

アルカリ土類金属のコマツナの発芽と生長へ及ぼす影響

辻 久巳* 中山 享**

Effect of alkaline earth metal on germination and growth of komatsuna

Hisami TSUJI* Susumu NAKAYAMA**

Eleven kinds of test water of different concentrations containing each alkaline earth metal (Mg, Ca, Sr, and Ba) were prepared in the concentration range of 2.0×10^{-5} to 1.0×10^{-1} mol L⁻¹. Then, the germination rate and the growth degree of Komatsuna were compared with those of the control group (ion-exchanged water). No significant difference was observed in the germination rate due to the difference in the elements. On the other hand, a maximum Sr growth rate of about 10% was observed compared to the control group at a concentration of 8.0×10^{-4} to 3.2×10^{-3} mol L⁻¹.

1. 緒 言

植物の種子の発芽および／または初期の生長には、適当な温度、雰囲気、水、また肥料養分が必要であり、肥料養分の中の無機イオンも必要不可欠であると考えられる。最近、ランタン (La, La(NO₃)₃・6H₂O を使用) がイネの根の生長を促進するとの報告^[1]や硫酸スカンジウム (Sc₂(SO₄)₃) が種子発芽剤として使える可能性があるとの解説^[2]が発表されている。筆者らは、それらの報告および解説に注目して、発芽および初期の生長を短期間で評価できるコマツナを用いて希土類元素がコマツナの種子の発芽と初期の生長へ及ぼす影響を調べた^[3]。例えば、希土類元素の中からイオン半径の最も小さい Sc、イオン半径の最も大きい La、中間付近のイオン半径のガドリウム (Gd) を選び、各塩化物の異なる濃度の試験用水と対照区 (イオン交換水) でのコマツナの発芽度合と播種後 3 日間の生長度合を比較した結果、希土類元素の添加による発芽への明らかな有意性は観察されず、希土類元素の種類および試験用水の濃度による発芽度合の違いも認められなかったが、希土類元素の添加による生長への 15% 程度の促進効果は Sc で認められた。さらに、希土類元素と似た性質を有する同じ 4 族の遷移金属元素であるジルコニウム (Zr) とハフニ

ウム (Hf) でも、各塩化物を用いて同様な調査を行った^[4]。その結果、Zr および Hf の添加による発芽への明らかな有意性は観察されなかったが、対照区に対して生長度合はそれぞれ 10% 程度の有意性が認められた。

Sc を始めとする希土類元素および Zr と Hf は、植物必須元素に含まれていないにもかかわらず、植物の種子の発芽および初期の生長に関する段階ではあるものの、植物の生育促進でも有用な作用を示すことは非常に興味深い。そこで、3 価の希土類元素および 4 価の Zr や Hf 以外の元素を対象を拡げて、これまでと同様に各塩化物を用いて調製した試験用水により、元素の種類と植物の生育促進との関係について調査研究を進めることとした。調査研究を始めるにあたり、塩化物を用いて各元素の試験用水の調製が可能かを調べてみたところ、5 価以上の元素 (5 価ではニオブ (Nb) やタンタル (Ta))、6 価ではタングステン (W) やモリブデン (Mo)) では加水分解による水酸化物の生成などより各元素を含有した水溶液を得ることができないことを確認された。したがって、4 価以下の元素を調査研究対象とし、まずアルカリ土類金属 (マグネシウム (Mg)、カルシウム (Ca)、ストロンチウム (Sr)、バリウム (Ba)) について、コマツナの種子の発芽と初期の生長へ及ぼす影響を調べた。

令和 2 年 12 月 23 日受付 (Received Dec. 23, 2020)

*新居浜工業高等専門学校エンジニアリングデザイン教育センター (Center for Engineering Design Education, National Institute of Technology (KOSEN), Niihama College, Niihama, 792-8580, Japan)

**新居浜工業高等専門学校生物応用化学科 (Department of Applied Chemistry and Biotechnology, National Institute of Technology (KOSEN), Niihama College, Niihama, 792-8580, Japan)

