

スカンジウムのコマツナの発芽と生長へ及ぼす影響

辻 久巳 (新居浜工業高等専門学校 エンジニアデザイン教育センター, tsuji@off.niihama-nct.ac.jp)

中山 享 (新居浜工業高等専門学校 生物応用化学科, nakayama@chem.niihama-nct.ac.jp)

Effect of scandium on germination and growth of komatsuna

Hisami Tsuji (Engineering Design Education Center, National Institute of Technology (KOSEN), Niihama College, Japan)

Susumu Nakayama (Department of Applied Chemistry and Biotechnology, National Institute of Technology (KOSEN), Niihama College, Japan)

要約

希土類元素の中からイオン半径の最も小さいスカンジウム (Sc)、イオン半径の最も大きいランタン (La)、中間付近のイオン半径のガドリニウム (Gd) を選び、それら希土類元素がコマツナの種子の発芽と播種後3日間の生長へ及ぼす影響を調べた。Sc、Gd、La源として、それぞれ $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ を用い、異なる濃度のSc、Gd、Laを含有した試験用水と対照区 (イオン交換水) でのコマツナの発芽度合および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。一方、希土類元素の添加による生長への促進効果は、Scで認められた。

キーワード

外観評価, 発芽度合, 生長度合, pH, 濃度

1. はじめに

希土類元素 (レアアース) とは、原子番号57のLaから原子番号71のLuまでのランタノイドに、原子番号21のScと原子番号39のYを加えた計17種の元素を指す。希土類元素は環境中に広く存在していて、地殻中の存在量を見ると希土類元素の中ではCe (クラーク数0.0045)、Y (クラーク数0.003)、Nd (クラーク数0.0022)、La (クラーク数0.0018) が数十ppmと比較的多く、Cu (クラーク数0.01)、Co (クラーク数0.004)、Zn (クラーク数0.004) といった元素と同程度である。この希土類元素は、永久磁石、蓄電池、蛍光体、超伝導体などといったさまざまなエレクトロニクス製品素材の性能向上に必要不可欠なものであることはよく知られている。最近、培地に非致死濃度のSc ($\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を使用) を添加することで枯草菌によるアミラーゼやプロテアーゼの生産が向上するとの報告 (Inaoka and Ochi, 2011) およびLa ($\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を使用) がイネの根の生長を促進するとの報告 (Liu et al., 2013) などがある。また、土耕栽培によるポット試験の土への $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の直接散布による作物生長促進効果も示されている (越智, 2017)。さらに、 $\text{Sc}_2(\text{SO}_4)_3$ が種子発芽剤として使える可能性があるとの解説 (Emsley, 2014) および植物共生細菌の中には希土類元素を添加すると良好なメタノール生育を示す解説 (中川他, 2015) もある。一方、希土類元素の生体への影響としては、希土類酸化物を粉じんとして暴露した場合、じん肺症を引き起こす可能性はあるものの、希土類元素が致死的な急性毒性や環境中で強い生体影響を及ぼすような報告はなされていない (鷹屋他, 2005)、また希土類元素は発がん性および催奇形性は見出されておらず、Caイオンの関与する生体反応への影響が起こる可能性は否定できないが致死的な毒性を示す可能性は考えにくい (篠原, 2005) との報告などがあり、現時点では希土類元素は自然環境レベルでは生体に対して毒性を示すことは少ないと考えられる。

このように工業的に重要であるScを始めとする希土類元素が、植物必須元素に含まれていないにもかかわらず、微生物の物質生産向上および植物の生育促進でも有用な作用を示す報告は非常に興味深い。そこで、希土類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。本報告では、まず希土類元素のイオンサイズに注目して、希土類元素の中からイオン半径の最も小さいSc (8配位の Sc^{3+} : 0.087 nm)、イオン半径の最も大きいLa (8配位の La^{3+} : 0.118 nm)、中間付近のイオン半径のGd (8配位の Gd^{3+} : 0.106 nm) を選んだ (Shannon and Prewitt, 1969)。また、僅かな差ではあるが酸性溶液での酸化還元電位はScが希土類元素の中で最も小さい負の値(-2.03)、Laが最も大きい負の値(-2.37)、Gdが中間付近の値(-2.29)であり (足立, 1999)、酸化還元電位と植物の生育にも注目した検討も可能と考えた。対象植物には種子の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、希土類元素の発芽と生長へ及ぼす影響を調べた。

