て欠損。

さらに各微量元素含有量（葉の絶対乾燥重量 1g 当り）について、岩石種（見立礫岩、蛇紋岩、Control）、岩石添加量（0.5g, 1.0g, 2.0g ; DW/培養液 50mL）、培養液濃度（High, Low）を因子として分散分析を行った。その結果を Table7 に示した。

Cr については岩石種の違いによってのみ含有量に有意差が認められた。Mn については各個別の因子では有意差が認められなかったが、岩石種と岩石添加量の交互作用によってその含有量に有意差が認められた。Fe の含有量についてはいずれの因子によっても有意差は認められなかった。Ni の含有量については岩石種、岩石添加量、培養液濃度の各因子によってそれぞれ有意差が認められ、さらに岩石種と岩石添加量の交互作用、岩石種と培養液濃度の交互作用によっても有意差が認められた。しかし一方で岩石添加量と培養液濃度の交互作用によっても含有量に有意差は認められなかったことから、岩石添加量と培養液濃度はそれぞれ独立して Ni の含有量に有意差をもたらす因子であることが分かった。Cu の含有量については岩石種の違いによる有意差が認められ、また岩石添加量と培養液濃度の交互作用によっても有意差が認められた。一方で岩石種と岩石添加量あるいは培養液濃度の交互作用による Cu 含有量の有意差は認められなかった。Zn については岩石種と岩石添加量の交互作用によって含有量の有意差が認められた。

Table 7. 葉における多量元素含有量に関する分散分析表 ; NS (not significant) ; *p < 0.05 (significant) ; **p < 0.01 (highly significant) ; ***p < 0.001 (very highly significant).

分散分析表-葉における Cr 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	741	2	370	6.480	0.0027 **
B(岩石添加量)	89	2	44	0.775	0.4647 NS
C(培養液濃度)	81	1	81	1.410	0.2391 NS
A * B	77	4	19	0.337	0.8522 NS
A * C	345	2	173	3.017	0.0555 NS
B * C	337	2	169	2.951	0.0590 NS
A * B * C	502	4	126	2.195	0.0787 NS
誤差	3888	68	57		

分散分析表-葉における Mn 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	8205	2	4102	0.782	0.4617 NS
B(岩石添加量)	4717	2	2359	0.449	0.6399 NS
C(培養液濃度)	0	1	0	0.000	0.9927 NS
A * B	68053	4	17013	3.242	0.0171 *
A * C	9462	2	4731	0.901	0.4108 NS
B * C	11443	2	5722	1.090	0.3420 NS
A * B * C	58900	4	14725	2.806	0.0323 *
誤差	356876	68	5248		

分散分析表-葉における Fe 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	10187	2	5094	0.054	0.9479 NS
B(岩石添加量)	407885	2	203942	2.142	0.1253 NS
C(培養液濃度)	33275	1	33275	0.349	0.5564 NS
A * B	39953	4	9988	0.105	0.9804 NS
A * C	491514	2	245757	2.581	0.0831 NS
B * C	116130	2	58065	0.610	0.5464 NS
A * B * C	658554	4	164639	1.729	0.1536 NS
誤差	6474219	68	95209		

分散分析表-葉における Ni 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	61053	2	30527	91.920	0.0000 ***
B(岩石添加量)	6437	2	3218	9.691	0.0002 ***
C(培養液濃度)	1331	1	1331	4.008	0.0493 *
A * B	12826	4	3207	9.656	0.0000 ***
A * C	1836	2	918	2.764	0.0701 NS
B * C	107	2	53	0.161	0.8518 NS
A * B * C	329	4	82	0.248	0.9099 NS
誤差	22583	68	332		

分散分析表-葉における Cu 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	66125	2	33063	15.695	0.0000 ***
B(岩石添加量)	3822	2	1911	0.907	0.4085 NS
C(培養液濃度)	1.6	1	2	0.001	0.9778 NS
A * B	13631	4	3408	1.618	0.1798 NS
A * C	3882	2	1941	0.921	0.4029 NS
B * C	20341	2	10171	4.828	0.0109 *
A * B * C	35914	4	8979	4.262	0.0039 **
誤差	143245	68	2107		

分散分析表-葉における Zn 含有量

因子	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
A(岩石種)	5659	2	2830	0.251	0.7786 NS
B(岩石添加量)	19763	2	9881	0.877	0.4207 NS
C(培養液濃度)	3785	1	3785	0.336	0.5641 NS
A * B	144428	4	36107	3.205	0.0180 *
A * C	5380	2	2690	0.239	0.7883 NS
B * C	10490	2	5245	0.465	0.6298 NS
A * B * C	153265	4	38316	3.401	0.0135 *
誤差	766187	68	11267		

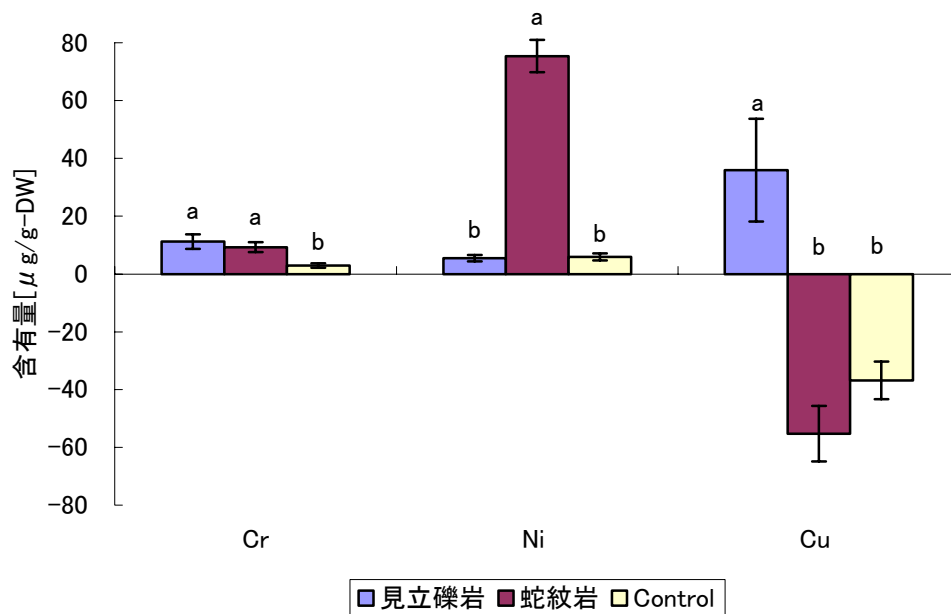


Fig.9. 岩石種別分類による葉における Cr, Ni, Cu の含有量

Tukey を用いて岩石種間（見立礫岩、蛇紋岩、Control）の多重比較を行った結果を示す。両者間の有意水準 $p < 0.05$ の場合、 $a > b$ と分類する。ab は a, b 両者に対して NS ($p > 0.05$)。

ここで岩石種の違いによって含有量に有意差が生じた Cr, Ni, Cu に関して、各元素含有量 ($\mu\text{g}/\text{Leaf } 1\text{g-DW}$) を岩石種別に示した (Fig.9)。Cr に関しては見立礫岩あるいは蛇紋岩のいずれを添加した場合にも、葉における含有量が Control と比較して多いことが認められた。Ni に関しては、見立礫岩を添加した場合にはその含有量が Control と有意差は認められず、一方で蛇紋岩を添加した場合には Control と比較して含有量が多いことが認められた。Cu に関しては見立礫岩を添加した場合に Control と比較して含有量が多いことが認められたが、蛇紋岩を添加した場合には Control との有意差は認められなかった。

結果より、15 日間栽培したハツカダイコンの葉では、蛇紋岩を添加した場合に Ni、見立礫岩を添加した場合に Cu を微量成分の中でも特に多く含有することが分かった。

