

中国東北部で生育するソーダ質耐性牧草に対する 根圏のアルミニウムとケイ素の影響

吉田有宏¹、佐藤 敦²、徐 安凱³、亀井 茂¹、世良耕一郎⁴、後藤祥子⁵、河合成直¹

¹岩手大学農学部
020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

²秋田県立大学
010-0195 秋田市下新城中野字街道端西 241-438

³中国吉林省農業科学院中国農業科技東北創新中心畜牧分院
吉林省公主嶺市科貿西大街 303 号

⁴岩手医大サイクロトロンセンター
020-0603 岩手県滝沢市留が森 348-58

⁵日本アイソトープ協会滝沢研究所
020-0603 岩手県滝沢市留が森 348-1

1 はじめに

近年、アフリカ、アジア、南北アメリカやイベリア半島などの世界の乾燥地では、土壤劣化、いわゆる砂漠化が進行している¹。地球上の総陸地面積 153 億 ha のうち、61 億 ha (約 40 %) は乾燥地が占めると言われている²。乾燥地における砂漠化が進行する要因の一つに、土壤の塩類集積がある²。現在、世界の耕作適地は約 70 億 ha であり、そのうち 15 億 ha が農業に利用されている。農業に利用地されている面積のうち、3.4 億 ha (23 %) が塩性土壤で、5.6 億 ha がソーダ質土壤におおわれている³。塩性土壤、及び、ソーダ質土壤は耕作適地の全面積の約 10 % を占めており、それら土壤は 100 以上の国々に存在する。現在、土壤の塩類集積が進んでいる塩類土壤、ソーダ質土壤は世界の農業生産の制限要因として問題となっており、それら土壤の改善修復が大きな課題となっている。

現在、中国では北部を中心に塩類土壤とソーダ質土壤（合わせて塩類集積土壤と呼ぶ）が分布しており、中国北部には耕地面積における塩類集積土壤の割合が高い地域も多い。中国国内の塩類集積土壤の拡大が問題となっている地域の一つに Songnen 平原がある。Songnen 平原は広大な平野盆地であり傾斜がほとんどなく地形が非常に平らで、流入水の流れは非常に緩やかである。また、この地域より海に通じる大河としてアムール川が流れているが、山地などから流入する水の海に通じる出口の川が一つしかないため、流入した含塩水は平坦な盆地の中の平原に留まり、塩類の自然排出量が不十分である。

加えて、その平原の土壌は非常に粘土質で、飽和動水伝導率が低いため、可溶性塩物質は土壌断面に浸透できず、土壌表層や準表層にとどまることになる。

また、Songnen 平原のある中国東北部は大陸性モンスーン気候に属するため、年間の寒暖差が激しく、降水量は少ない。年間気温は1月の -18°C から7月の $+23^{\circ}\text{C}$ まで変化し、年間降水量は300 mm から600 mm の範囲である。降雨の80%以上が夏の雨期に主に生じ(6月-9月)、1年の7カ月は湿度不足が生じている。冬と春においては、降水量は著しく少なく、総量の13%である。年間平均蒸発量は1200-1800 mm であり、これは年間降水量の2-3.5倍である⁴。そのため、雨期においても土壌からの除去される塩の量は不十分であり、1年の大半は山岳地帯から溶出される塩や人為により環境に放出される塩類、特にナトリウムが集積し、土壌 pH が上昇し、塩類土壌からソーダ質土壌が形成されやすい状況である。このナトリウム塩類が集積し、塩類が集積土壌の pH が上昇していく現象をソーダ質化と呼ぶ。

土壌のソーダ質化は、牧草の品質と生産量だけでなく、牧草の多様性も減少させる。現在、Songnen 平原の土壌環境がより悪くなるにつれて、質の良い牧草や豆類が減少し、平原の経済的生存力が減少し、この地域の経済発展が著しく制限されている。換言すれば、土壌のソーダ質化は牧畜と農業における地域全体の持続的な発展における、主要な負の要因になっている⁴。そのため、Songnen 平原では土壌のソーダ質化を緩和し、ソーダ質土壌を修復改善することが、大きく求められている。

以上のことから、本研究ではソーダ質土壌中で生育する耐性植物シオチガヤの研究を行った。この植物の植物栄養生理学的特性を明確にするために検討したところ、それらソーダ質土壌に特徴的な性質であるアルミニウムとケイ酸が土壌溶液中に高濃度に存在することが大きな影響を与えていると考えられた。そこで本研究では、そこで生育する植物体の生育と根圏に存在するアルミニウムとケイ酸などの濃度が植物体の生育と元素組成にどのような影響を及ぼすかを調査した。