2. 実験

2.1 種子、試薬および器具

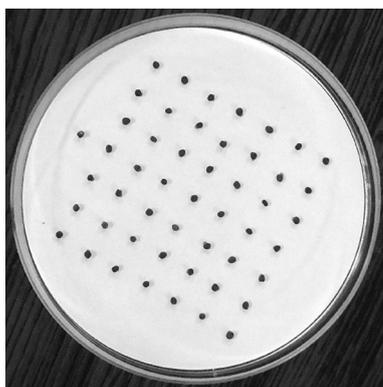
コマツナの種子は、株式会社アタリヤ農園 (生産地: イタリア、発芽率85%以上) のものを用いた。三塩化スカンジウム(III)六水和物 ($\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、純度: 3N)、三塩化ガドリニウム(III)六水和物 ($\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、純度: 3N)、三塩化ランタン(III)七水和物 ($\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、純度: 2N) は、三津和化学薬品株式会社のものを用いた。また、発芽試験シートは富士平工業株式会社の商品名「たねピタ」(基材: 厚さ0.26 mm - 直径84 mm) のろ紙、ドット: 50個/シート < 間隔9 mm、径1 mm >、粘着剤: アクリル系粘着剤)、シャーレはアズワン株式会社のポリスチレン滅菌シャーレ (径90 mm、高さ15 mm)、pH計は株式会社堀場製作所のpHメーター D-71、恒温槽は株式会社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 Sc、Gd、La の塩化物濃度 10,000 ppm ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 水溶液を調製した後、5、10、50、100、200、400、800 ppm の各試験用水を作製した。緩衝液を用いた pH 調整は、Sc、Gd、La 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 10 mL を添加した。対照区のイオン交換水のみを 10 mL 添加したものも準備した。各シャーレを 30 °C 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、5、10、50、100 ppm のグループ、イオン交換水のみ、200、400、800 ppm のグループに分けて、各 3 回行った。3 日後にシャーレを取り出し、各条件 50 個 \times 3 回 = 150 個を対象にして、外観評価によって発芽度合および生長度合を調べた。コマツナの発芽生長試験状況は、図 1 のようであった。



(a) 播種時



(b) 3 日後

図 1：試験用水 10 ppm - $\text{ScCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ での発芽生長試験 3 日後の状況

2.4 発芽生長の評価方法

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の発芽数を割り、さらに 100 を掛けた値とした。一方、生長の評価 (生長度合) は、図 2 に示す発芽生長

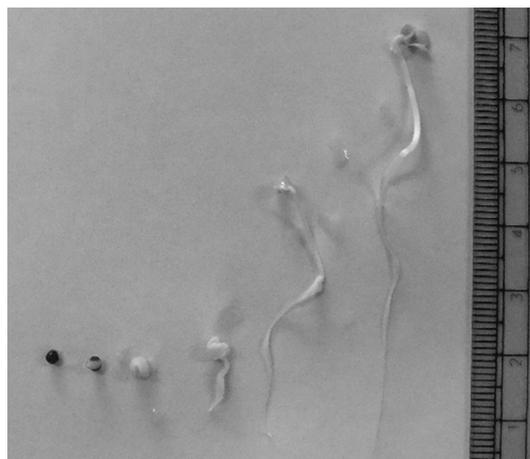


図 2：生長度合と点数 (左から 0、1、2、3、4、5 点)

表 1：生長の評価

生長度合	点数
生長 5 cm 以上	5
生長 2 cm 以上 5 cm 未満	4
生長 2 cm 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

試験 3 日後の外観から、播種したすべて種子をそれぞれ表 1 のように未発芽の 0 点から生長 5 cm 以上の 5 点までの 6 段階で点数化して行った。

3. 結果

3.1 発芽への影響

発芽度合は、イオン交換水のみ、5、10、50、100 ppm のグループ、イオン交換水のみ、200、400、800 ppm のグループごとに、対照区のイオン交換水のみを 100 として比較した値である。表 2、3、4 に、Sc、Gd、La それぞれの発芽への影響および各試験用水の発芽生長試験前後の pH をまとめた。Sc、Gd、La の塩化物濃度は、重量濃度 ppm ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) と共にモル濃度 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ でも示す。

800 ppm - $\text{LaCl}_3\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ を除き、発芽度合は 100 以上であるが、そのほとんどが 100 で、最大でも 104 であり、希土類元素の添加による発芽への顕著な有意性は観察されない。また、希土類元素の種類および試験用水濃度による発芽度合の差も認められない。