3-2. 溶出実験

(1) 見立礫岩添加による pH 緩衝効果の評価

見立礫岩を添加した試料について pH の時系列における変化を示し (Fig.11)、さらに添加 15 日後の溶媒については 15 日間における H^+ の変化量を示した (Fig.12)。超純水 (No) に見立礫岩を添加した場合には、15 日間で pH に増加が見られたが、培養液 (High, Low) に添加した場合には pH は減少する傾向が見られた。また各条件別に見ると、Hoagland 培養液の濃度によっては H^+ 濃度に大きな変化は見られないが、添加量が増加するにつれて H^+ 濃度は増加する傾向が見られた。本実験結果からは pH に収束は見られず緩衝効果を実証することは困難である。実証には初期 pH 値を数段階に調整および対照区 (Control) を用いての検討が必要である。

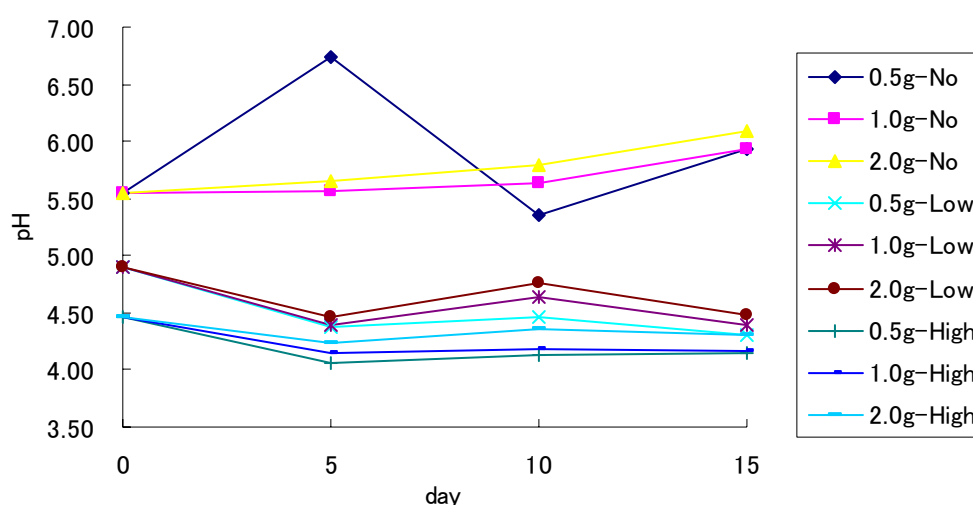


Fig.11. 見立礫岩添加時における pH の時系列変化

pH は平均値、n=3、凡例には各条件を岩石添加量-培養液濃度で表記

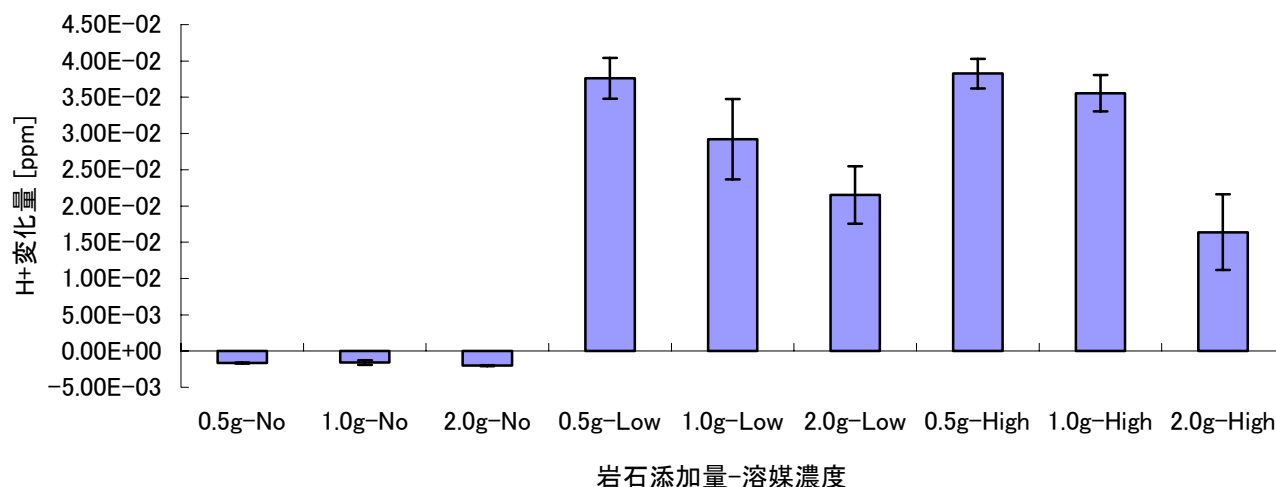
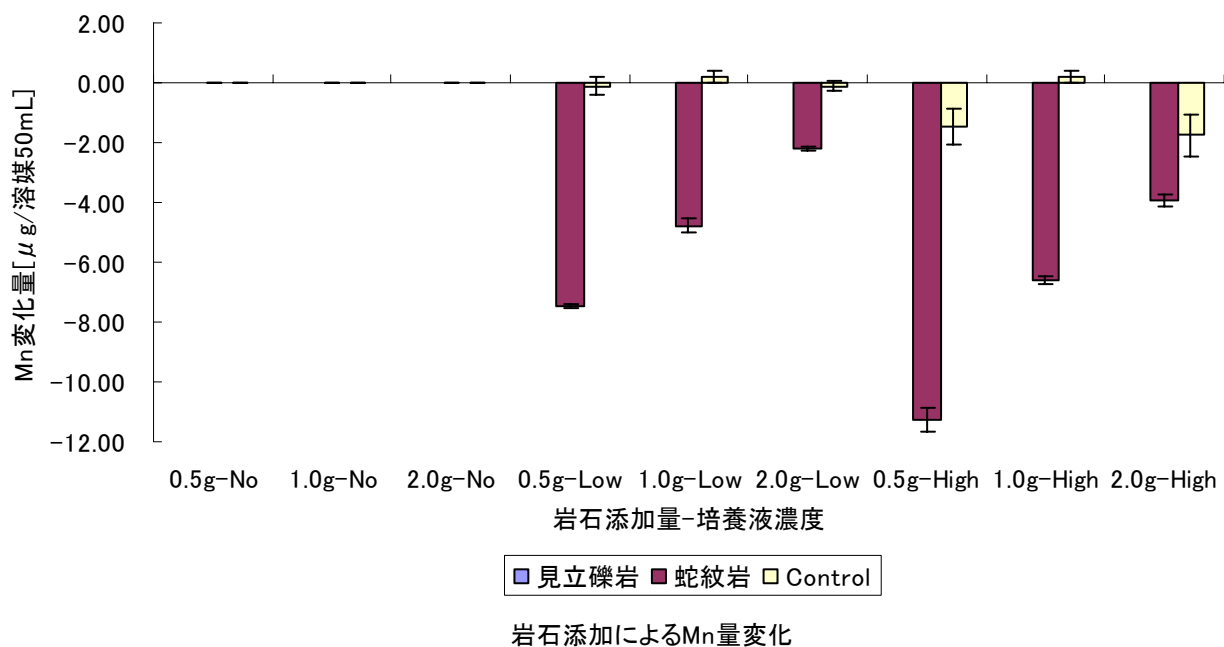
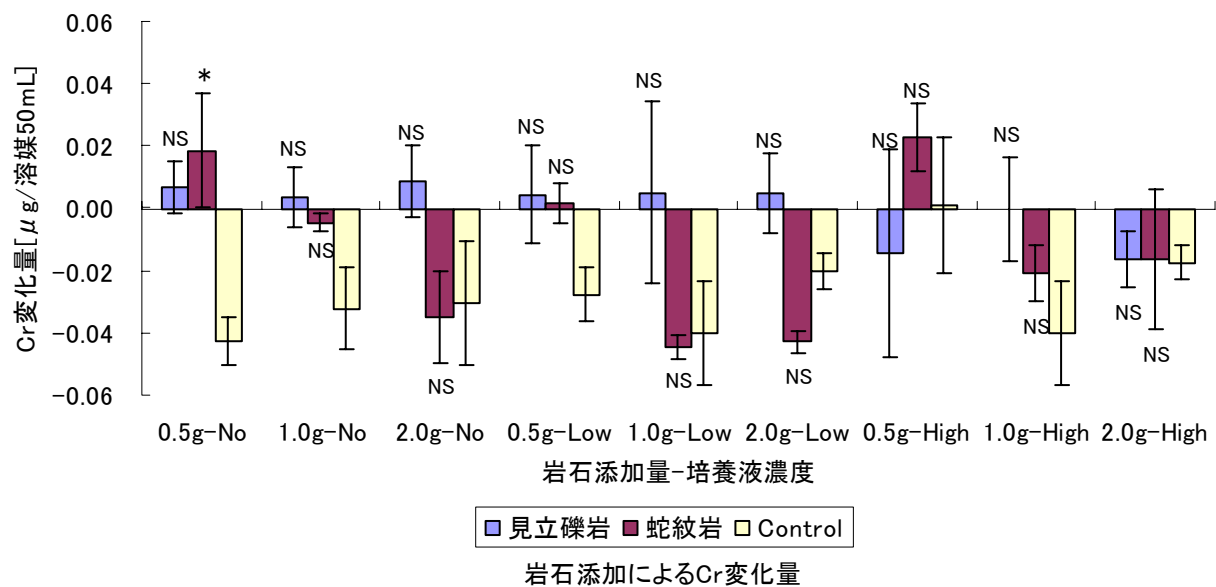
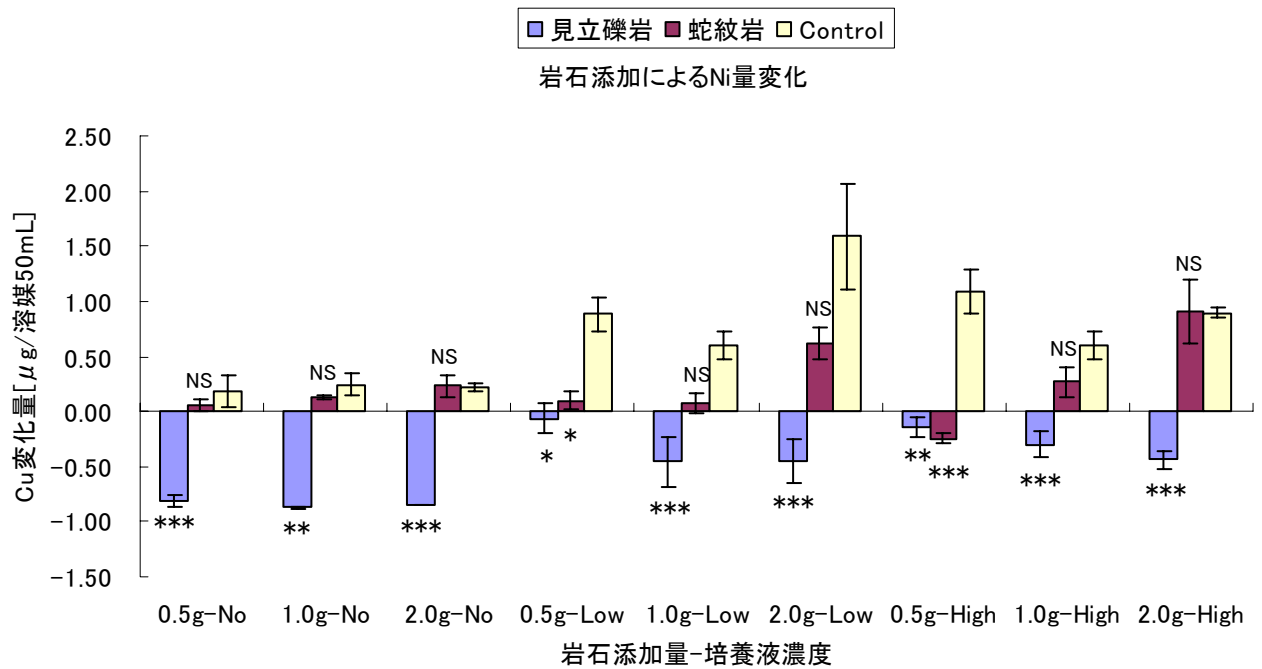
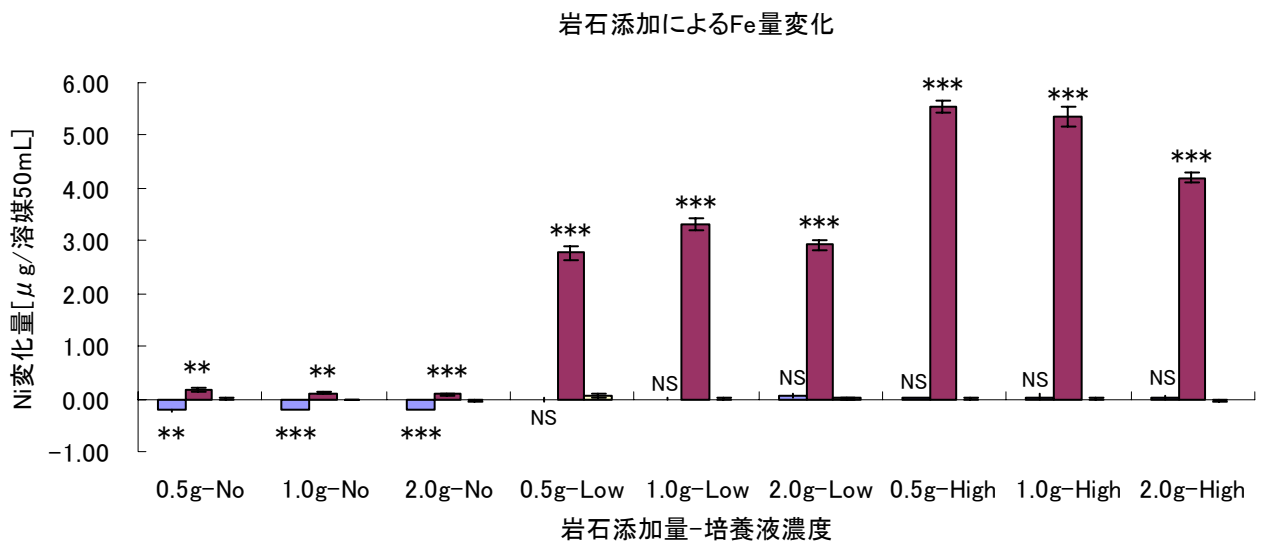
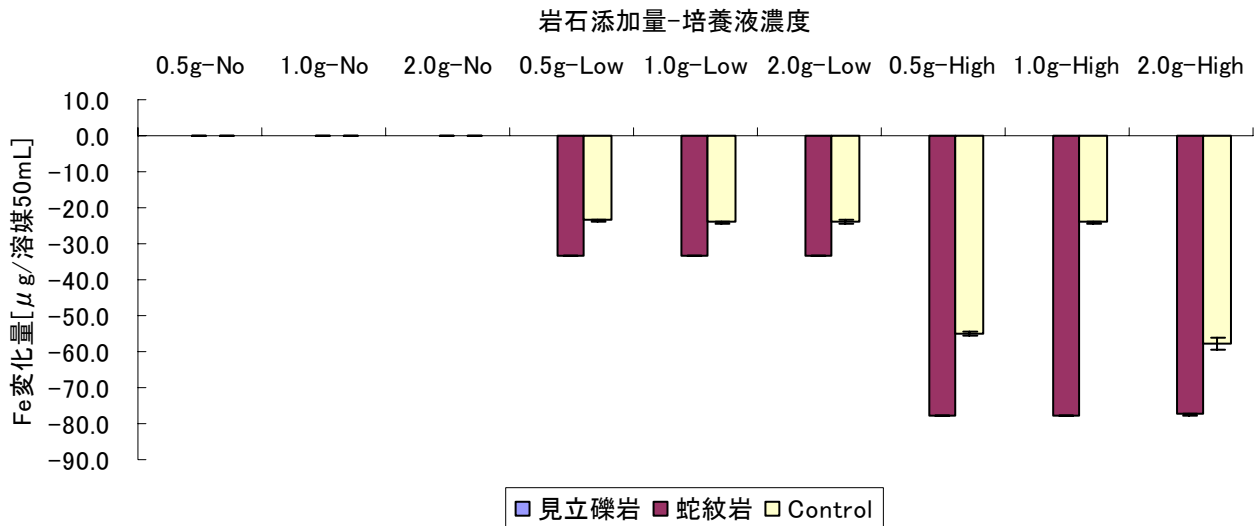


