

ミネラル水の噴霧による農作物の収穫・ミネラル含量への影響

佐々木敏秋¹、世良耕一郎¹、後藤祥子²、細川貴子²、齊藤義弘²、松本義雄³

¹ 岩手医科大学医歯薬総合研究所高エネルギー医学研究部門（サイクロトロンセンター）
020-0603 岩手県滝沢市留が森 348-58

² 日本アイソトープ協会仁科記念サイクロトロンセンター
020-0603 岩手県滝沢市留が森 348-58

³ 総合研究所
329-3212 栃木県那須郡那須町大字富岡 1220-69

1 はじめに

近年、我国の農地はミネラル不足が加速する傾向にあり、それが農作物の収穫量・品質に影響を与えている。天然林の土壌において、ミネラル濃度は長期間一定値を保つことが予想される。葉が落ち腐葉土となり土に返り、水流とともに漏出する分は雨水から供給されるという循環機構が働いているからである^{1,2}。それに対し農地においては、農作物は収穫され土に返ることはなく、また近年の多くの農地は有機農法を行わず窒素・リン酸・カリウムのみを含む化学肥料のみが与えられている場合が多い。ミネラル不足の土壌で何回も収穫が繰り返される結果、農地のミネラル不足は加速し、それが農作物の生育や品質に悪影響を与えている^{1,2}。

肥料は通常、固形（粉末）か溶液の形で農作物に与えられる。前者の場合、肥料は水に溶解可給態となった後はじめて農作物に吸収される。そのため効果に即効性はない反面、持続性がある。それに対し溶液状の肥料は可給態であり、すぐに吸収され効果を発揮する。

当然予想されることながら、農作物中の元素濃度は植物の生育環境により大きく影響を受ける³。以上の観点から、農作物の収穫量・滋養はミネラルを多く含む水を投与することにより改善されることが期待される。現在の野菜の味と香りが、4～50年昔の野菜のそれらと比べ薄くなっている、と感じる人が多いという事実もミネラル不足と関係していると予想され、そのことから、ミネラル供給により野菜の収穫量のみならず品質も改善されることが期待される。

著者の一人（松本）は、阿武隈山地で採取される岩石（雲母鉱）からミネラルを抽出する工業的方法を開発し、それを農作物への肥料として製品化している。各地で収穫量の増加が報告されているが、今回我々は実際の農耕地において米・大豆を含む種々の農作物に対しミネラル水を散布し、収穫量の増加、ミネラル含量の変化、及び両者の関係を定量的に調べることにした。

2 実験方法

2.1 ミネラル水肥料

ミネラル水の商標は P.M-4000 であり、Fig. 1 に写真を示す。上述のように阿武隈山地で採取された雲母鉱石から、特殊な方法で抽出したものである。その元素成分を PIXE により分析した結果を Table 1 に示す。原液であるため元素濃度が非常に高く特に鉄濃度が高いため、測定時には通常の 500 μm Mylar 吸収体に加え後述の「特殊吸収体」も用いられた。亜鉛 (Z=30) より重い元素濃度は、特殊吸収体を用いた測定により得られたものである。表に示すように、硫黄、カリウム、チタン、鉄濃度が高く、その他マグネシウム、カルシウム、銅、亜鉛、ルビジウムなどの必須元素濃度も高い。一方、有害元素に関してはクロム、鉛が若干高いものの砒素、水銀などは検出限界値以下であった。発癌や動脈硬化を防ぐ効能が知られているセレン⁴は検出されなかったが、他の重元素濃度が高い影響で検出限界値が高かったこと、またセレンは僅かな摂取で効能を発揮することから大きな問題ではないと考えられる。注目すべきは、化学肥料に多く含まれ植物にとって三大栄養素であるリンが検出限界以下であった点である。そのため、植物の代謝活性のためには化学肥料との併用が効果的であると考えられるが、今回の実験はミネラル水のみでの投与に限定した。



Fig. 1. The mineral water: P.M-4000.

