

ヒ素過剰の水耕オオムギの導管内を移行する導管液の元素含量

モラ シャイブル ラハマン, 伊藤じゅん*¹, 河合成直*²

岩手大学連合農学研究科
020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

*¹(社)日本アイソトープ協会滝沢研究所
020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字留が森 348-1

*²岩手大学農学部農業生命科学科
020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8

1 はじめに

ヒ素はバングラデシュやインドの West Bengal 州のベンガル語を話す人々の間では Bish (毒を意味する言葉) として知られる。バングラデシュやインドでは地下水が主な飲料水である。20 世紀の 1980 年代初頭, バングラデシュに隣接する West Bangle 州の東部で地下水のヒ素汚染が検出された。約 10 年前, その病害がヒ素であると認識されたといわれている。人々は “Arsenical dermatosis” (皮膚の黒色斑点, 損傷) に苦しんでおり, ヒ素害が激しい場合は皮膚がんを発症し死にいたることもある (Huq, 私信)。地下水の主な汚染源はヒ素を含む黄鉄鉱であると考えられている。その黄鉄鉱が酸化されヒ素が水に溶けても臭いは生じない。しかし, それが空中で燃えるとニンニクのような臭いとヒ素酸化物の白煙を生ずる。ヒ素はバングラデシュの地下水中では無機態であり, ヒ酸と亜ヒ酸がほぼ 1 : 1 で存在するといわれている。

バングラデシュ政府は地下水のヒ素の影響を軽減しようといくつかの活動を始めている。援助グループや有識者の委員会の創設, 水供給源確保のプロジェクトの立ち上げである。人, 動植物へのヒ素害は良く知られている。しかし, 地下水のヒ素の汚染源は未だ不確かな点もある。今までにヒ素を除く水処理法が確立され, 汚染地域の住民にヒ素汚染のない水の供給方法として奨励されており, バングラデシュの研究者や研究所がこのために努力している。バングラデシュ政府はその地下水汚染から生ずる事態の大きさを認識し, 1996 年, 特別高級会議を招集し, 保険省を議長とする国民委員会を設立した。

本研究は, バングラデシュのそうした事態を踏まえ, 岩手大学における国際貢献の一つとして, また, ダッカ大学土壌科学科 I. S. M. Huq 博士や(株)フジタの研究グループとの共同研究の第一歩として行われたものである。おもに, 植物栄養生理学に関するもので, 植物におけるヒ素害の機構を解明しようとするものであり, その国の農業生産と人々の健康に貢献しようとするものである。

土壌中の養分や水は植物根に吸収され, 導管を通過して地上部へ輸送される。ゆえに, 導管液の養分の濃度や組成は根圏の養分の利用されやすさを反映しているであろうし, 土の養分の有用性を決めるのに使えるかもしれない。導管中の物質の移行は下から上への一方通行であり¹⁾, 植物の導管液が多くは無機, 有機物質を含み, 地上部への微量必須元素の移行を容易にしていることは良く知られている²⁾³⁾。導管液の分析は根の

養分吸収に有益な情報を与えるが、そのデータの解釈には多くの点を考慮する必要がある。というのは、地上部を切り落とした植物から導管液として得られるのは根圧のみによって押し出された溶液であり、真の蒸散液ではない。その蒸散流を正しく評価するためには切り株から真空条件で溶液を採取する、または、根圏に圧力をかけるなどの方法が必要である。それらの方法によると、導管液の量は増え元素濃度は減少するようである。しかし、それでもなお、計算された移行速度は栽培状態の植物のそれとは異なるようである⁴⁾⁵⁾。現在までに導管液は根から地上部への物質移行の機構を明らかにするために研究されており⁶⁾⁷⁾⁸⁾、アブシジン酸やサイトカイニンなどの植物ホルモンに関する研究にも用いられて来た⁹⁾¹⁰⁾。しかし、培地のヒ素濃度を上昇させた時の元素の移行量の変化についての情報はほとんどない。そこで、私どもはヒ素過剰における導管中の元素濃度の変化を研究した。私どもの知る限り、ヒ素過剰におけるオオムギ導管中の元素組成についての情報はないと思われる。