Fig.12. 見立礫岩添加時における H^+ 濃度変化量 ; バーは標準誤差、n=3

(2) 微量元素変化量 (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn)

見立礫岩、蛇紋岩、けい砂 (Control) の各岩石を培養液 (High, Low) あるいは超純水に添加した際の、溶媒中の微量元素量の変化を調査した。元素変化量は岩石を添加して 15 日後の溶媒から岩石未添加の溶媒中に含有する元素量を差し引いた値として算出した (Fig.10)。





岩石添加によるCu量変化

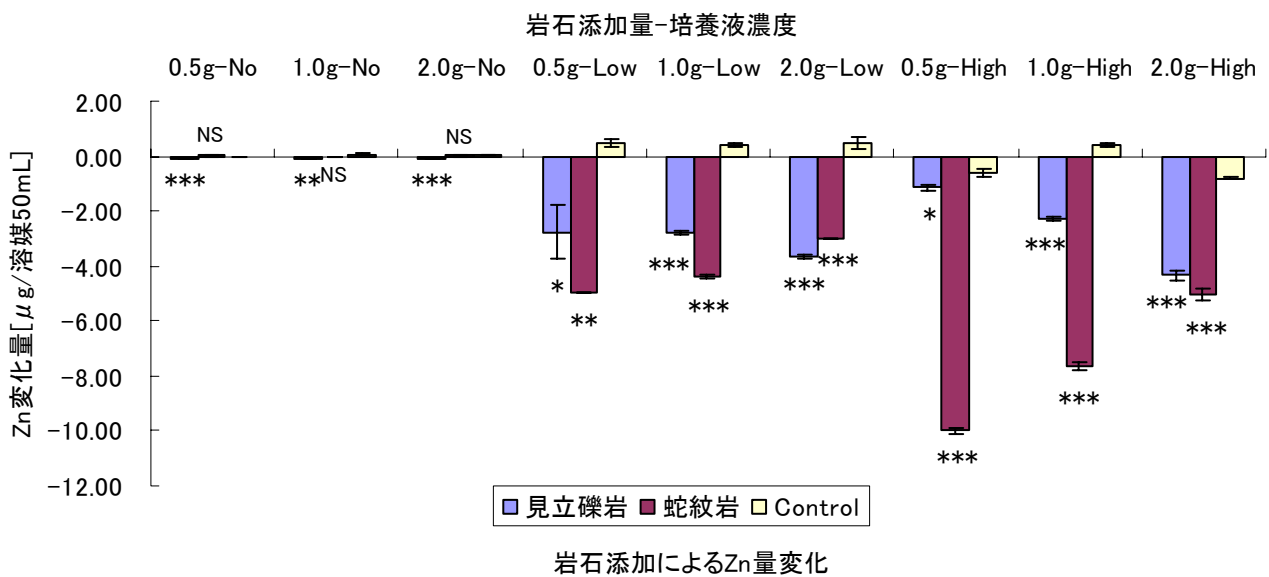


Fig.10. 岩石添加 15 日間における溶媒中の微量元素変化量

Tukey を用いて算出した Control に対する有意差を示す。NS (not significant) ; * $p < 0.05$ (significant) ; ** $p < 0.01$ (highly significant) ; *** $p < 0.001$ (very highly significant). バーは標準誤差を示す。見立礫岩を添加した場合の Fe, Mn については未測定。

Cr の変化量については蛇紋岩 1.0g を超純水 (No) に添加した場合に Control と比較して有意差が認められたが ($p < 0.05$)、その変化量は極めて微量 ($> \pm 0.1 \mu\text{g}$) であるため、分析精度は低く評価は難しい。Mn、Fe については見立礫岩を添加した場合については未測定であるため評価できなかったが、蛇紋岩を添加した際に溶媒中の Mn 量が Control と比較して大きく減少した。超純水に岩石を添加した場合には Mn、Fe ともに変化量は極めて小さかった ($\text{Mn} < \pm 0.01 \mu\text{g}$, $\text{Fe} < \pm 0.05 \mu\text{g}$)。Ni の変化量については蛇紋岩を添加した場合に、いずれの岩石添加量、培養液濃度においても Control と比較して有意差が認められ、特に培養液濃度が高いほど溶媒中の Ni 量は増加した。溶媒中の Ni は Hoagland 培養液には含まれていないことから岩石から溶出したものであるといえる。Cu の変化量については見立礫岩を添加した場合に、添加量および溶媒濃度に限らず溶媒中の Cu 量が減少した。Zn については見立礫岩あるいは蛇紋岩を添加した場合において、Control と比較して溶媒中の含有量の減少が認められた。

4. 考察 (Discussion)

4-1. 各器官における伸長速度と乾燥重量の関係

各器官における伸長速度と乾燥重量の関係を散布図に示した (Fig.13)。さらに伸長速度に対する乾燥重量に関して単回帰分析を行い、回帰の有意性を調査した。

回帰分析の結果得られた回帰直線を Table8 に示した。岩石種を分類しなかった場合には、子葉、葉、茎、根のいずれの器官においても右上がりの直線が得られ、また全ての回帰に有意性が認められた。したがって伸長速度の増加により各器官の重量が増加することが認められた。

続いて岩石種別に分類した場合の回帰式については、その直線の傾きに注目した。子葉、葉については3種いずれの岩石を添加した場合にも傾きに大きな違いは見られないが、根については添加する岩石の種類によって直線の傾きに違いが生じた。ここで得られる直線の傾きは重量と垂直方向への伸長のバランスを示す値であり、傾きが小さいほど重量を伴わずに垂直方向へ伸長が大きいことを示している。