Table 1 Mineral contents of P.M-4000 (μg/mL)

Element (Atomic number)		Concentration (μg/mL)	Error (μg/mL)
Na	Sodium (11)	N.D.	—
Mg	Magnesium (12)	1050	33.2
Al	Aluminum (13)	1440	44.4
Si	Silicon (14)	8.9	5.8
P	Phosphorus (15)	N.D.	—
S	Sulfur (16)	23300	704
Cl	Chlorine (17)	N.D.	—
K	Potassium (19)	1960	60.3
Ca	Calcium (20)	106	8.9
Ti	Titanium (22)	1150	60.3
Cr	Chromium (24)	18.9	6.9
Mn	Manganese (25)	121	12.3
Fe	Iron (26)	13900	42.3
Cu	Copper (29)	0.466	0.46
Zn	Zinc (30)	18.5	1.3
Ga	Gallium (31)	1.31	0.36
As	Arsenic (33)	N.D.	—
Se	Selenium (34)	N.D.	—
Rb	Rubidium (37)	21	1.5
Sr	Strontium (38)	3.54	0.35
Hg	Mercury (80)	N.D.	—
Pb	Lead (82)	2.26	1.3

2.2 ミネラル水散布法

実験は岩手県八幡平市の農地において、2007年4月から9月の期間にわたり行われた。散布法は以下のとおりである。まず原液を水で4000倍に希釈し攪拌する。次にその希釈液を噴霧器で農作物の葉に直接散布する。散布は2週間ごとに数ヶ月にわたり行われた。今回の一連の実験を行うのに、Fig. 1のミネラル水1瓶で十分であった。

Fig. 2にはミネラル水散布の効果を表す写真を示す。農作物は大豆であり、同一条件の農地の右半分のみミネラル水散布を行ったものである。ミネラル水投与の成長速度に与える影響が顕著に現れている。同様な効果がその他の多くの農作物に認められた。味の変化についての定量的評価は難しいが、多くの農作物に対し収穫量の増加と味の改善が認められた。

2.3 農作物とその採取

実験は7種の農作物(米・とうもろこし・アスパラガス・アマランス・そば・大豆・フキ)に対し行われた。それらの名称と学名をTable 2に示す。元素濃度に関しては、ミネラル水投与

と非投与の場合の比較を行った。また、米・そば・アマランス・大豆に関しては、収穫量に関して同様の比較を行った。試料採取はミネラル水投与開始後（農作物の成長速度に応じて）2～3ヵ月後に行われた。

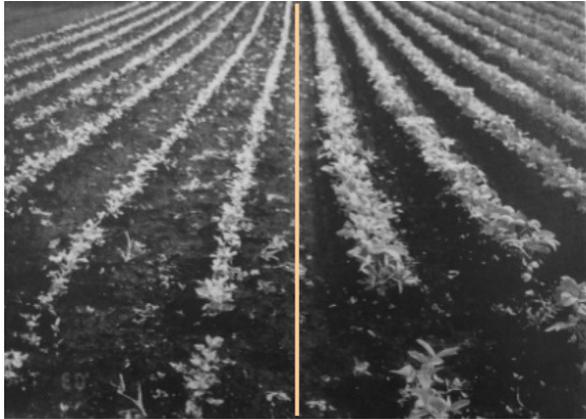


Fig. 2. Photograph of a soy-bean field, where mineral water was sprayed onto the ground in the right half of the field. The effect of spraying mineral water on growth can be clearly recognized.

Table 2. Farm products

No.	Farm products	Scientific name
1	Rice	<i>Oryza sativa</i>
2	Corn	<i>Zea mays</i>
3	Asparagus	<i>Asparagus</i>
4	Amaranth	<i>Amaranthus</i>
5	Buckwheat	<i>Fagopyrum esculentum</i>
6	Soybeans	<i>Glycine max</i>
7	Butterbur	<i>Petasites japonicus</i>

2.4 試料調製

採取された農作物は水で良く洗い、最後に蒸留水でゆすいだ後、感熱滅菌機中で 105°C を保ち 2～3 時間乾燥させた。乾燥試料は秤量後、硝酸灰化—内部標準法⁵により処理された。内部標準として In が 1000 ppm になるよう加えられ、4 μm prolene バックリング膜上に 5 μL を滴下乾燥後ターゲットとした。