2 実験方法

オオムギ品種ミノリムギを Hoagland & Arnon No. 2 培地にて温室内で水耕栽培した。約 2 葉期に 10L ポットに移植後、14 日間、ヒ素濃度 0, 6.7, 33.5, 67 μM (0, 0.5, 2.5, 5.0 ppm), pH 6.7 にて栽培した。pH は毎日調整し、水耕培地は連続的に通気を行った。植物体 3 株、9 個体を採取し、80°C で 24 時間乾燥した後、硝酸一過塩素酸分解¹¹⁾を行い、リン酸はバナドモリブデン酸法¹²⁾により、その他の元素は原子吸光光度法¹³⁾により測定した。導管液の採取においては、ヒ素処理後 14 日目の午後 3 時、植物の根元より 3 cm の所をカッターナイフで切断し、切り株より溢泌する導管液を 3.5 時間毛細管で採集し、小試験管に保存した¹⁴⁾。1 試験区 24 個体 (8 株) を 1 グループとし、2 連で溶液を採集した。導管液は重さと比重を測定し体積を求め、分析まで -20°C で凍結し、日本アイソトープ協会の仁科記念サイクロトロンセンターの PIXE によりその元素含量を測定した。

3 結果及び考察

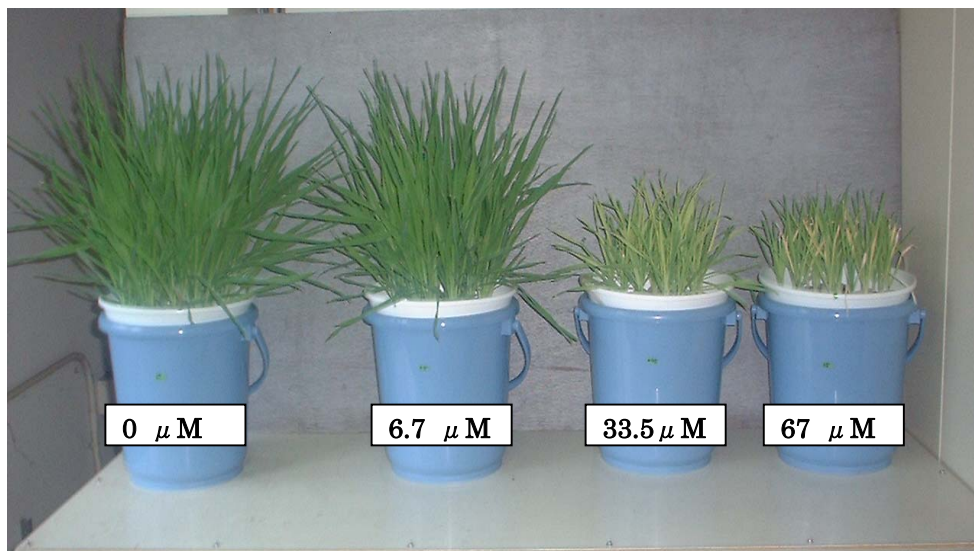


写真1 水耕栽培したオオムギの生育の様子

写真1 にオオムギの生育の様子を示した。33.5 μM を超えると突然植物の生育が悪くなった。また、新葉が黄化した。いわゆるクロロシスと呼ばれる症状であったが、この症状は、鉄欠乏症状(鉄クロロシス)と似ていた。ヒ素害が顕著に現れる濃度は 6.7 と 33.5 μM の間にあると思われた。