2 実験方法

植物の栽培法 供試植物として、オオムギ (*Hordeum vulgare* L. cv. Minorimugi)、及び、シオチガヤ※を用いた。一般的に、オオムギは高い塩類耐性を持つと言われる⁵。ソーダ質耐性植物シオチガヤの種子は、中国吉林省農業科学院畜牧分院の徐安凱分院長から提供された。

※シオチガヤ (和名: 塩地茅 (シオチガヤ)、学名: *Puccinellia chinampoensis* Ohwi、中国名: 朝鮮碱茅) *Puccinellia* 属の C3 型多年生牧草。中国東北部から内陸部にかけての広い地域に分布する。乾燥や低温等への環境ストレス耐性が高く、また高いソーダ質耐性を持ち、土壌 pH 9-10.5、土壌表層の含塩量 1.5%以上の条件下でも正常に生育する^{6,7}。これらの耐性の他に、家畜嗜好性も高いため、中国吉林省農業科学院では、この植物を用いた Songnen 平原の植生回復を試みており、研究が行われている⁷。

植物体は、人工気象室 (KG-206HI, Koito Industries Ltd, Tokyo, Japan) 内、日照時間、温度、光強度を調整された条件下で水耕栽培された (day/night, 14/10 h; temperature, 17/10 $^{\circ}\text{C}$; light intensity, 280 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)⁸。

植物の種子は、塩化カルシウム溶液 (1.0 mol/L CaCl_2) を含むプラスチック容器内の、プラスチック網の上に置かれ、シオチガヤの種子は7日間、オオムギの種子は3日間、静置した。発芽した種子は、1.0 mol/L CaCl_2 から 1/5 濃度に調整された Hoagland and Arnon No.2 改変培地に移され、シオチガヤは21日間、オオムギは7日間栽培された。各植物体の幼苗は、1/2 濃度に調整された下記の Hoagland and Arnon No.2 改変培地に移され、栽培された後採取された。

本実験では、以下の実験処理区が用意された。培地は全て、control の 1/2 濃度 Hoagland and Arnon No.2 改変培地を基準に作成された。

アルカリ条件区 (pH 10.0 の条件)

1. control: 1/2 濃度 Hoagland and Arnon No.2 改変培地 (pH 10.0) (以下 H&A 培地と記述)
2. Al 条件: H&A 培地+ 500 $\mu\text{mol/L}$ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (pH 10.0)
3. Si 条件: H&A 培地+ 500 $\mu\text{mol/L}$ Na_2SiO_3 (pH 10.0)
4. Al + Si 条件: H&A 培地 + 500 $\mu\text{mol/L}$ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 500 $\mu\text{mol/L}$ Na_2SiO_3 (pH 10.0)

ソーダ質条件区: (炭酸イオン NaHCO_3 添加)

- ① control: H&A 培地+ 20 mmol/L NaHCO_3 (pH 10.0)
- ② Al 条件: H&A 培地+ 20 mmol/L NaHCO_3 + 500 $\mu\text{mol/L}$ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (pH 10.0)
- ③ Si 条件: H&A 培地+ 20 mmol/L NaHCO_3 + 500 $\mu\text{mol/L}$ Na_2SiO_3 (pH 10.0)
- ④ Al + Si 条件: H&A 培地+ 20 mmol/L NaHCO_3 + 500 $\mu\text{mol/L}$ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 500 $\mu\text{mol/L}$ Na_2SiO_3 (pH 10.0)

各実験処理区は、1.0 mol/L NaOH、及び、1.0 mol/L HCl を用いて、pH を調整した。

分析法 採取された植物の元素含量は、60°Cにて通風乾燥した後、粉碎し、100°C~140°C、10–24 時間で硝酸分解し、内部標準を添加後、日本アイソトープ協会滝沢研究所の PIXE にて分析⁹を行った。

3 結果と考察

視覚的症状 アルカリ条件下 (pH 10) のシオチガヤの生育の様子は、図 1 に示した。明瞭であったのは pH 10 のアルカリ条件下において、シオチガヤは、control 区よりも Al 添加区で大きく生育が減退し、葉が黄化したことである。Si 添加区では control 区よりもやや生育が減退したように見えた。また、Fe 欠乏クロロシスのように、葉色が薄くなった。また、Al + Si 添加区では、Al 添加区よりも生育が良好に見えた。つまり、Si の添加により Al の害が軽減されているように見えた。生育自体は control 区よりも減退したように見えた。また、Al + Si 添加区でも、control 区と比較して、Fe 欠乏クロロシスのように、葉色がやや薄くなっていた。