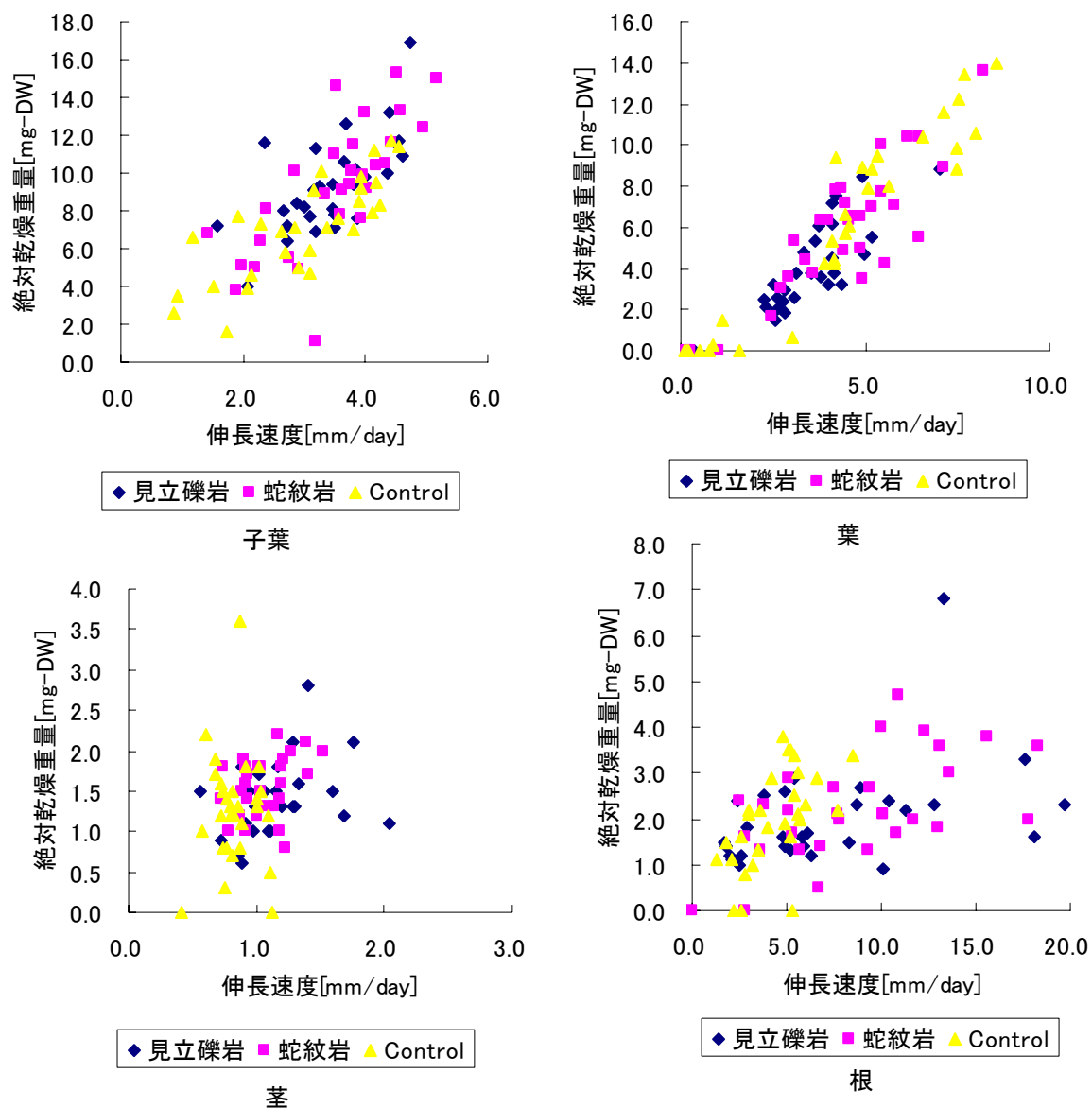


Fig.13. 各器官における伸長速度と絶対乾燥重量の関係

Table 8. 回帰分析結果;回帰式の有意確率 NS (not significant) ; *p <0.05 (significant); **p < 0.01 (highly significant) ; ***p < 0.001(very highly significant).

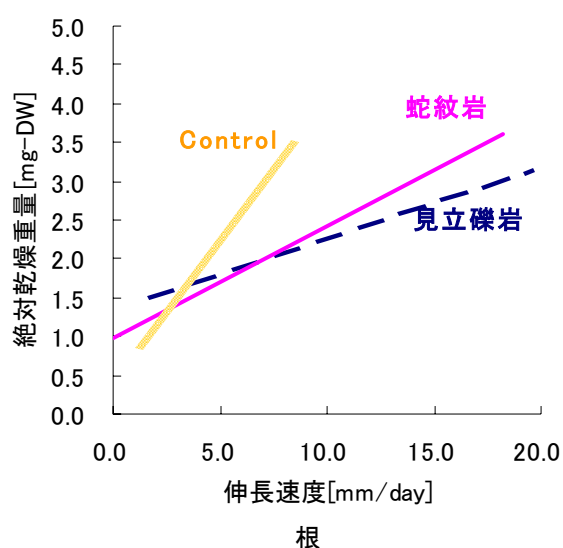
全パラメータ(岩石種による分類無)

器官	回帰式	R ²	有意確率
子葉	$y = 2.38x + 0.713$	0.559	***
葉	$y = 1.61x - 1.21$	0.829	***
茎	$y = 0.441x + 0.958$	0.051	*
根	$y = 0.117x + 1.27$	0.224	***

岩石種別(岩石種による分類)

器官	岩石種	回帰式	R ²	有意確率
子葉	見立礫岩	$y = 2.16x + 1.95$	0.447	***
	蛇紋岩	$y = 2.72x - 0.213$	0.544	***
	Control	$y = 1.94x + 1.30$	0.643	***
葉	見立礫岩	$y = 1.47x - 1.12$	0.677	***
	蛇紋岩	$y = 1.49x - 0.642$	0.747	***
	Control	$y = 1.65x - 1.00$	0.901	***
茎	見立礫岩	$y = 0.426x + 0.905$	0.091	NS
	蛇紋岩	$y = 0.567x + 0.951$	0.104	NS
	Control	$y = 0.0347x + 1.23$	0.000	NS
根	見立礫岩	$y = 0.0922x + 1.33$	0.178	*
	蛇紋岩	$y = 0.144x + 0.983$	0.338	**
	Control	$y = 0.356x + 0.426$	0.346	**

Fig.14 に根の回帰式を示したが、このように傾きが Control >蛇紋岩>見立礫岩となっている。蛇紋岩に関しては報告されていた根の伸長特性を示した結果となった (Kuruckeberg 1984, Brooks 1987)。見立礫岩についても根の伸長が認められたことから、蛇紋岩や見立礫岩を添加した場合には、重量が比較的軽い根が垂直方向に長く伸びることが示された。



(右) Fig.14. 根の岩石種別回帰式

4-2. 葉の乾燥重量と微量元素含有量（Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn）の関係

微量元素の含有量が葉の成長量に寄与しているか評価するために、乾燥重量 15 日間の栽培後の葉の乾燥重量と各多量元素の関係をプロットした (Fig.15)。また分散分析の結果 (Table7) から岩石種の違いによって葉における含有量に有意差が認められた Cr, Ni, Cu について、岩石種別に回帰分析を行った。回帰分析の結果を Table9 に示す。