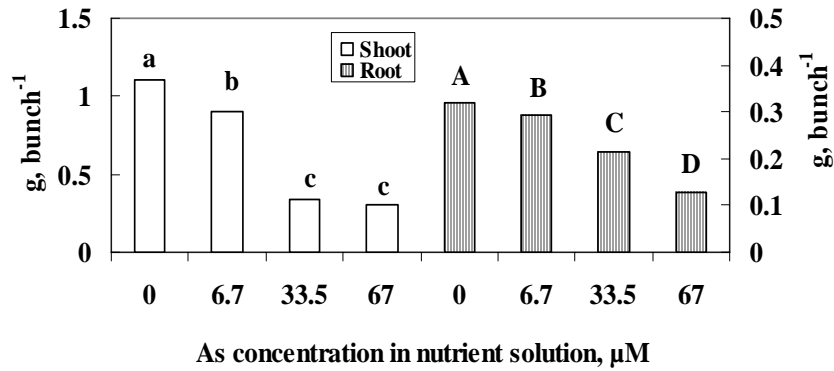


図1 培地のヒ素濃度と植物の地上部 (Shoot) と根 (Root) の乾物重の関係

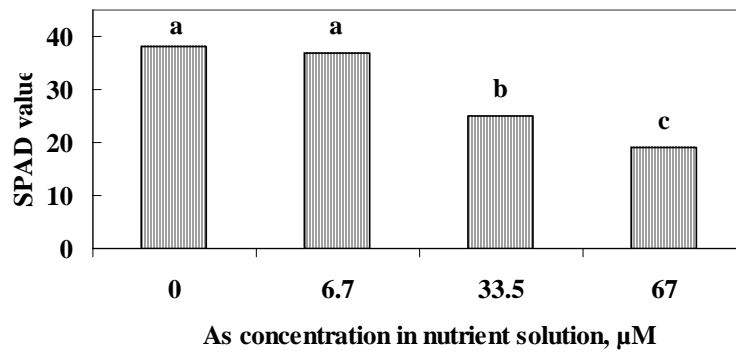


図2 培地のヒ素濃度と植物の葉緑素指数との関係

図1にオオムギの生育量と水耕培地のヒ素濃度との関係を示した。ヒ素濃度が33.5 μMを超えると地上部の生育量が急激に悪くなることがわかった。また、図2に植物の葉緑素含量を示す葉緑素指数(葉緑素計で測定したSPAD値)を示した。葉緑素含量が33.5 μMを超えると低下する傾向が示されている。

図3に植物のヒ素の濃度及び地上部への移行量と水耕培地のヒ素濃度との関係を示した。ヒ素濃度の上昇に伴い、予想通り導管液のヒ素濃度は上昇した。しかし、導管液の量の減少により、ヒ素の移行量は必ずしも上昇するわけではなかった。