ソーダ質条件下のシオチガヤの生育に対する Al、及び、Si の影響の様子は、図 2 に示した。アルカリ条件下とソーダ質条件下の植物を比較すると、ソーダ質条件下のほうがシオチガヤの生育は良好に見えた (図 1、2)。

また、ソーダ質条件下においても、各処理区のシオチガヤの生育の様子は、アルカリ条件下と同様の傾向が見られた。すなわち、Al 添加区では control 区よりもシオチガヤの生育が大きく減退し、葉が黄化した。また、Si 添加区でも、control 区よりも、やや生育が減退したように見えた。Al + Si 添加区では、control 区よりも生育が減退していたが、Al 添加区よりも生育が良好であった。

また、アルカリ条件下の Si 添加区、及び、Al + Si 添加区では、Fe 欠乏クロロシスのような現象が見られたが、ソーダ質条件下の各処理区では、同様の減少は見られなかった。

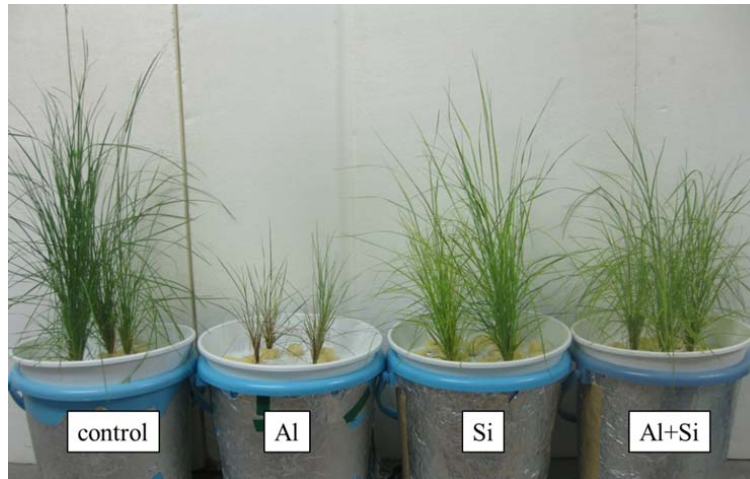


図1 アルカリ条件下のシオチガヤの生育に対する、Al、及び、Siの影響
実験処理後28日目の様子。各処理区はpH 10に調整された。

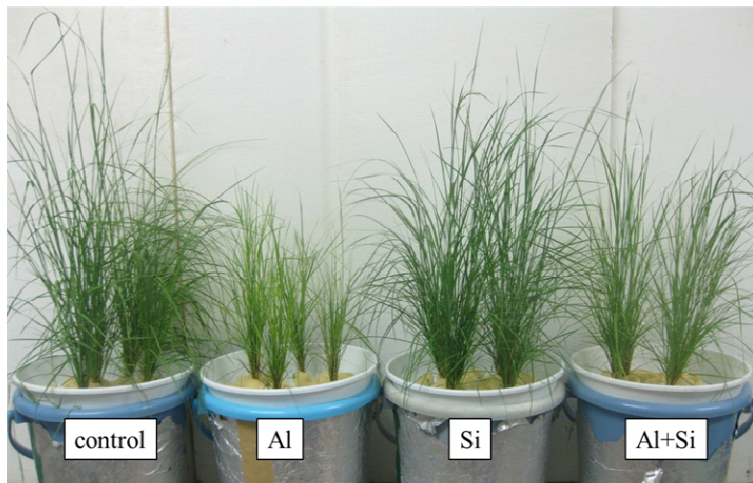


図2 ソーダ質条件下のシオチガヤの生育に対する、Al、及び、Siの影響
実験処理後28日目の様子。各処理区は20 mmol/L NaHCO₃を含み、pH 10に調整された。

アルカリ条件下のオオムギの生育の様子は、図3に示した。pH 10のアルカリ条件下において、オオムギの生育はcontrol区よりもAl添加区で大きく減退し、葉が黄化した。また、Si添加区では、control区よりも、やや生育が良好に見え、シオチガヤのSi添加区に見られたFe欠乏クロロシスのような症状は見られなかった。また、Al+Si添加区ではAlが溶液中に存在しているにも関わらず、control区と同程度の生育を示し、Al添加区よりも生育が良好に見えた。また、Al+Si添加区でも、同じ処理をしたシオチガヤに見られたFe欠乏クロロシスのような症状は見られなかった。

ソーダ質条件下のオオムギの生育に対する、Al、及び、Siの影響の様子は、図4に示した。オオムギの生育量をアルカリ条件下とソーダ質条件下を同じ処理をした区同士を比較すると、すべての処理区でソーダ質条件下のほうが減少しているように見えた。