2.5 照射・測定条件

島津製作所小型サイクロトロンより引き出された 2.9 MeV の陽子ビームは、2 組の三連 Q magnet、steering magnet などでその位置・形状を調整され、真空散乱槽に導入される。ビーム径はグラファイトコリメータにより決定され、今回の実験では 6 mm ϕ で照射された。発生した X 線は、2 台の Si (Li) 検出器により同時に測定される⁶。検出器 1 には 500 μm Mylar 膜の X 線吸収体が装着され、K、Ca から重元素までの測定が行われ重元素の測定を行い、検出器 2 には計数率を調整するためのグラファイト製 X 線コリメータ (1.5 mm ϕ) が装着され、Na～Ca までの軽元素測定が行われた。P.M-4000 原液に対しては“特殊吸収体⁷”も重元素測定用に用いられた。平均的ビーム電流及び測定時間は 60 nA、5～8 分であった。典型的スペクトルは、以前に報告を行った農作物試料とほぼ同様である¹。

3 結果

3.1 農作物の成長速度

我々はミネラル水投与・非投与農作物の、根・茎・葉の成長速度の観察も試みた。しかし根に関しては、米以外の農作物の場合観察が困難であった。Fig. 3-a, b には、米の根と穂の成長の比較を示す。いずれも右側の写真がミネラル水投与、左側はミネラル水非投与であり、それ以外は同一条件下で育てられた稲である。ミネラル水投与米の穂は、長さ・厚みにおいて非投与のものとは比べ良好に成長している。最終的に収穫量が 3 倍と著しい効果が示されたが、詳細は後述する。

一方根の成長への効果も、3-b の図から明確である。2005 年に栃木県那須町で行われた実験栽培の結果はさらに顕著でありそれを Fig. 3-c に示す。穂、根ともに著しい効果を示しているが、ミネラル投与米は、この根の成長の効果で一本も倒れなかった。近年の稲は収穫間近の台風などの風により倒れやすく、それが収穫量ばかりではなく米の品質に大きな影響を与えている。また、化学肥料を多く与えるほど倒れ易くなることが知られている。しかしミネラル水投与効果により根が広く張り、強風にも耐える強い生命力を持つ稲が育つことが確認された。

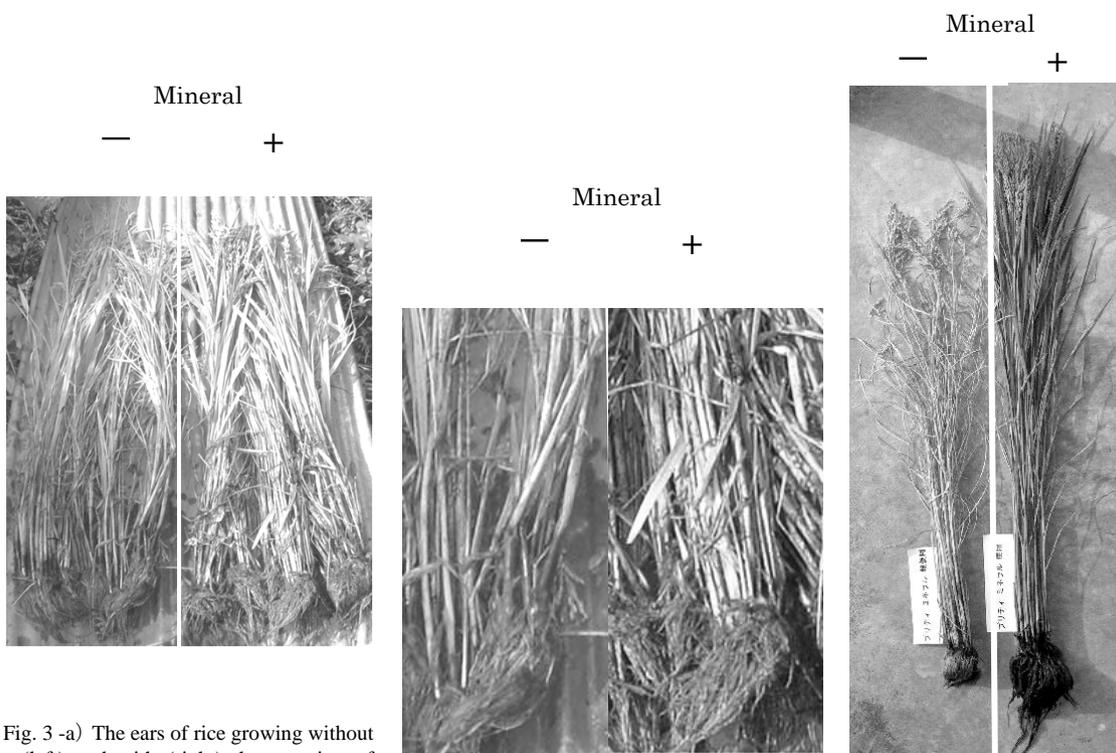


Fig. 3 -a) The ears of rice growing without (left) and with (right) the spraying of mineral water.