発芽生長試験前後の pH 変化は、イオン交換水のみでは 6.5 から 5.8 \rightarrow 0.7 低下が認められた。また、発芽生長試験前の pH が 6.0 以上である 5 ppm - $\text{LaCl}_3\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ と 10 ppm - $\text{LaCl}_3\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ では、それぞれ 6.2 から 5.8 \rightarrow 0.4 低下と 6.1 から 5.7 \rightarrow 0.4 低下が認められた。一方、発芽生長試験前の pH が 6.0 未満である Sc、Gd、La 塩化物の各試験用水では 0.3 \sim 1.9 の pH 上昇が認められた。このように、発芽生長試験前後の pH は、試験前の pH が 6 以上では低下し、pH が 6 未満では上昇し、

表2：Scの発芽への影響

	pH **	発芽度合
イオン交換水	6.5 5.8	100
5 ppm - ScCl ₃ ·6H ₂ O (1.9 × 10 ⁻⁵ mol·L ⁻¹) *	5.4 5.8	104
10 ppm - ScCl ₃ ·6H ₂ O (3.9 × 10 ⁻⁵ mol·L ⁻¹) *	5.1 5.7	102
50 ppm - ScCl ₃ ·6H ₂ O (1.9 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	4.5 5.6	100
100 ppm - ScCl ₃ ·6H ₂ O (3.9 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	4.2 5.5	100
200 ppm - ScCl ₃ ·6H ₂ O (7.7 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	3.6 5.3	102
400 ppm - ScCl ₃ ·6H ₂ O (1.5 × 10 ⁻³ mol·L ⁻¹) *	3.4 5.3	102
800 ppm - ScCl ₃ ·6H ₂ O (3.1 × 10 ⁻³ mol·L ⁻¹) *	3.3 5.2	100

注：* () 内はScCl₃·6H₂Oのモル濃度、** 上段は試験前pH、下段は試験後pH。

表3：Gdの発芽への影響

	pH **	発芽度合
イオン交換水	6.5 5.8	100
5 ppm - GdCl ₃ ·6H ₂ O (1.3 × 10 ⁻⁵ mol·L ⁻¹) *	5.4 5.8	104
10 ppm - GdCl ₃ ·6H ₂ O (2.7 × 10 ⁻⁵ mol·L ⁻¹) *	5.3 5.7	100
50 ppm - GdCl ₃ ·6H ₂ O (1.3 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	5.1 5.5	100
100 ppm - GdCl ₃ ·6H ₂ O (2.7 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	5.0 5.3	100
200 ppm - GdCl ₃ ·6H ₂ O (5.4 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	5.0 5.3	100
400 ppm - GdCl ₃ ·6H ₂ O (1.1 × 10 ⁻³ mol·L ⁻¹) *	4.8 5.3	102
800 ppm - GdCl ₃ ·6H ₂ O (2.2 × 10 ⁻³ mol·L ⁻¹) *	4.7 5.2	100

注：* () 内はGdCl₃·6H₂Oのモル濃度、** 上段は試験前pH、下段は試験後pH。

すべてで発芽生長試験後のpHは5.2～5.8の範囲となる。カイワレ大根の発芽と生長時における培養液中のH⁺濃度変化を調べた報告(藤野他, 1992)がある。培養液が100 mL、種子が20個、陽光ランプ連続点灯と本報告の実験条件はまったく異なる。その報告では、培養液の発芽生長試験前pHが4～6において、4日間辺りまでは種子へのH⁺の吸収が原因と考えられるpH上昇が観察される。また、種子へH⁺の吸収される時は、逆に種子から植物必須元素であるK⁺が放出するとされている。この現象は、特に種子が発芽するまでの約20時間は顕著であり、その後の生長過程になると発芽過程とは逆にpH低下し始める。培養液中にK⁺を10⁻⁵～10⁻⁴ mol·L⁻¹含有させた場合でも同様な結果が得られることが示されている。その

表4：Laの発芽への影響

	pH **	発芽度合
イオン交換水	6.5 5.8	100
5 ppm - LaCl ₃ ·7H ₂ O (1.3 × 10 ⁻⁵ mol·L ⁻¹) *	6.2 5.8	100
10 ppm - LaCl ₃ ·7H ₂ O (2.7 × 10 ⁻⁵ mol·L ⁻¹) *	6.1 5.7	104
50 ppm - LaCl ₃ ·7H ₂ O (1.3 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	5.2 5.7	104
100 ppm - LaCl ₃ ·7H ₂ O (2.7 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	5.1 5.5	100
200 ppm - LaCl ₃ ·7H ₂ O (5.4 × 10 ⁻⁴ mol·L ⁻¹) *	5.0 5.3	100
400 ppm - LaCl ₃ ·7H ₂ O (1.1 × 10 ⁻³ mol·L ⁻¹) *	4.9 5.3	102
800 ppm - LaCl ₃ ·7H ₂ O (2.2 × 10 ⁻³ mol·L ⁻¹) *	4.8 5.2	96