2. 実験

2-1 種子、試薬および器具

コマツナの種子は(株)アタリヤ農園(生産地:イタリア、発芽率85%以上)のものを用いた。試験用水の調製に使う塩化マグネシウム(II)六水和物($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、特級)、塩化カルシウム(II)(CaCl_2 、特級)、塩化ストロンチウム(II)六水和物($\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、特級)および塩化バリウム(II)二水和物($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、特級)は、すべて富士フィルム和光純薬工業(株)のものを用いた。また、発芽試験シートは富士平工業(株)の商品名「たねピタ」(基材:厚さ0.26mm—直径84mmのろ紙、ドット:50個/シート<間隔9mm、径1mm>、粘着剤:アクリル系粘着剤)を、シャーレはアズワン(株)のポリスチレン滅菌シャーレ(径90mm、高さ15mm)を用いた。イオン交換水および各試験用水のpH測定には(株)堀場製作所のpHメーター/D-71を、発芽生長試験で使用する恒温槽には(株)日立製作所の恒温培養器/CR-32を用いた。

2-2 希土類元素塩化物水溶液の調製

イオン交換水を用いてMg、Ca、Sr、Baの塩化物濃度 2.0×10^{-5} 、 4.0×10^{-5} 、 2.0×10^{-4} 、 4.0×10^{-4} 、 8.0×10^{-4} 、 1.6×10^{-3} 、 3.2×10^{-3} 、 6.4×10^{-3} 、 9.6×10^{-3} 、 1.28×10^{-2} 、 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の各試験用水を作製した。各試験用水は、pHメーターによって、pH値を測定した。ここで、緩衝液を用いたpH調整は、Mg、Ca、Sr、Ba以外のNやPなど他の元素がコマツナの発芽と生長に及ぼす影響を避けるために行わなかった。

2-3 発芽生長試験

シャーレ中に発芽試験シートを敷き、コマツナの種子50個を播種した後、各試験用水10mLを添加した。対照区のイオン交換水のみを10mL添加したものも準備した。各シャーレを30℃暗所条件下に置き、3日間(72時間)発芽生長試験を行った。なお、乾燥を避けるためシャーレをナイロン袋で包んだ。発芽生長試験は、イオン交換水のみ、 2.0×10^{-5} 、 4.0×10^{-5} 、 2.0×10^{-4} 、 $4.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ、 8.0×10^{-4} 、 1.6×10^{-3} 、 $3.2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ、 6.4×10^{-3} 、 9.6×10^{-3} 、 $1.28 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ、 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループと4つのグループに分けて行った。3日後に恒温培養器からシャーレを取り出し、外観評価によって発芽率および生長度合を調べた。発芽生長試験3日後の状況は、前報^[3,4]に掲載した写真とほぼ同じであった。

2-4 評価方法

発芽の評価(発芽度合)は、対照区のイオン交換水のみでの発芽数で各試験用水での発芽数を割り100を掛けた値とした。一方、生長の評価(生長度合)は、前報^[3,4]と同様に発芽生長試験3日後の外観から、播種した50個のすべて種子を

それぞれTable 1のように未発芽の0点から生長5cm以上の5点までの6段階で点数化して行った。また、発芽生長試験後の発芽試験シートを絞り取り出した各試験用水のpH値をpHメーターによって測定した。

Table 1 生長の評価

生長度合	点数
生長5cm以上	5
生長2cm以上5cm未満	4
生長2cm未満	3
葉あるいは根どちらか一方確認	2
芽を切る	1
未発芽	0

3. 結果及び考察

3-1 発芽への影響

アルカリ土類金属のグループに入れられることもあるベリリウム(Be)とラジウム(Ra)については、Beの化合物は猛毒であること、Raは放射性元素であることから、調査研究から外した。

発芽度合は、イオン交換水のみ、 2.0×10^{-5} 、 4.0×10^{-5} 、 2.0×10^{-4} 、 $4.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ 8.0×10^{-4} 、 1.6×10^{-3} 、 $3.2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ、 6.4×10^{-3} 、 9.6×10^{-3} 、 $1.28 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ、 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループごとに、対照区のイオン交換水のみでの発芽率を100として比較した値である。Fig.1、2、3、4に、Mg、Ca、Sr、Baそれぞれの発芽度合への影響をまとめた。各元素での発芽度合の最高値は、Mgでは104、Caでは102、Srでは106、Baでは106であることから、Mg、Ca、Sr、Baの各元素の添加による発芽への有意性はないと考えられる。一方、ZrやHfでは $1 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上の濃度で発芽度合が80を下回るが、Mg、Ca、Sr、Baでは $1.28 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ まで100辺りを維持している。 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ では発芽度合が80以下とかなり低くなる。

発芽生長試験前後のpH値変化は、イオン交換水のみでは試験前のpH値6.3から試験後のpH値5.9～0.4のpH値低下が認められた。また、Mg、Ca、Sr、Baの各試験用水については、発芽生長試験前のpH値が3.8～5.9であり、濃度が高くなるに従い、またMg、Ca、Sr、Baの順にpH値が低下する傾向がみられた。発芽生長試験後のpH値は0.4～1.4程度の上昇がみられた。この傾向は、前報の希土類元素(Sc、Gd、La)およびZrとHfの場合と同じであった。