また、各処理区のオオムギの生育の様子は、ソーダ質条件下においてもアルカリ条件下での生育とほぼ同様の傾向が見られた。すなわち、control区よりもAl添加区でオオムギの生育が減退し、葉が黄化した。また、Si添加区でも、control区よりも、やや生育が良好に見え、Al+Si添加区では、control区と同程度の生育を示し、Al添加区よりも生育が良好に見えた。

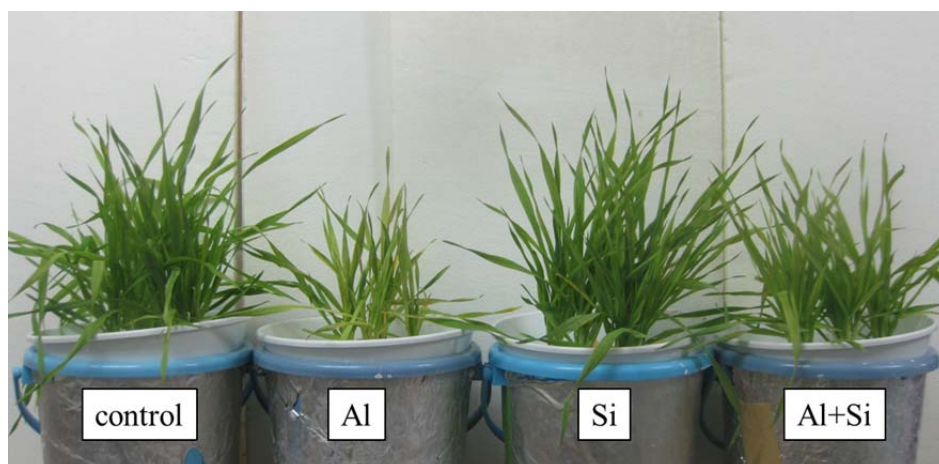


図3 アルカリ条件下のオオムギの生育に対する、Al、及び、Siの影響
実験処理後21日目の様子。各処理区はpH 10に調整された。

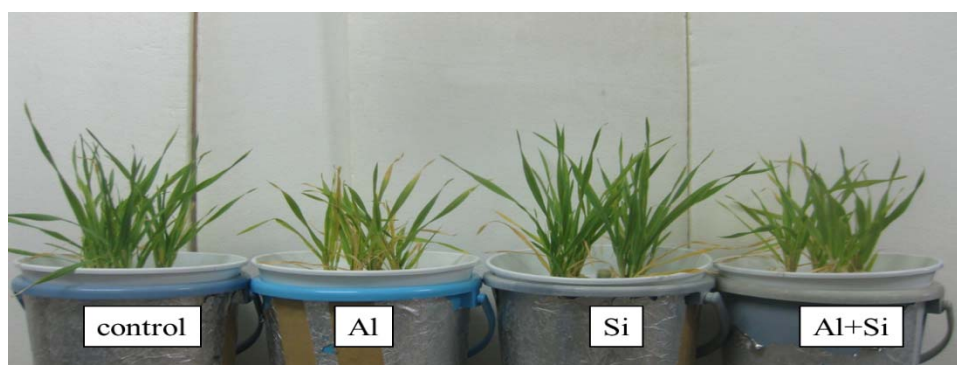


図4 ソーダ質条件下のオオムギの生育に対する、Al、及び、Siの影響
実験処理後21日目の様子。各処理区は20 mmol/L NaHCO₃を含み、pH 10に調整された。