Fig. 3 -b) Enlarged images of the roots in Fig. 3-a). The rice plants shown in Figs. 3-a) and 3-b) were cultivated in Iwate Prefecture in 2007.

Fig. 3 -c) The ears and roots of rice growing in farmland in Tochigi Prefecture in 2005..

Fig. 4-a, b には、そばの成長速度の比較を示す。種を蒔いてから 3 週間後に撮影したものであり、b に対しては発芽後 2 回 2 週間間隔でミネラル水散布を行い、a に対しては同様に普通の水の散布を行った。土壌の質、日照の条件はほぼ同一であった。そばの場合も栃木で栽培した大豆同様、ミネラル水投与効果が顕著に現れていることが確認された。

3.2 農作物中のミネラル濃度

Fig. 5 a-c には米の各部に含まれる元素濃度を示す。それぞれ、a: 収穫後の茎、b: 葉、c: 精米後の白米である。Fig. 5 b に見られるように、葉中の元素濃度、特にマグネシウム、リン、硫黄、カリウム、カルシウム、ヴァナジウム、マンガン、鉄などの必須元素濃度が、ミネラル水散布効果により大きく増加している。しかし茎と白米に関しては明確な元素濃度の上昇は見られなかった。特に食料となる白米には元素濃度の観点からは明確な効果は見られなかったが、それは以下のように解釈することができる。現在の日本人はほぼ白米のみを食すため、本研究においては白米の分析を行った。しかしミネラルは主に糠に存在するため、ミネラル水散布効果は玄米中に認められることが期待される。

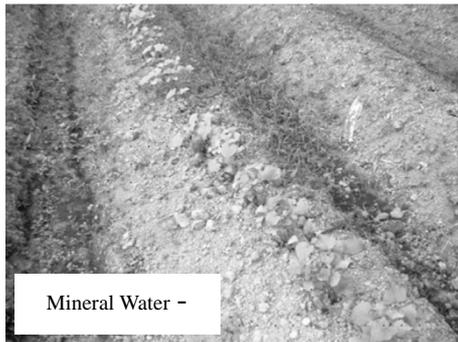


Fig. 4 -a) Photograph of the state of growth of buckwheat in a field where three weeks had passed since the seeds had been sown.

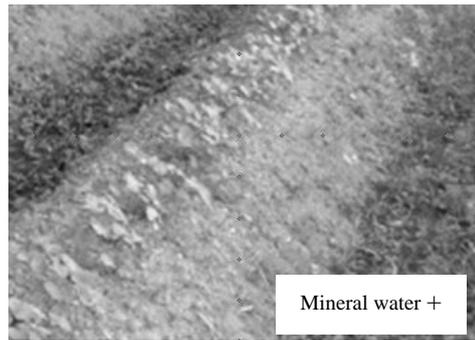
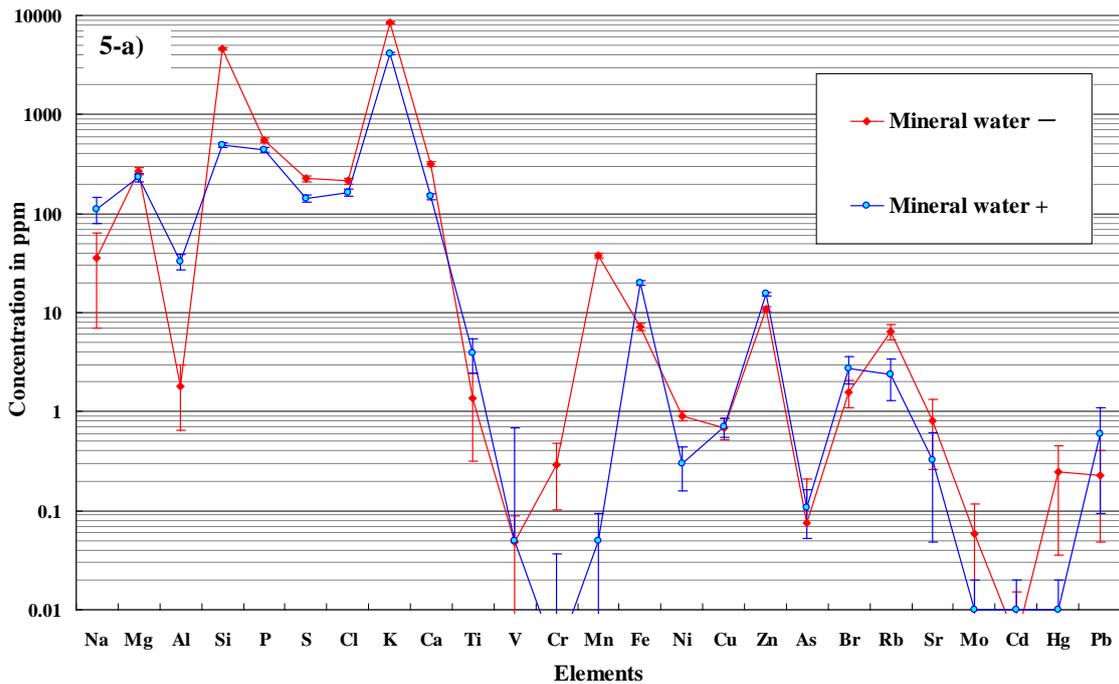