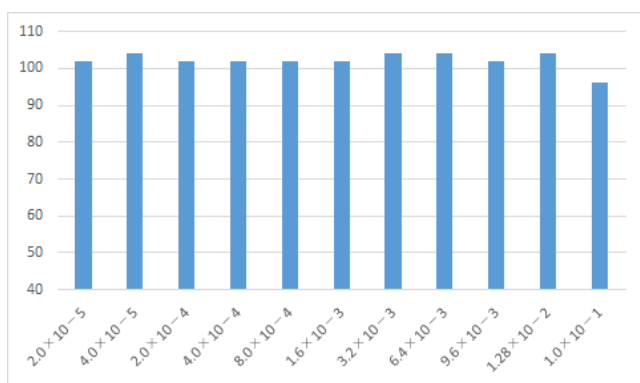


Fig.1 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の濃度と発芽度合の関係。

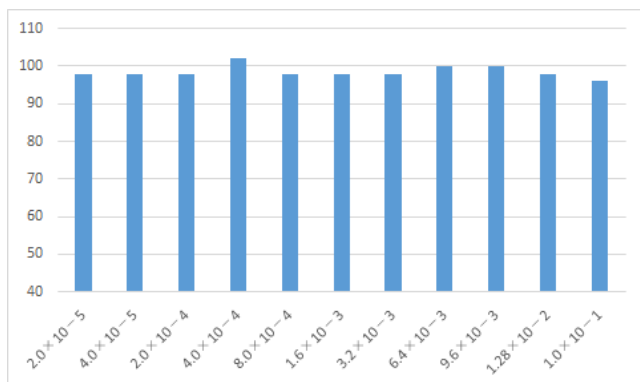


Fig.2 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — CaCl_2 の濃度と発芽度合の関係。

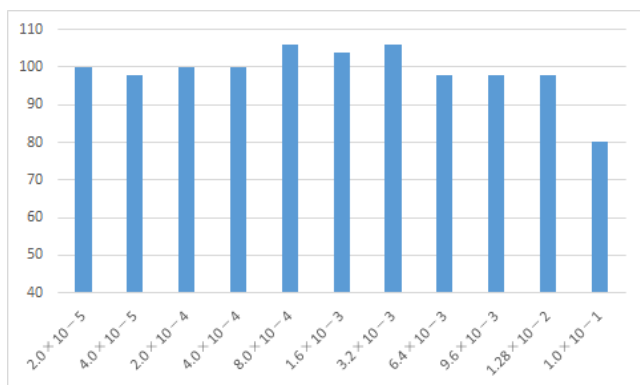


Fig.3 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の濃度と発芽度合の関係。

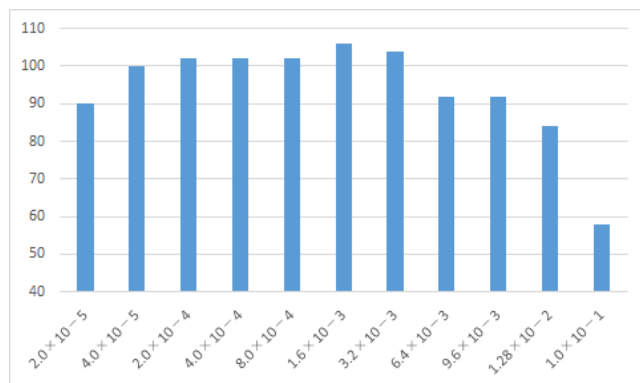


Fig.4 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の濃度と発芽度合の関係。

3-2 生長への影響

生長度合は、イオン交換水のみ、 2.0×10^{-5} 、 4.0×10^{-5} 、 2.0×10^{-4} 、 $4.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ 8.0×10^{-4} 、 1.6×10^{-3} 、 $3.2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ、 6.4×10^{-3} 、 9.6×10^{-3} 、 $1.28 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループ、イオン交換水のみ、 $1.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ のグループごとに、播種した 50 個のすべて種子それぞれの生長度合を Table 1 のように 5 段階で点数化した合計点にて、対照区のイオン交換水のみ合計点を 100 として比較した。