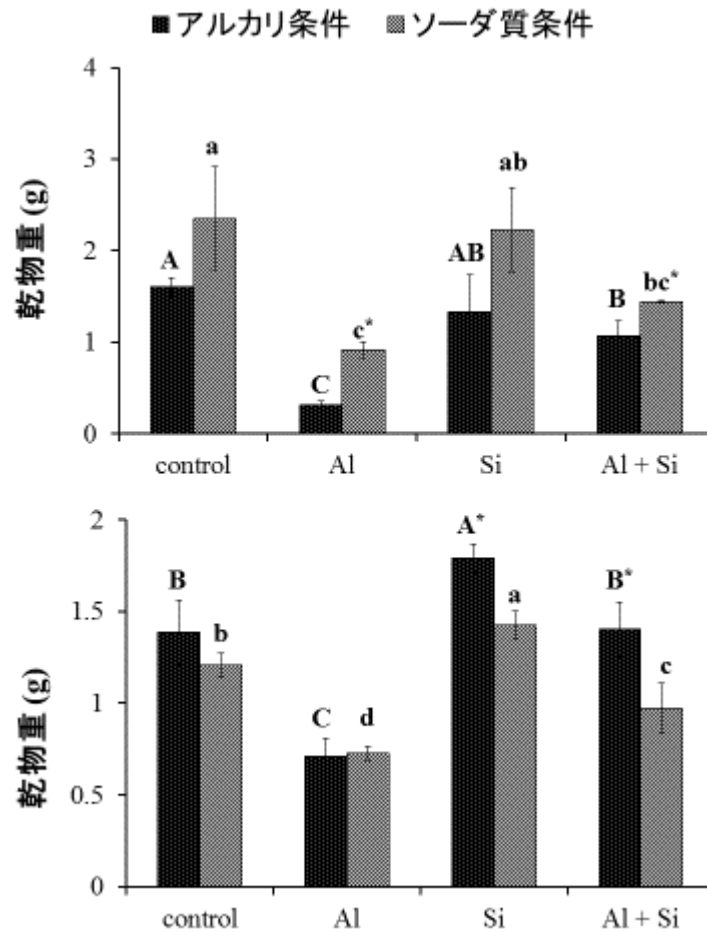


図5 各処理区で生育した植物の地上部乾物重 上: シオチガヤ 下: オオムギ
 処理区ごとに有意差のあるものに異なるアルファベットを付した。
 また、アルカリ条件下とソーダ質条件下を比較して有意差のあるものに*を付した。

乾物重 アルカリ条件下、ソーダ質条件下の各処理区で生育したシオチガヤの乾物重を図5(上)に示した。アルカリ条件下において、シオチガヤの地上部乾物重は、Al添加区、及び、Al+Si添加区で、control区よりも有意に減少した。また、Al+Si添加区の地上部乾物重は、Al添加区よりも有意に高い値を示した。また、Si添加区の地上部乾物重は、control区、及び、Al+Si添加区と比較して、有意差はなかった。

ソーダ質条件下では、シオチガヤの地上部乾物重は、Al添加区、及び、Al+Si添加区で、control区よりも有意に減少した。しかし、Al添加区とAl+Si添加区を比較すると、Al+Si添加区の地上部乾物重にAl添加区よりも高い傾向が見られたが、有意差は無かった。また、Si添加区の地上部乾物重は、control区、及び、Al+Si添加区と比較して有意差は無かった。

シオチガヤの地上部乾物重をアルカリ条件下とソーダ質条件下を同一処理区で比較すると、ソーダ質条件下のAl添加区、及び、Al+Si添加区のほうがアルカリ条件下より有意に高かった。

各処理区で生育したオオムギ地上部の乾物重を、図5(下)に示した。アルカリ条件下において、Al添加区は、control区よりも有意に減少し、全ての処理区で有意に最も低い値を示した。また、Si添加区は、最も有意に高い値を示した。また、Al+Si添加区は、control区と同程度の値を示し、control区との間に有意差は無かった。

オオムギ地上部の乾物重は、ソーダ質条件下では、Al添加区、及び、Al+Si添加区で、control区と比較し有意に減少した。また、Al添加区とAl+Si添加区を比較すると、Al+Si添加区の値はAl添加区

よりも有意に高かった。また、ソーダ質条件下では、Si 添加区の値は有意差のある最も高い値を示した。オオムギ地上部の乾物重を、アルカリ条件下と、ソーダ質条件下の同一処理区同士で比較すると、ソーダ条件下の Si 添加区、及び、Al+Si 添加区の値は、アルカリ条件下の値よりも有意に低かった。

植物体地上部の元素含量 植物体地上部の Al 含量を図 6 に示した。シオチガヤのアルカリ条件下での Si 添加区の Al 含量が他と比べ高いこととオオムギのソーダ条件下の Al 含量がアルカリ条件下と比較して高い以外は特に目立った影響は無いようであった。Al が地上部に集積しあまり地上部へ移行しないことを反映しているものと思われた。

植物体地上部の Si 含量は図 7 に示した。シオチガヤ、オオムギいずれも Si を添加した区で高くなった。control 区と Al 区の Si は環境からの混入であると思われた。オオムギにおいて Si 区においてアルカリ条件下のほうがソーダ質条件下より高くなった。シオチガヤにおいて Al+Si のほうが Si 区より Si 含量が低いことから、Al が Si の吸収を抑制するものと思われた。

植物体地上部の K 含量は図 8 に示した。シオチガヤにおいてはアルカリ条件の Al 区において K 含量が低下することが示された。また、Al 区と Al+Si 区においてソーダ質条件のほうがアルカリ条件より K 含量が高かった。これは、シオチガヤのような耐性植物においては Na よりも K を選択的に吸収する transporter が知られており^{10,11}、ソーダ質条件下においてシオチガヤのその transporter の機能が発揮されているものと思われた¹²。また、オオムギにおいてはソーダ質条件下で K 含量がアルカリ条件下より大きく減少していた。オオムギにおいては、Na が多い条件下で K の吸収が抑制されることが示されていた。