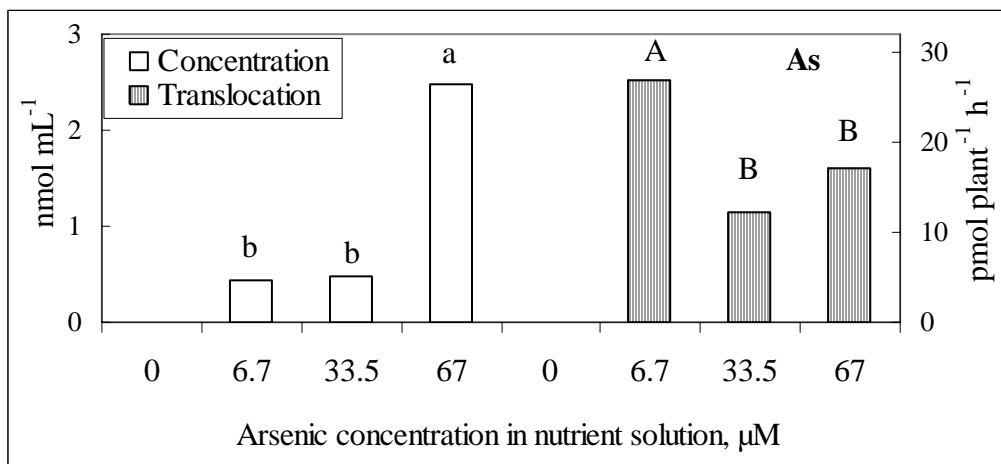


図3 培地のヒ素濃度と導管液のヒ素の濃度、地上部への移行量との関係

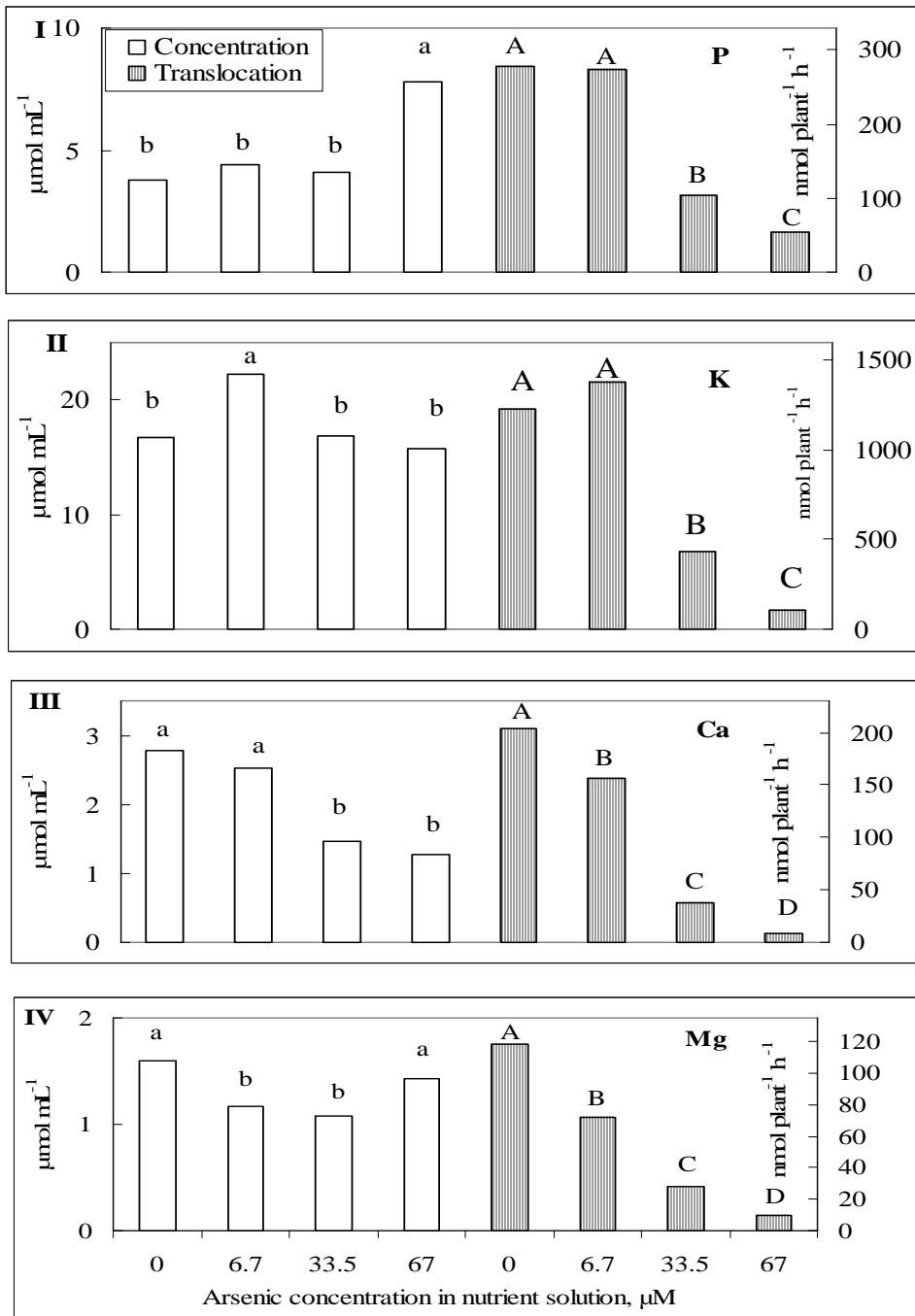


図4 培地のヒ素濃度と多量必須元素の導管液中の濃度 (Concentration), 地上部への移行量 (Translocation) との関係

I ; P, II ; K, III ; Ca, IV ; Mg 異なるアルファベットを付したデータは有意差があることを示す。

図4に植物の導管内の多量必須元素の濃度及び地上部への移行量と水耕培地のヒ素濃度との関係を示した。元素濃度に採取された導管液の体積を掛け算することにより元素の移行量が算定された。PやKのような生理的に重要で多量に必要な元素は導管液の濃度があまり大きく変化しないことが示された。しかし、移行する液量が減少するために、ヒ素濃度の上昇に伴いPとKの移行量が減少した。CaやMgについてもほぼ同様であり、ヒ素濃度の上昇に伴い元素移行量が減少した。