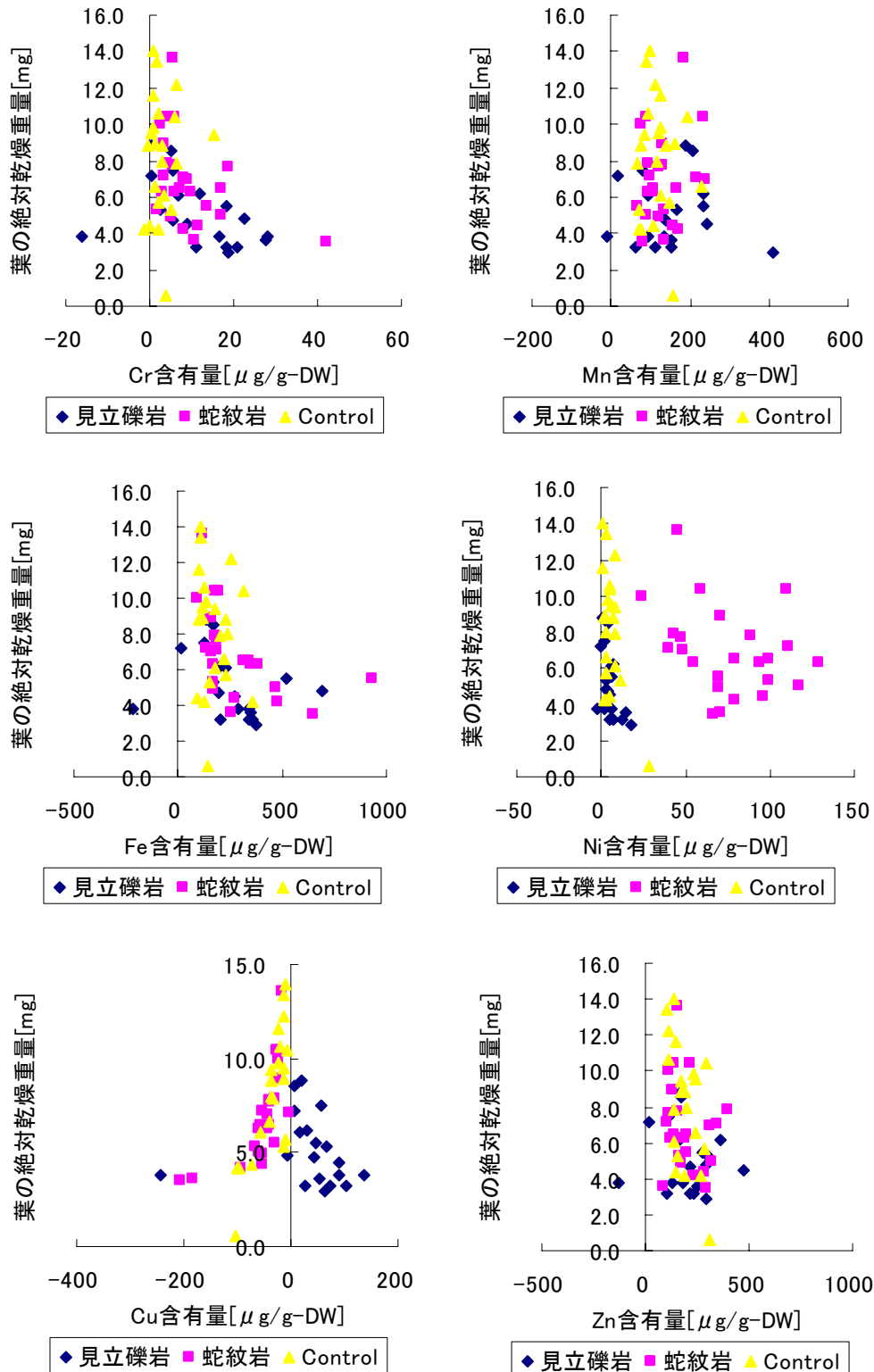


Fig.15. 葉における微量元素含有量と絶対乾燥重量の関係

Table 9. 葉における微量元素含有量に対する絶対乾燥重量の回帰分析結果；回帰式の有意確率 NS (not significant) ; *p <0.05 (significant) ; **p < 0.01 (highly significant) ; ***p < 0.001(very highly significant)

全パラメータ(岩石種による分類無)

元素	回帰式	R ²	有意確率
Cr	$y = -0.125x + 7.78$	0.143	**
Mn	$y = -0.0028x + 7.20$	0.004	NS
Fe	$y = -0.006x + 8.22$	0.119	**
Ni	$y = -0.0064x + 7.02$	0.007	NS
Cu	$y = 0.0021x + 6.87$	0.002	NS
Zn	$y = -0.0075x + 8.29$	0.059	NS

岩石種別(岩石種による分類)

元素	岩石種	回帰式	R ²	有意確率
Cr	見立礫岩	$y = -0.0768x + 5.94$	0.206	***
	蛇紋岩	$y = -0.124x + 8.08$	0.187	***
	Control	$y = 0.083x + 7.96$	0.008	NS
Ni	見立礫岩	$y = -0.186x + 6.10$	0.241	*
	蛇紋岩	$y = -0.0289x + 9.11$	0.108	NS
	Control	$y = -0.311x + 10.0$	0.278	*
Cu	見立礫岩	$y = -0.028x + 6.59$	0.327	*
	蛇紋岩	$y = 0.0332x + 8.77$	0.415	***
	Control	$y = 0.0851x + 11.3$	0.606	***

また多重比較 (Fig.9) により含有量が多いと認められたのは、(1) 蛇紋岩添加時における Ni の含有量、(2) 見立礫岩添加時における Cu の含有量であり、これらのケースについて考察する。

(1) 蛇紋岩添加時における Ni の含有量と葉の乾燥重量

蛇紋岩添加時における Ni 含有量と葉の絶対乾燥重量の関係について Fig.16 (左) に示した。この散布図からは Ni 含有量の増加に従って葉の乾燥重量が減少する傾向があるようにも読み取れるが、回帰式は有意と認められなかった (p>0.05 ; Table9)。Ni は Hoagland 培養液の組成には含まれておらず、蛇紋岩から溶出したものである。以上の結果から蛇紋岩を添加した場合に溶出する Ni は、植物体に九州されて葉にも蓄積されるが、そのことによって葉の重量に有意差をもたらすことは認められない。すなわち蛇紋岩の添加により Ni が葉に蓄積されても、葉の成長への障害には成りえなかったと考えられる。

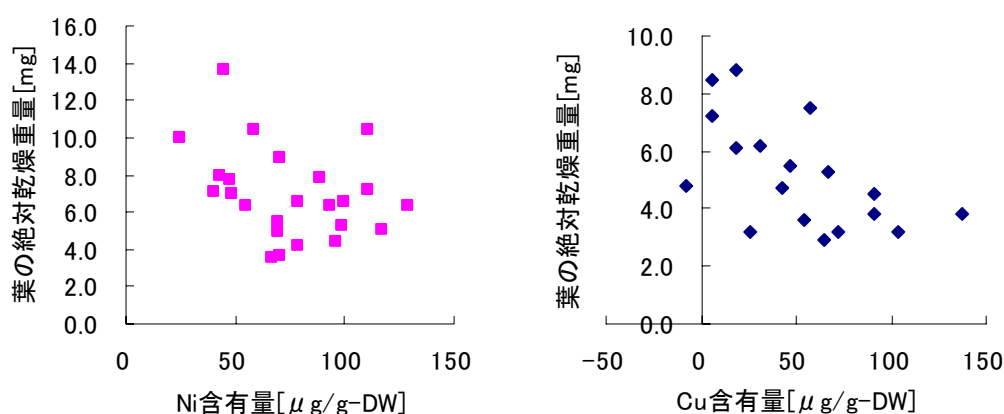


Fig.16. (左) 蛇紋岩添加時における Ni 含有量と葉の絶対乾燥重量 (右) 見立礫岩添加時における Cu 含有量と葉の絶対乾燥重量

(2) 見立礫岩添加時における Cu の含有量と葉の乾燥重量

見立礫岩添加時における Cu の含有量と葉の乾燥重量の関係について Fig.16 (右) に示した。回帰分析の結果、

$$y = -0.028x + 6.59 \quad (R^2 = 0.327)$$

という回帰式が得られ、この回帰は有意と認められた ($p < 0.05$)。回帰式の傾きが負であることから、見立礫岩を添加した場合、Cu の含有量の増加により葉の乾燥重量が減少することが認められた。また見立礫岩を添加した場合に葉の乾燥重量が Control と比較して減少することが多重比較の結果より分かっている (Fig.6)。また Cu は Hoagland 培養液の組成 (Table3) には微量元素として含有している一方で、蛍光 X 線分析の結果 (Table2) より本実験で用いた見立礫岩には構成成分としては含まれていないことから、葉に蓄積された Cu は Hoagland 培養液に由来するものであったといえる。したがって見立礫岩を添加することによって、植物体の Cu の吸収が活性化したかあるいは吸収する成分として Cu への選択性が高まり、培養液中の Cu が植物体内に取り込まれ葉に蓄積したものと考えられる。葉に蓄積された Cu と多量元素 (N, P, K, Ca, Mg, Na) および微量元素 (Cr, Mn, Fe, Ni, Zn) の関係をプロットしたところ、Cu の含有量の増加に伴って乾燥量当りの葉に含有量が有意に減少する元素は存在しなかった。したがって前者の見立礫岩の添加により Cu の吸収が活性化されたものと考えられる。以上の結果より、見立礫岩の添加によって葉における Cu の蓄積量が増加し、葉の生育速度が抑制されたために、15 日間の栽培後における葉の乾燥重量が Control と比較して減少したと考察できる。