植物体地上部の P 含量は図 9 に示した。シオチガヤにおいては control 区、Al 区、Si 区においてアルカリ条件下よりソーダ質条件下でリン濃度が有意に高まることが示された。これはこの植物におけるソーダ質条件下でのリン吸収を促進する機能の存在を示唆しており興味深い。これに対し、オオムギはいずれの区においてもソーダ質条件下でアルカリ条件下の半分程度の値となった。ソーダ質条件下でリン吸収が低下することが、オオムギがソーダ質条件の土壌で生育できない一因となっている可能性を示唆しており興味深い結果であった。

4 まとめ

オオムギとソーダ質条件耐性植物であるシオチガヤの生育と養分吸収を比較した結果、pH 10.0 の条件下で Al が両方の植物の生育阻害要因になっていることが示唆された。一方、Si は両植物の生育を促進することが示され、Al と同時に与えると Al の害を軽減することが示された。また、元素吸収においては、シオチガヤはソーダ質条件下で K と P の吸収を促進する機能を持っていることが示されたが、オオムギにおいては、ソーダ質条件下で K と P の吸収が抑制されることが示された。このことが、ソーダ質条件に対する耐性の強弱の差になっていることが示唆された。

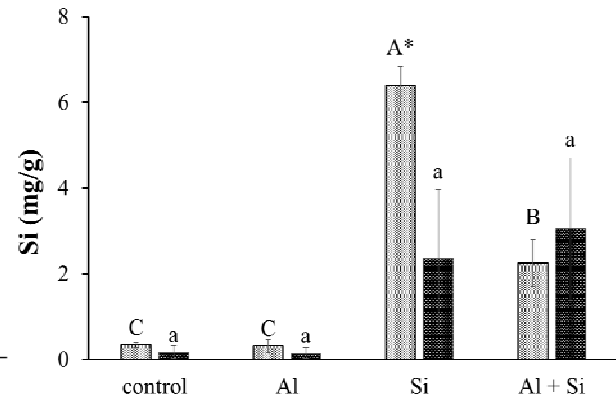
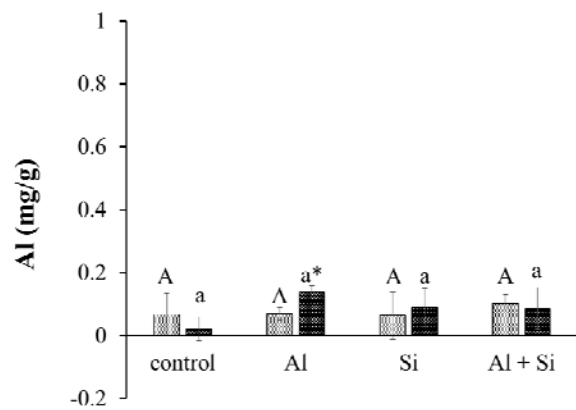
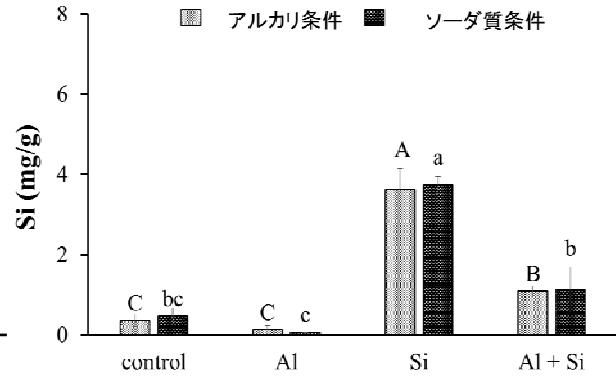
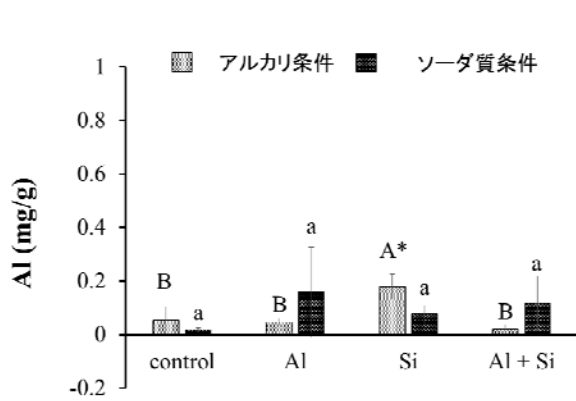