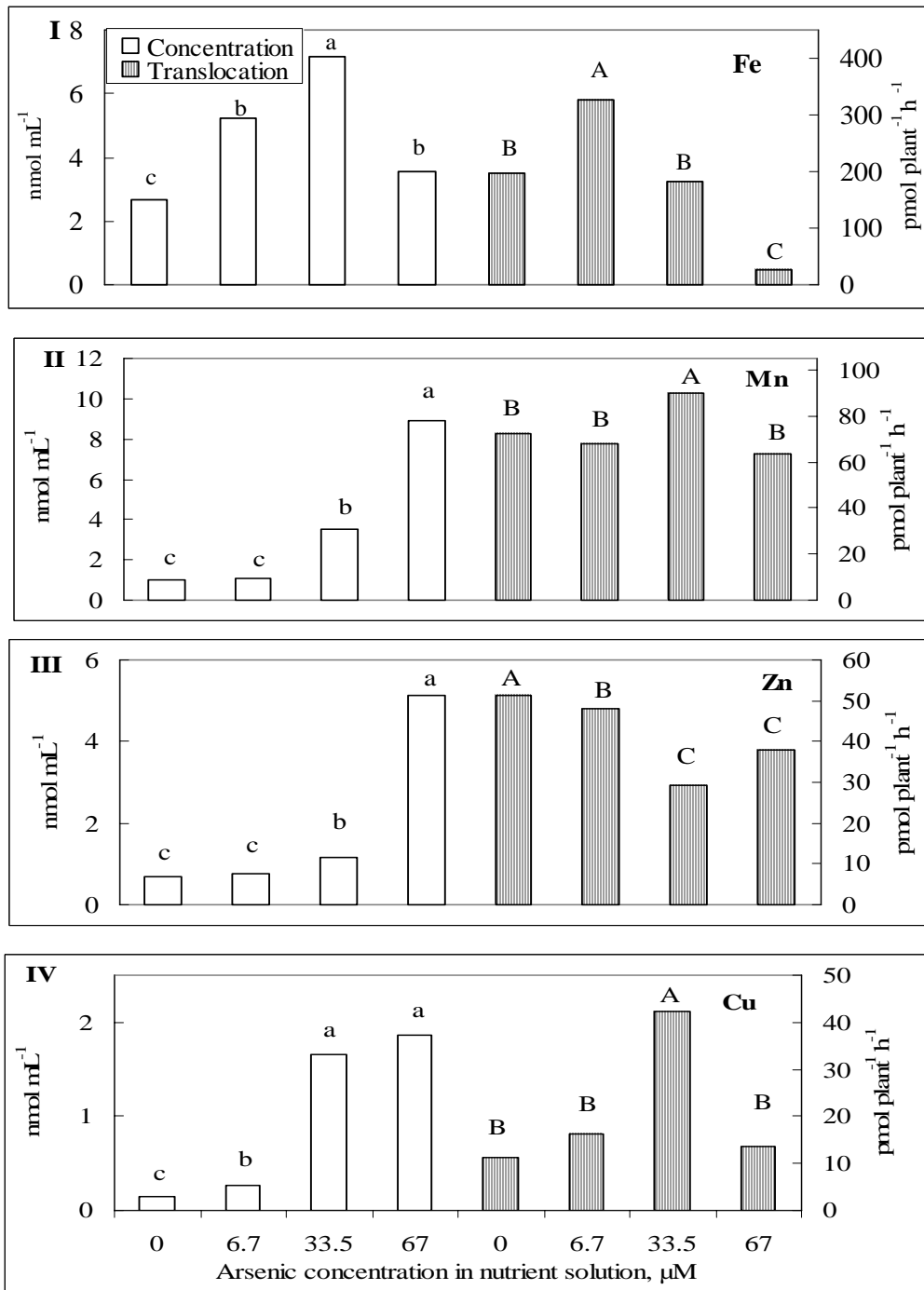


図5 培地のヒ素濃度と微量必須元素の導管液中の濃度，地上部への移行量との関係
 I ; Fe, II ; Mn, III ; Zn, IV ; Cu 異なるアルファベットを付したデータは有意差があることを示す。

図5に植物の微量必須元素の濃度及び地上部への移行量と水耕培地のヒ素濃度との関係を示した。Feの地上部への移行量がヒ素濃度の上昇に伴い減少している点がやや顕著である。Mnは大きな変化がなく，Znは33.5 μMを超えると減少が見られた。Cuについては，33.5 μMにおける増加が生理的意味のあるものであるか否かは不明である。

これらの結果を総合すると，培地のヒ素濃度の上昇に伴い現れたクロロシスはヒ素誘導 Fe 欠乏というべき症状であると考えられる。また，別の実験において，ヒ素濃度の上昇に伴い，地上部の Fe 含量は減少するが

根の Fe 含量は逆に上昇するという結果も得られており、ヒ素が Fe の地上部への移行を抑制する可能性がある。これまで、ヒ素が Fe 欠乏を誘導するとする論文は無いように思われる。なぜ、ヒ素が Fe の移行を抑えるのかという植物生理学的理由は現段階では不明である。おそらく、導管へ Fe を送りこむ過程にヒ素が影響を与えると考えられる。また、導管内を移行するヒ素の価数や、ヒ素が生体内でどのような形態で存在するかを検討も必要である。つまり、有機態のヒ素の形態も検討する必要があると考えられる。今後、ヒ素の地上部への移行については生化学的検討も含めて更なる検討が必要である。また、穀物ばかりでなく、野菜、果物、根菜などの食料へのヒ素の集積についてもデータを集める必要があると思われる。