植物にとって Cu はクロロフィル合成を担う微量栄養素として重要な役割を果たすが、過剰に摂取されると形成以上や枯死を引き起こす。したがって植物にとっては適量の Cu が必要であり、過剰量の Cu を除去することは重要である。重金属の除去に工業的な技術を用いると多大な費用がかかる。そこで近年注目され研究が進められている浄化技術が、低コストな植物

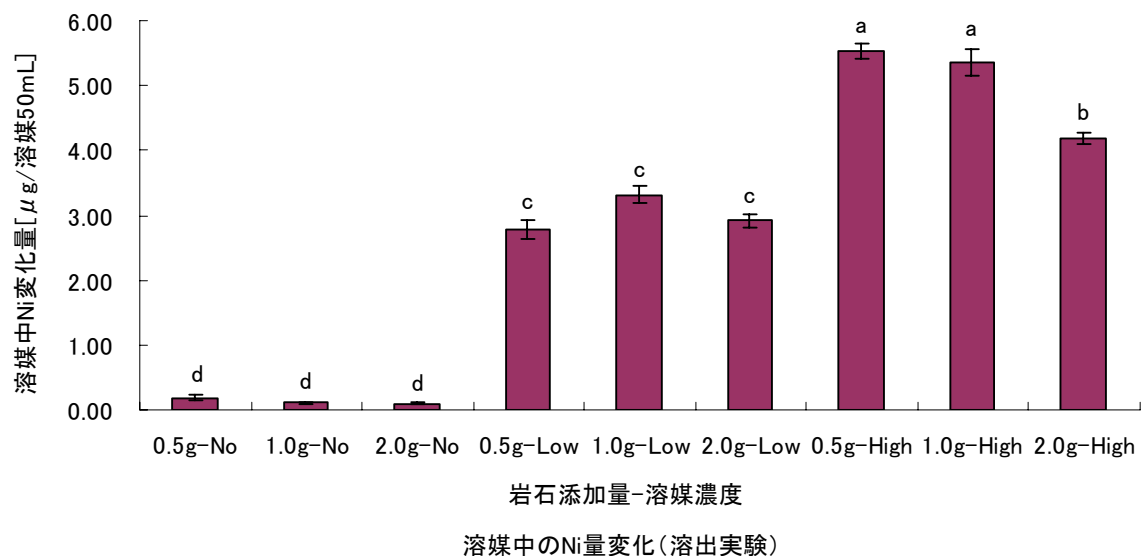
を用いた生物的浄化（バイオレメディエーション）やファイトレメディエーションである。本研究では見立礫岩を添加した培養液において植物の栽培を行った結果、植物体であるハツカダイコンの葉に Cu が蓄積されるという結果が得られた。Cu を蓄積する植物としては、本研究で利用したハツカダイコンと同じアブラナ科の *Thlaspi caerulescens* が報告されている（植物の生化学・分子生物学 2005）。本研究で用いたアブラナ科のハツカダイコンは安価であり、見立礫岩の添加により Cu の集積が可能であればコスト面において大きな成果になると考えられる。

見立礫岩の添加により葉の成長が抑制されるという結果が得られ、見立礫岩の新規用途として土壌改良剤に利用することは本研究結果からは困難であると考えられる。しかし、新規用途の可能性として Cu のファイトレメディエーションを促進させる効果が期待できる。

4.2. 溶媒中の Ni 含有量の変化と葉における含有量

本研究の結果からも蛇紋岩より Ni が溶出されることが認められ、溶出した Ni は植物体の葉にも蓄積された。蛇紋岩から溶出した Ni 量（Fig.17 上）および葉に蓄積された Ni 量（Fig.17 下）を、岩石添加量、培養液濃度別にそれぞれ示した。

蛇紋岩より溶出する Ni 量は岩石の添加量への依存性は低い一方で、溶媒の濃度への依存性は高く、培養液の濃度が大きいほど、溶出する Ni 量が多いことが結果より得られた。一方で植物の葉に蓄積された Ni 量は、岩石の添加量が多く、かつ低濃度の培養液であるほど多量であった。すなわち低濃度の培養液では植物中に Ni が多量に蓄積し、高濃度の培養液になるほど溶媒中に Ni が蓄積される。



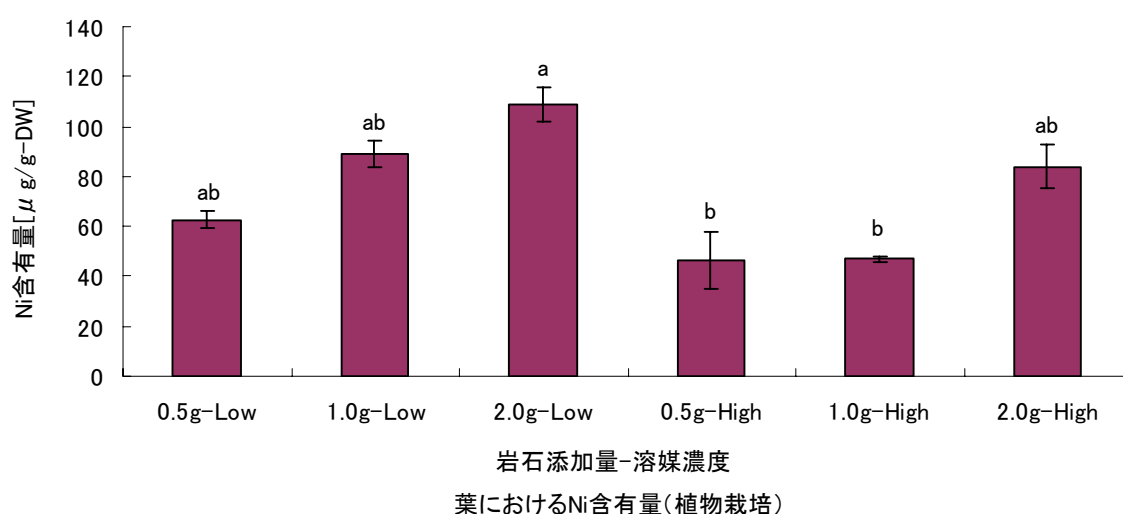


Fig.17. (上) 蛇紋岩添加時における溶媒中の Ni 量変化 (溶出実験)、(下) 蛇紋岩を添加して 15 日間栽培後の植物体の葉における Ni 含有量 (植物栽培) ; Tukey により多重比較検定を行った結果を示す。P<0.05 で有意とし、有意差が認められたグループ毎に分類した (a~d)。

高濃度の培養液において多量の Ni が植物の葉に含有したのは、高濃度の培養液では植物に吸収される成分が多種多数存在することで Ni を取り入れる量が減少したためと考えられる。そして培養液が低濃度になると、元来培養液に存在し植物に吸収される成分量が減少するために Ni が比較的容易に植物中に取り込まれたと考えられる。