図6 植物地上部のAl含量

上: シオチガヤ 下: オオムギ

Control: 対照区 Al: Al添加区 Si: Si添加区 Al+Si: AlとSi添加区

アルカリ条件: pH 10.0 ソーダ質条件: pH 10.0 ; 20 mmol/L NaHCO₃

処理区ごとに有意差のあるものに異なるアルファベットを付した。

また、アルカリ条件下とソーダ質条件下を比較して有意差のあるものに*を付した。

図7 植物地上部のSi含量

上: シオチガヤ 下: オオムギ

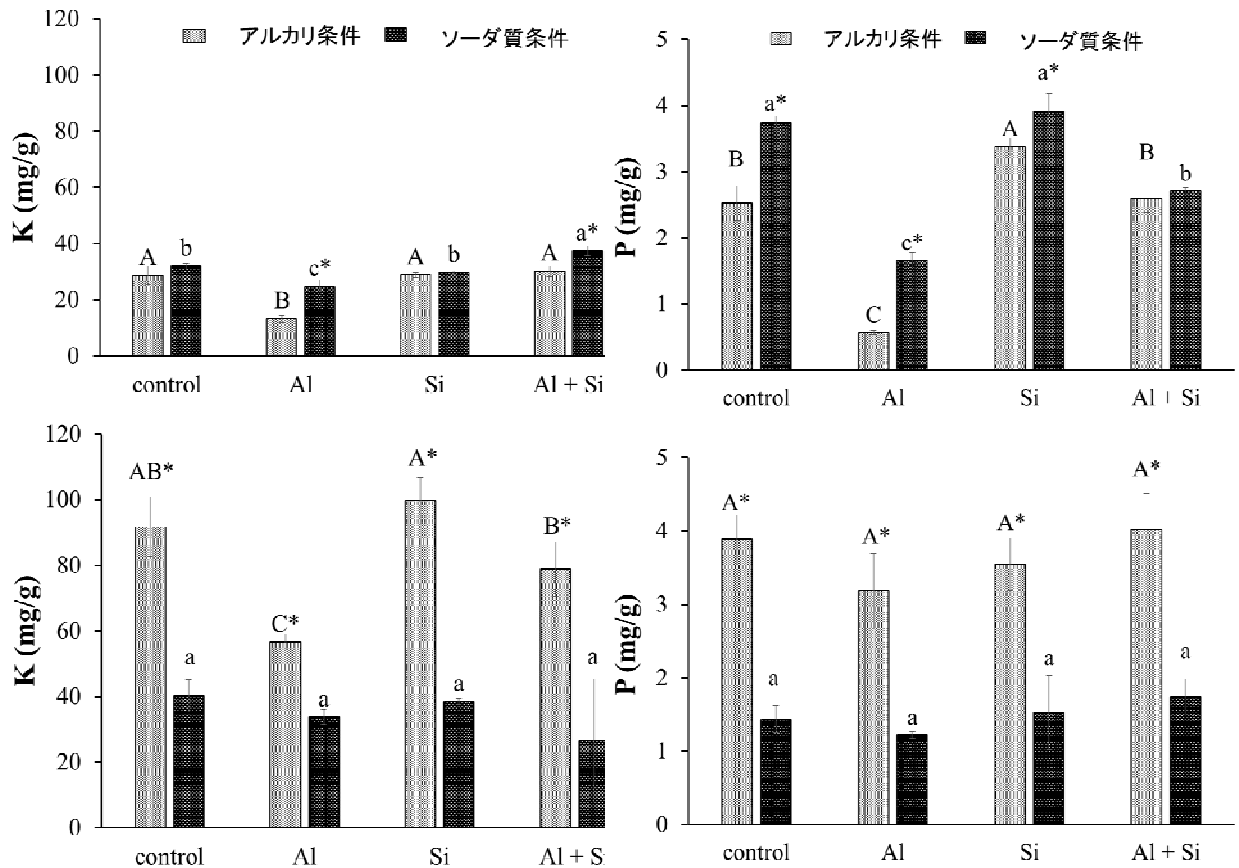


図8 植物地上部の K 含量

上: シオチガヤ 下: オオムギ

Control : 対照区 Al : Al 添加区 Si : Si 添加区 Al+Si : Al と Si 添加区

アルカリ条件 : pH 10.0 ソーダ質条件 : pH 10.0 ; 20 mmol/L NaHCO₃

処理区ごとに有意差のあるものに異なるアルファベットを付した。

また、アルカリ条件下とソーダ質条件下を比較して有意差のあるものに*を付した。

図9 植物地上部の P 含量

上: シオチガヤ 下: オオムギ

参考文献

- 1) Dregne HE (1986) Desertification of arid lands. In: El-Baz F, Hassan MHA (eds) Physics of desertification, pp. 1-24. Harwood Academic Publishers, New York, USA.
- 2) 山本 太平 2008: 乾燥地の土地劣化とその対策. pp. 1-32, 121-170. 古今書院, 東京, 日本.
- 3) Tanji KK 2002: Salinity in the soil environment. In: Läuchli A, Lüttge U (eds) salinity environment-plants-molecules, pp. 21-51. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- 4) Wang L, Seki K, Miyazaki T, Ishihama Y (2009) The causes of soil alkalization in the Songnen Plain of Northeast China. Paddy Water Environ, 7, 259-270.
- 5) Orcutt DM, Nilsen ET (2000) Salinity stress. In: Orcutt DM, Nilsen ET (eds) Physiology of plants under stress soil and biotic factors. pp. 177-236. John 449 Wilkey & Sons Inc, New York, USA.
- 6) Wang RZ, Yuan YQ (2001) Photosynthesis, transpiration, and water use efficiency of two *Puccinellia* species on the Songnen grassland, northeastern China. Photosynthetica, 39, 283-287.
- 7) Zhao MQ, Qi BL, Gao GC, Xu AK, Zhou YC (2007) Effect of different stage of nitrogen application on seed and herbage yield of *Puccinellia chinampoensis* Ohwi. Agric Tech, 27, 59-61 (in Chinese with

English summary).

- 8) Yoshida T, Kudo H, Zhao L, Wang H B, Sato A, Zu A K, Zhao M Q, Qi B L, Guo X M, Kawai S (2015) Iron solubilization of mugineic-acid family of phytosiderophores by barley and *Puccinellia chinampoensis* Ohwi under sodic conditions. International Journal Plant & Soil Science, 4(4): 297-311.
- 9) Sera K, Futatugawa S, Matsuda K, Miura Y (1996) Standard-free method of quantitative analysis for bio-samples. Int'l. J. PIXE 6(3) (4):467-481.
- 10) Ardie SW, Xie L, Takahashi R, Liu S, Takano T (2009) Cloning of a high-affinity K⁺ transporter gene *PutHKT2;1* from *Puccinellia tenuiflora* and its functional comparison with *OsHKT2;1* from rice in yeast and *Arabidopsis*. J. Exp. Bot 60 (12): 3491-3502.