注：* () 内はLaCl₃·7H₂Oのモル濃度、** 上段は試験前pH、下段は試験後pH。

カイワレ大根の発芽生長試験4日間辺りまでの培養液のpH上昇傾向は、本報告の発芽生長試験前のpHが6未満のグループに観察される現象と同じであった。しかしながら、発芽生長試験前のpHが6以上のグループに観察される現象については現時点では説明できない。

3.2 生長への影響

生長度合は、イオン交換水のみ、5、10、50、100 ppmのグループ、イオン交換水のみ、200、400、800 ppmのグループごとに、播種したすべて種子をそれぞれ表1のように生長度合を6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をの点数を100として比較した。

3.2.1 スカンジウムの場合

Scについて生長試験の結果を棒グラフにしたものを図3に示す。5～100 ppm - ScCl₃·6H₂Oの低濃度域ではイオン交換水のみと比べて生長度合が6～16高く、Scの添加による生

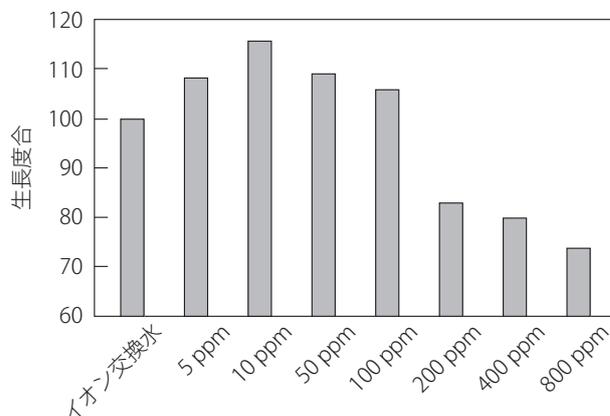


図3：試験用水x ppm - ScCl₃·6H₂Oの濃度と生長度合の関係

長の促進が認められる。一方、200 ppm - $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 以上の高濃度域ではイオン交換水のみと比べて生長度合が17以上低くなり、逆にScの添加による生長の阻害が認められる。このような希土類元素の高濃度添加により生長が阻害される現象は、Scが枯草菌によるアミラーゼやプロテアーゼの生産が向上するとの報告 (Inaoka and Ochi, 2011) およびLaがイネの根の生長を促進するとの報告 (Liu et al., 2013) においても認められている。希土類元素は弱い抗菌活性を有することが知られており (Inaoka and Ochi, 2011)、非致死濃度のScの添加ではコマツナの種子の発芽と生長には大きな影響は少ないが、播種後3日間の生長での阻害が観察される200 ppm以上の濃度では、この抗菌活性が影響していることも考えられる。

生長度合の各評価点数を占めるサンプル数の比率を図4に示す。イオン交換水の場合では5点が2%、4点が40%、3点が24%、2点が20%、1点が10%、0点が4%で、10 ppm - $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の場合では5点が8%、4点が58%、3点が12%、2点が10%、1点が10%、0点が2%で、200 ppm - $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の場合では5点が0%、4点が0%、3点が60%、2点が24%、1点が14%、0点が2%となる。5~100 ppm - $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の低濃度域では、4点(生長2 cm以上5 cm未満)が最も高い比率を占め、高濃度域の200~400 ppm - $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ では3点(生長2 cm未満)が、800 ppm -

$\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ では2点(葉あるいは根どちらか一方確認)が最も高い比率を占める。イオン交換水のみと比べて生長度合が高くなる場合から低くなる場合に移る従い、最も高い比率の生長度合の評価点数は4点から2点へと低い方へ移る傾向が認められる。

3.2.2 ガドリニウムの場合

次に、Gdについて生育試験の結果を棒グラフにしたものを図5に示す。5 ppm - $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ではイオン交換水のみと同程度の生長度合であり、10 ppm - $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ではイオン交換水のみと比べて生長度合が4高いが、Scの場合と異なりGdの添加による生長の顕著な促進は認められない。また、50 ppm - $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 以上ではイオン交換水のみと比べて生長度合が6以上低くなり、Gdの添加量が増えるに従い生長の阻害が大きくなる。