また高濃度の培養液において Ni の溶媒中含量が増加したのは、岩石表面に析出した Ni が他の微量成分との間で交換反応を起こすようにして溶出し、他の微量成分が岩石に吸着したためではないかと推測する。その他の微量成分として考えられるは、Hoagland 培養液の組成成分として含まれる Mn, Fe, Zn である。岩石-溶媒系 (溶出実験) において、蛇紋岩を添加した場合の Mn, Fe, Zn の溶媒中含量の変化を見ると、溶媒が高濃度になるほど減少しているのが分かる (Fig.10)。さらに Ni の溶出量に対して、溶媒中の Mn, Fe, Zn の変化量をプロットし回帰分析を行ったところ、いずれも有意な回帰が得られ、Ni の溶出量の増加に伴う溶媒中の Mn, Fe, Zn の減少が認められた (Fig.18, Table10)。

本研究結果より、Ni の溶出に伴って連動する微量元素の存在が明らかとなった。また岩石-溶媒系と溶媒-植物系においては、その溶媒の濃度によって Ni の蓄積される場所 (溶媒または植物) が大きく異なることが分かった。これらは課題とされている蛇紋岩地の緑化を進める上で、化学肥料の施肥方法を検討する際に重要な意味を持つと考えられる。

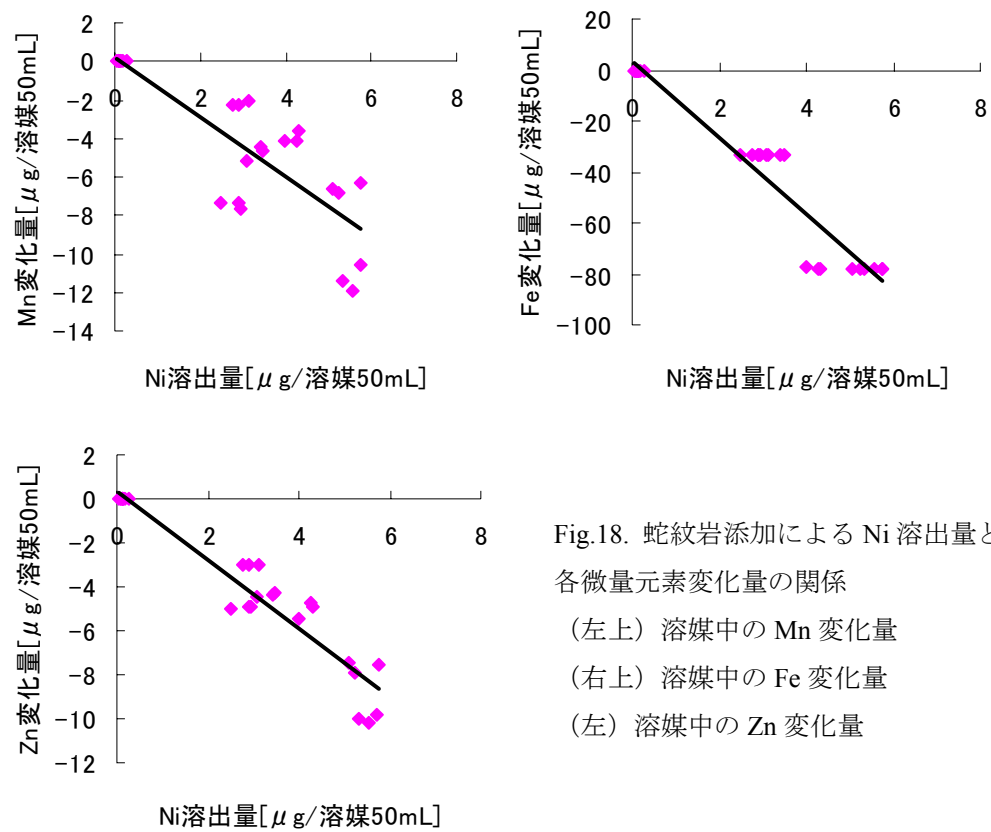


Fig.18. 蛇紋岩添加による Ni 溶出量と溶媒中の
各微量元素変化量の関係
(左上) 溶媒中の Mn 変化量
(右上) 溶媒中の Fe 変化量
(左) 溶媒中の Zn 変化量

Table 10. 回帰分析結果；蛇紋岩添加時における Ni 溶出量に対する溶媒中 Mn, Fe, Zn 変化量
；回帰式の有意確率 *** $p < 0.001$ (very highly significant)

元素	回帰式	R ²	有意確率
Mn	$y = -1.55x + 0.173$	0.729	***
Fe	$y = -15.0x + 3.71$	0.931	***
Zn	$y = -1.56x + 0.362$	0.921	***

5. 結言 (Conclusion)

5-1. 結果のまとめ

- (1) 見立礫岩あるいは蛇紋岩をいかなる条件で添加した場合にも葉 1g-DW に蓄積される多量栄養素の量に有意差は認められなかった ($p>0.05$)。
- (2) 本研究からは見立礫岩を添加することによる植物個体重量の増加効果は見られず、また葉に含有される多量栄養素の量にも有意差は認められなかった。本研究の結果からは、見立礫岩の新規用途として土壌改良剤へ応用することは困難であると考ええる。
- (3) 見立礫岩を添加することにより葉における Cu の含有量が増加した。見立礫岩の添加により溶媒中の Cu が選択的に植物体の葉に取り込まれたことが推測され、この結果から Cu のファイトレメディエーションへの応用という新規用途への可能性が見出された。
- (4) 蛇紋岩に含有する Ni は培養液の濃度が大きいほど溶出しやすい一方で、植物体の葉に取り込まれる Ni 量は培養液の濃度が小さいほど多い。また Ni の溶出に伴って溶出溶媒中の Mn, Fe, Zn が連動して減少した。蛇紋岩を添加した場合には葉の重量に有意差が認められなかったことから、ハツカダイコンの初期成長においては Ni による葉の成長抑制は認められなかった。

5-2. 今後の課題

本研究では見立礫岩の添加により、ハツカダイコンへの Cu 集積効果が得られ、植物体による過剰な Cu 抽出（ファイトレメディエーション）効果として、見立礫岩の新規用途が見出された。しかし本研究では未だ再現性が確認されておらず、早急な課題であるといえる。また本研究はハツカダイコンの初期成育に対する影響評価を目的に行ったため、15 日間という短期間での栽培に限られ、Cu の含有量も極めて微量であった。したがって今後の課題としては、岩石を添加した場合における全生育期間にわたる植物体への影響、特に見立礫岩を添加した場合には Cu 含有量の変化に着目して評価する必要がある。その上でファイトレメディエーションへの応用を視野におき、Cu の抽出限界の評価、見立礫岩による他の毒性物質の溶出の有無などを確認し、有効性を検討していきたい。

6. 謝辞 (Acknowledgements)

原口昭教授を始めとし、本研究にご支援・ご協力頂いた皆様に深く感謝申し上げます。

Thanks to...研究員 伊予部勉様、分析センター職員 原田様、道木様、森様、佐竹豊彦様、
EA の方々、諸先輩方、原口研究室の皆様

7. 引用および参考文献 (References)

7-1. 引用文献

- 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
- 麦飯石利用農法 (2004) ; 石川勝美 著、特定非営利活動法人岩石活用研究所
- 加納博、吉田秀俊、蛭子貞二 (1961) 薄衣式 (古生代) 礫岩としてのいわゆる見立礫岩について—含花崗質岩礫岩の研究 (その 12) ; *The Geological Society of Japan* 209-218
- 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

7-2. 参考文献

- 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
- 高橋淳根、高橋清 (1990) 乳牛に対する麦飯石粉末の試料添加効果 ; 畜産の研究
- 大野武男 (1985) 石薬「麦飯石」に関する実験と考察 ; 稲沢女子短期大学研究紀要
- 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