Mg、Ca、Sr、Ba の生長度合への影響を、それぞれ Fig.5、6、7、8 にまとめた。Mg の生長度合は $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 104、 $4.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 102 であったが、それ以外の濃度では 100 以下であり、Mg の添加による顕著な生長の促進が認められなかった。Ca の生長度合は $4.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 102 であったものの、それ以外の濃度では 100 以下であり、Mg と同じく Ca の添加による顕著な生長の促進が認められなかった。一方、Sr の生長度合は $8.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 112、 $1.6 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 110、 $3.2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 108、 $6.4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 108 であった。それ以外の濃度では 100 以下であったが、Mg および Ca とは違い Sr の添加により最大 12% の生長の促進が認められた。Ba の生長度合は $4.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 102、 $8.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ で 104 であったが、それ以外の濃度では 100 以下であり、Mg および Ca と同じく Ba の添加による顕著な生長の促進が認められなかった。また、 6.4×10^{-3} や $9.6 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上の高濃度では Mg、Ca、Sr、Ba の添加による生長の阻害が認められた。このような高濃度の Mg、Ca、Sr、Ba の添加により生長が阻害される現象は前報の希土類元素 (Sc、Gd、La) および Zr と Hf の場合においても認められたが、1 桁低い濃度 ($10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 台) からであった。

アルカリ土類金属 (Mg、Ca、Sr、Ba) の「 M^{2+} のイオン半径 (6 配位)」、「標準電極電位 (M^{2+}/M)」、「第 2 イオン化エネルギー」を調べてみた。「 M^{2+} のイオン半径」は、Mg が 0.0720 nm 、Ca が 0.100 nm 、Sr が 0.116 nm 、Ba が 0.136 nm であった^[5]。「標準電極電位」は、Mg が -2.356 V 、Ca が -2.84 V 、Sr が -2.86 V 、Ba が -2.92 であった^[6]。「第 2 イオン化エネルギー」は、Mg が 15.035 eV 、Ca が 11.871 eV 、Sr が 11.030 eV 、Ba が 10.004 eV であった^[7]。「 M^{2+} のイオン半径」の小さい元素ほど、すなわち $\text{Ba} < \text{Sr} < \text{Ca} < \text{Mg}$ の順にコマツナへの取り込みやすいと考えられる。「標準電極電位」は還元電位とも言われ、その値が小さいほど還元性が高い環境 (すなわち嫌気性) になり易く、すなわち $\text{Mg} < \text{Ca} < \text{Sr} < \text{Ba}$ の順にコマツナの生長に悪影響を与えると考えられる。「第 2 イオン化エネルギー」は小さいほど、すなわち $\text{Mg} < \text{Ca} < \text{Sr} < \text{Ba}$ の順にイオン化し易く実際の M^{2+} イオン数が多くなるなどが考えられる。「 M^{2+} のイオン半径」と「標準電極電位」から考えると、Mg の添加によって生長の促進を最も期待できることになるが、本報告で最大の生長の促進効果がみられた Sr の

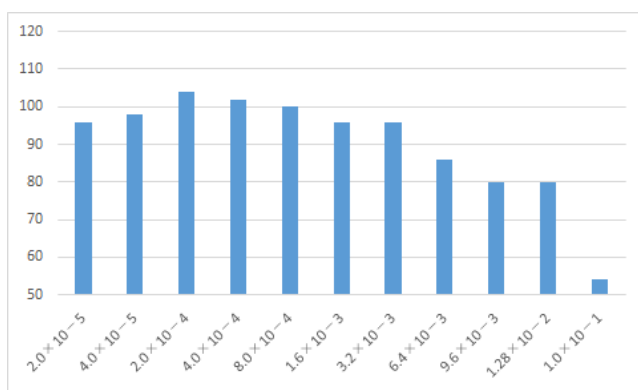


Fig.5 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の濃度と生長度合の関係.

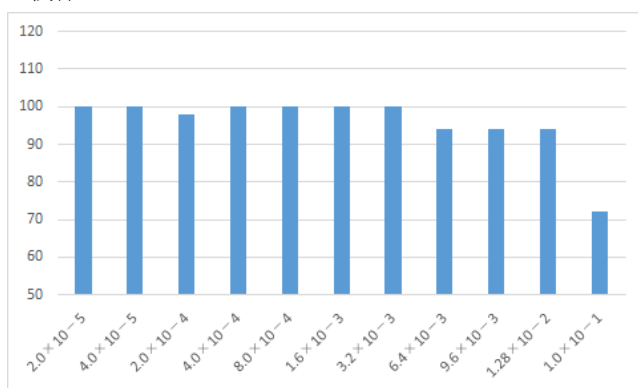


Fig.6 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — CaCl_2 の濃度と生長度合の関係.