3.2.3 ランタンの場合

最後に、Laについて生長試験の結果を棒グラフにしたものを図6に示す。Scの場合とGdの場合と異なり、5~800 ppm - $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ のすべての濃度域でイオン交換水のみと比べて生長度合を超えるものはなく、Laの添加による生長の促進は認められない。200 ppm - $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ と400 ppm - $\text{LaCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ で

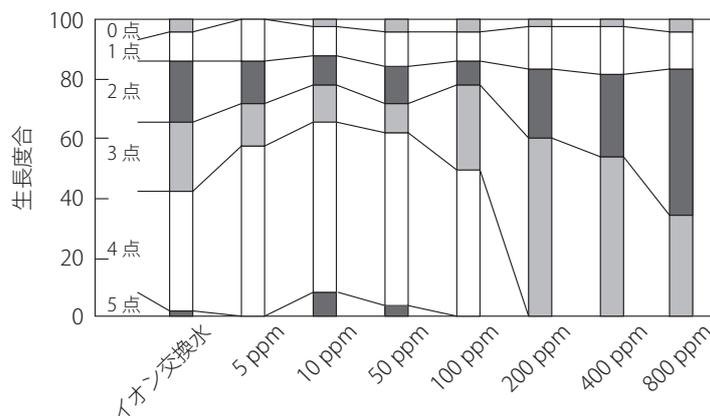


図4：試験用水x ppm - $\text{ScCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の濃度ごとの生長度合の各評価点数を占めるサンプル数の比率

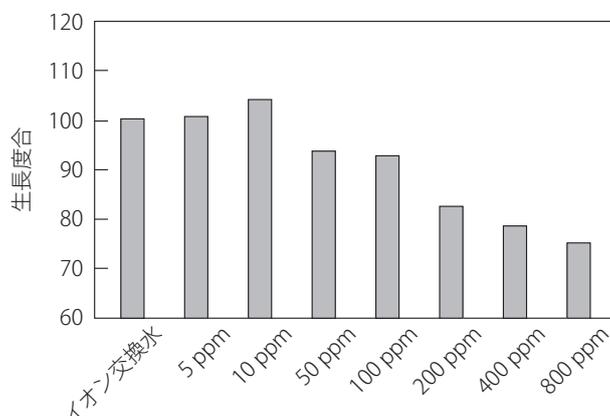
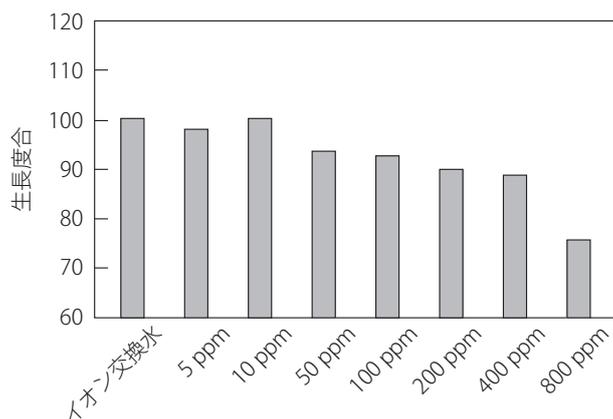


図5：試験用水x ppm - $\text{GdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の濃度と生長度合の関係

図6：試験用水x ppm - LaCl₃·7H₂Oの濃度と生長度合の関係

は生長度合は90付近で、Scの場合とGdの場合より生長を阻害する影響が小さい。

以上のように、Sc、Gd、Laの添加によるコマツナの生長の促進は、Scにおいてのみ認められた。生長の促進には、Sc、Gd、Laの酸化還元電位の影響も考えられる。酸性溶液での酸化還元電位は、Scが-2.03、Gdが-2.29、Laが-2.37である(足立, 1999)。僅かな差であるが、Sc、Gd、Laのうちで負の値が最も大きいLaが酸化状態になり易く生長が期待できる。しかしながら、生長の促進が認められたのはScにおいてのみであり、逆の結果となった。その他に、Sc、Gd、Laのイオンサイズの違いの影響を考えてみた。Sc、Gd、Laの3価の希土類イオン半径はSc < Gd < Laの順である。また、希土類イオン水溶液中では、[Sc(H₂O)₉]³⁺の形、[Gd(H₂O)₉]³⁺と[Gd(H₂O)₈]³⁺との共存の形、[La(H₂O)₉]³⁺の形で存在しているものと考えられている(足立, 1999)。このことから、Sc、Gd、LaのうちでScが最もコマツナ内に取り込まれやすいと考えられる。ただし、試験用水のSc、Gd、La濃度が上がるとコマツナ内に取り込まれるSc、Gd、Laの量も増える予想されることから、Sc、Gd、Laのイオンサイズの違いのみでは、Scの添加においてのみで生長の促進が認められたことを説明することは難しい。1.で記述した培地に非致死濃度のSc(ScCl₃·6H₂Oを使用)を添加することで枯草菌によるアミラーゼやプロテアーゼの生産が向上するとの報告(Inaoka and Ochi, 2011)では、生産促進作用が認められたのは希土類元素の中で唯一Scにおいてのみであるとされている。その原因は、希土類元素の中でScが最も原子量が小さい、その化学的性質がAlと似ていることが関係しているかもしれないが、不思議な結果であるとのみ述べられている。Scが微生物の物質生産向上および植物の生育促進でも有用な作用を示す結果は、Scが特徴的に有する遷移元素と希土類元素の両性質に起因する現象なのかもしれない。