謝辞

本研究を行うにあたり、PIXE の使用についてご助言いただきました日本アイソトープ協会の二ツ川章二さんに感謝申し上げます。また、(株)フジタの北島信行さん、菅原玲子さん、近藤敏仁さんにご助力いただきました。厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) Marschner, H. 1995. Long-distance transport in the xylem and phloem and its regulation, In Mineral Nutrition of Higher Plants. Ed. H. Marschner, p. 79-115, Academic Press, London, England.
- 2) White, M. C., A. M. Decker, and R. L. Chaney. 1981. Metal Complexation in Xylem Fluid. I. Chemical composition of tomato and soybean stem exudate. *Plant Physiology*, 67, 292-300.
- 3) Kochian, L. V. 1991. Mechanisms of micronutrient uptake and translocation in plants. In *Micronutrients in Agriculture*. Ed. J. J. Mortvedt, F. R. Cox, L. M. Shuman, and R. M. Welch, p. 229-296. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin.
- 4) Salim, M., and M.G. Pitman. 1984. Pressure-induced water and solute flow through plant roots. *Journal of Experimental Botany*, 35, 869-881.
- 5) Allen, S., J. A. Raven, and J. I. Sprent. 1988. The role of long-distance transport in intracellular pH regulation in *Phaseolus vulgaris* grown with ammonium or nitrate as nitrogen source, or nodulated. *Journal of Experimental Botany*, 39, 513-528.
- 6) van Beusichem, M. L., E. A. Kirkby, and R. Bass. 1998. Influence of nitrate and ammonium nutrition on the uptake, assimilation, and distribution of nutrients in *Ricinus communis*. *Plant Physiology*, 86, 914-921.
- 7) Cruz, C., S. H. Lips, and M. A. Martins-Loucao. 1993. Nitrogen assimilation and transport in carob plants. *Physiologia Plantarum*, 89, 524-531.
- 8) Engels, C., and H. Marschner. 1993. Influence of the form of nitrogen supply on root uptake and translocation of cations in the xylem exudate of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Experimental Botany*, 44, 1695-1701.
- 9) Jackson, M. B. 2002. Long-distance signaling from roots to shoots assessed. The flooding story. *Journal of Experimental Botany*, 53, 175-181.
- 10) Mader, J. C., C. G. N. Turnbull, and R. J. N. Emery. 2003. Transport and metabolism of xylem cytokinins during lateral bud release in decapitated chickpea (*Cicer arietinum*) seedlings. *Physiologia Plantarum*, 117, 118-129.
- 11) 串崎光男, 木内知美 1975. 灰化法, 栽培植物分析測定法, 養賢堂, 東京, p. 59-63.
- 12) 岡部達雄 1975. りん, 栽培植物分析測定法, 養賢堂, 東京, p. 69-73.
- 13) 山添文雄 1975. 原子吸光(分光)光度計, 栽培植物分析測定法, 養賢堂, 東京, p. 39-44.
- 14) Kawai, S., S. Kamei, Y. Matsuda, R. Ando, S. Kondo, A. Ishizawa, and S. Alam. 2001. Concentrations of iron and phytosiderophores in xylem sap of iron-deficient barley plants. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 47, 265-272.

Concentration of elements in xylem fluid of arsenic stressed barley seedlings grown hydroponically

S. R. Molla, J. Itoh^{*1} and S. Kawai^{*2}

The United Graduated School of Agricultural Sciences, Iwate University
3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan

^{*1}Takazawa Institute, Japan Radioisotope Association
348-1 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

^{*2}Faculty of Agriculture, Iwate University
3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan

Abstract

The inorganic solutes of the xylem fluid of Arsenic (As) stressed barley (*Hordeum vulgare* L. cv. Minorimugi) seedlings were elucidated. The plants treated with 0, 6.7, 33.5, and 67 μM As were grown in culture solution in a greenhouse under natural condition. The plants showed chlorosis symptoms at the highest As treatments at 14 days after treatments. The plants were harvested at 14 days after As treatment. The mineral concentration of the shoot and root were measured by atomic absorption spectrometry after being dried and digested by nitric-perchloric acid. Phosphate concentration of the plant materials were measured by ammonium vanadomolybdate method. The xylem fluids were collected from the cut surface of the stunts of the plants treated by As. The flow rate, concentration, and translocation of nutrient elements of xylem fluid were studied. Different volume flux rates were imposed by changing the concentration of As in the nutrient solutions. The concentration of elements was measured by PIXE in Nishina Memorial Cyclotron Center of Japan Radioisotope Association. Usually, As toxicity reduced the flow rate of xylem fluid of barley plants. Under As toxicity, the concentration of P, Fe, Mn, Zn, and Cu increased, while Ca concentration decreased in xylem fluid of barley at the 67 μM As treatment in the nutrient solution. Arsenic concentration increased but translocation decreased at the highest As treatment. In our experiment, we suggest that As may induce Fe deficiency in barley. However, more investigation is necessary for the conclusion. Furthermore, physiological mechanism for As to reduce Fe translocation needs to be investigated.