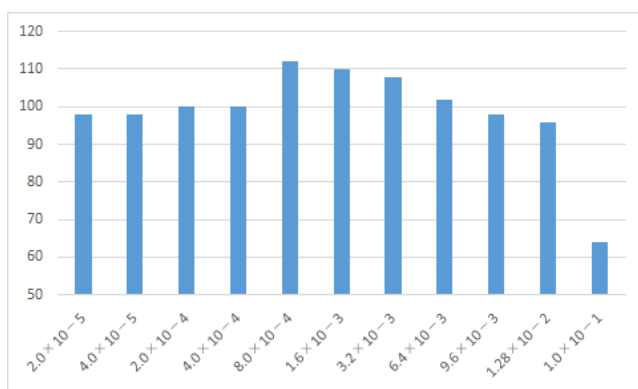


Fig.7 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の濃度と生長度合の関係.

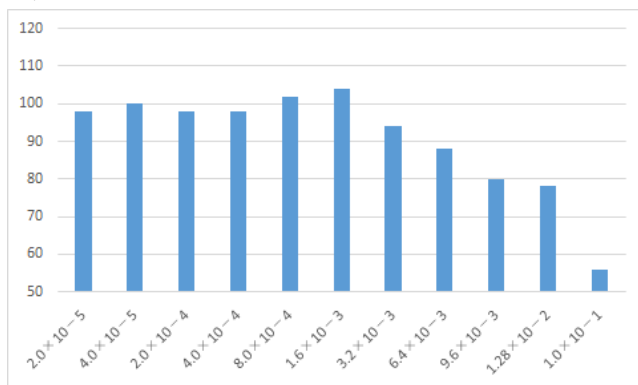


Fig.8 試験用水 $x \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ — $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の濃度と生長度合の関係.

添加であった。このような結果は、前報の希土類元素 (Sc、Gd、La) および Zr と Hf の場合においても認められている。

植物の生育に必要な不可欠の元素は、窒素 (N)、りん (P)、カリウム (K)、カルシウム (Ca)、酸素 (O)、水素 (H)、炭素 (C)、マグネシウム (Mg)、硫黄 (S)、鉄 (Fe)、マンガン (Mn)、ホウ素 (B)、亜鉛 (Zn)、モリブデン (Mo)、銅 (Cu)、塩素 (Cl) の 16 種類である。これらの元素は必須元素と呼ばれ、そのうち 1 つでも欠けると植物体の生長が完結しない。さらに、必須元素ではないが植物体に与えると、その生長を助ける元素としてナトリウム (Na)、けい素 (Si) があり、これらは有用元素と呼ばれる。前報で最大 10%以上の生長の促進効果がみられた Sc、Zr、Hf および本報告で最大 10%以上の生長の促進効果がみられた Sr は、上記の必須元素と有用元素には含まれていない。

4. 結 言

$2.0 \times 10^{-5} \sim 1.0 \times 10^{-1} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の濃度範囲において 11 種類の異なる濃度の各アルカリ土類金属 (Mg、Ca、Sr、Ba) を含有した試験用水を準備し、コマツナの発芽率と生長度合いを対照区 (イオン交換水) と比較した。元素の違いによる発芽率の大きな差はみられなかったが、生長度合いについては $8.0 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ の濃度で Sr にて対照区に対して最大 10%程度の有意性がみられた。

謝辞

本研究は、第一稀元素化学工業株式会社の支援を受けて実施したものであり、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] D. Liu, X. Wang, X. Zhang, Z. Gao, "Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings", *Plant, Soil and Environment*, **59**, 196–200 (2013).
- [2] I. Emsley, "Unsporting scandium", *Nature Chemistry*, **6**, 1025 (2014).
- [3] 辻久巳, 中山享, "スカンジウムのコマツナの発芽と生長へ及ぼす影響", *科学・技術研究*, **8**, 123–128 (2019).
- [4] 辻久巳, 中山享, "コマツナの発芽と生長へ及ぼすジルコニウムとハフニウムの影響", *新居浜工業高等専門学校紀要*, **56**, 31–34 (2020).
- [5] R. D. Shannon, C. T. Prewitt, "Effective ionic radii in oxides and fluorides", *Acta Crystallographica B*, **25**, 925–946 (1969).
- [6] 日本化学会編, 化学便覧—基礎編 II— (改訂 4 版), 465–468 (1993).
- [7] 日本化学会編, 化学便覧—基礎編 II— (改訂 4 版), 617–619 (1993).