今後は、Sc、Gd、La以外の希土類元素およびScとよく似た性質を示す第一遷移金属元素についても、本報告と同様な実験を行う予定である。また、コマツナ中への金属元素の種類と取込量の関係についての検討も必要と考えられる。

4. まとめ

希土類元素の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。発芽へ及ぼす影響は、Sc、Gd、Laの3種類の希土類元素において800 ppm - LaCl₃·7H₂Oを除き発芽度合はイオン交換水のみの場合の100以上であったが、そのほとんどが100で、最大でも104であり、希土類元素の添加による発芽への顕著な有意性は観察されなかった。また、希土類元素の種類および試験用水濃度による発芽度合の差も認められなかった。一方、生長へ及ぼす影響は、Scにおいては5 ~ 100 ppm - ScCl₃·6H₂Oの低濃度域ではイオン交換水のみ比べて生長度合が6 ~ 16高く、Scの添加による生長の促進が認められた。Gdにおいてはイオン交換水のみで生長度合を超えるものは10 ppm - GdCl₃·6H₂Oのみで、その生長度合も104であり、Gdの添加による生長の顕著な促進は認められなかった。Laにおいては5 ~ 800 ppm - LaCl₃·7H₂Oのすべての濃度域でイオン交換水のみで生長度合を超えるものはなく、Laの添加による生長の促進は認められなかった。

謝辞

本研究は、第一希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。

引用文献

- Inaoka, T. and Ochi, K. (2011). Scandium stimulates the production of amylase and bacilysin in *Bacillus subtilis*. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 77, No. 22, 8181-8183.
- Liu, D., Wang, X., Zhang, X., and Gao, Z. (2013). Effects of lanthanum on growth and accumulation in roots of rice seedlings. *Plant, Soil and Environment*, Vol. 59, No. 5, 196-200.
- 越智幸三 (2017). バイオテクノロジー研究の戦略的高度化と産業発展への貢献. 平成26年度~平成28年度私立大学戦略的基盤形成支援事業研究成果報告書, 10-13.
- Emsley, I. (2014). Unsporting scandium. *Nature Chemistry*, Vol. 6, No. 11, 1025.
- 中川智行・三井亮司・谷明生・河合啓一 (2015). レアアースを必須因子として要求する新たな代謝系—植物共生細菌たちがもつレアアース依存型C1代謝—. *化学と生物*, Vol.

53, No. 11, 744-750.

鷹屋光俊・戸谷忠雄・高田礼子・小滝規子・吉田勝美・神山宣彦 (2005). 希土類酸化物の生体影響. *Journal of Aerosol Research, Japan*, Vol. 20, No. 3, 207-212.

篠原厚子 (2005). 希土類化合物の生体影響—ヒトおよび実験動物に関する知見—. 希土類, No. 47, 57-64.

Shannon, R. D. and Prewitt, C. T. (1969). Effective ionic radii in oxides and fluorides. *Acta Crystallographica Section B*, Vol. 25, 925-946.

足立吟也 (1999). 希土類の科学—1章 希土類元素とは—. 化学同人.

藤野治・松井正荊・木原林・宗林由樹・鈴木みつ子 (1992). カイワレ大根の発芽・生長時における培養液中水素イオンとカリウムイオンの濃度変化. 日本化学会誌, No. 5, 580-585.

足立吟也 (1999). 希土類の科学—18章 溶液中の希土類イオン—. 化学同人.

(受稿：2019年9月16日 受理：2019年10月7日)