- 11) Guo Q, Wang P, Zhang JL, Bao AK, Wang SM (2012) Selective transport capacity for K⁺ over Na⁺ is linked to the expression levels of *PtSOS1* in halophyte *Puccinellia tenuiflora*. Funct Plant Biol 39: 1047-1057.
- 12) Yoshida T, Namioka K., Zhao L, Wang H B, Sato A, Xu A K, Zhao M Q, Qi B L, Guo X M, Kawai S (2015) The relationship between electrical conductivity and growth of gramineae with varied tolerance to sodic saline condition-selectivity of K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ over Na⁺ in *Puccinellia chinampoensis* Ohwi. International Journal of Plant & Soil Science, 5(3): 175-185.

Effect of aluminum and silicon in rhizosphere on the grass tolerant to sodic condition in north eastern area of China

T. Yoshida¹, A. Sato², A. K. Xu³, S. Kamei¹, K. Sera⁴, S. Goto⁵ and S. Kawai¹

¹Faculty of Agriculture, Iwate University
3-18-8 Ueda, Morioka 020-8550, Japan

²Akita Prefectural University
241-438 Kaidobata-Nishi, Nakano, Shimoshinjo, Akita 010-0195, Japan

³Grassland Institute, Branch of Animal Husbandry, Jilin Academy of Agricultural Sciences
Gongzhuling 136100, China

⁴Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

⁵Takizawa Laboratory, Japan Radioisotope Association
348-1 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

Abstract

The aim of this research was to examine the effect of aluminum (Al) and silicon (Si) in the rhizosphere on the absorption of the elements by the plant “Shiochigaya” tolerant to the sodic condition. Concentrations of elements of the plant grown hydroponically under alkaline or sodic condition whose pH was 10.0 were measured by PIXE (Particle induced X-ray emission) comparing with those of barley. In both of the plants, growth was repressed by the addition of Al to the root medium. On the other hand, growth of barley was enhanced by the addition of silicate to the medium. Furthermore, repression of the growth of barley and shiochigaya was retrieved by the addition of silicate to the medium. In the analysis of elements of the plant shoots, it was shown that shiochigaya had the function to activate the absorption system of potassium (K) and phosphorus (P) under the sodic condition, but concentration of K and P in barley shoots were reduced under sodic condition. It was suggested that the difference of the response in absorption and translocation of elements to the shoots under sodic condition may result in the difference of the intensity of tolerance to sodic condition.