Fig. 4 -b) Same as Fig. 4-a) but mineral water had been sprayed twice.

Fig. 6 には同じ穂から採取された白米と玄米中の元素濃度の比較を示す。この稲は 2005 年栃木県での実験で得られたものであり、ミネラル水が投与されている。図から明らかなように、玄米中にはマグネシウム、リン、カリウム、カルシウム、マンガン、ニッケル、銅、セレン、臭素、ルビジウム、ストロンチウム、ニオブ、モリブデンなどの元素濃度が白米よりも多いことが分かる。このことからミネラル水散布効果は主に玄米中元素濃度に影響を与え、白米には反映されにくいことが推測される。玄米、あるいは白米と糠に分けての検討は、近い将来行う予定である。



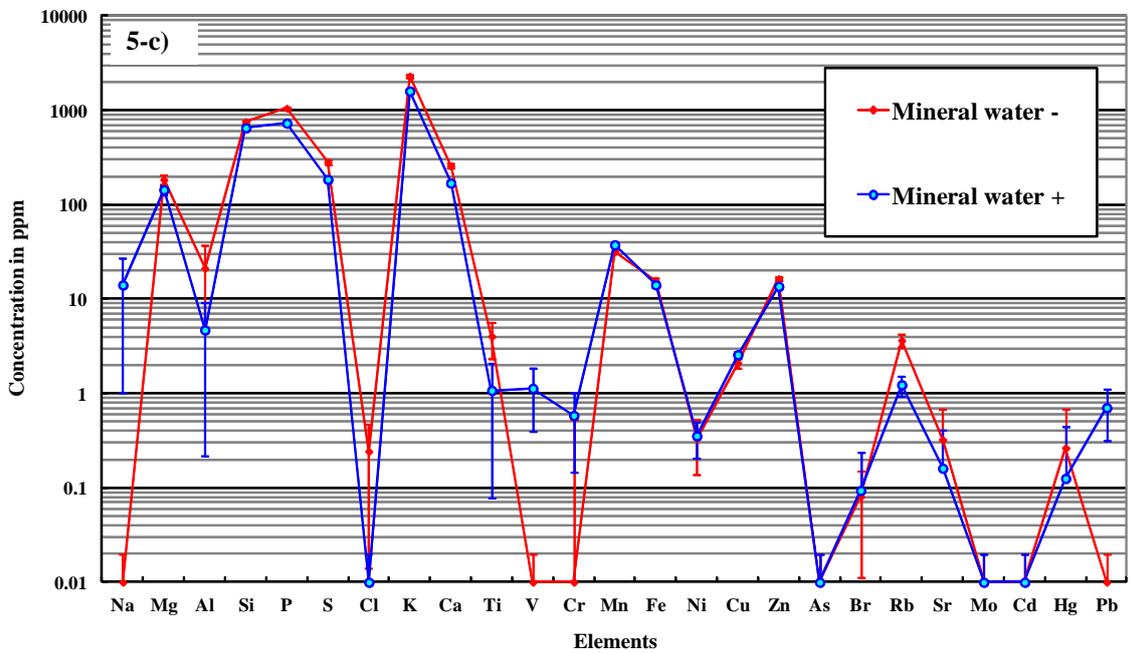
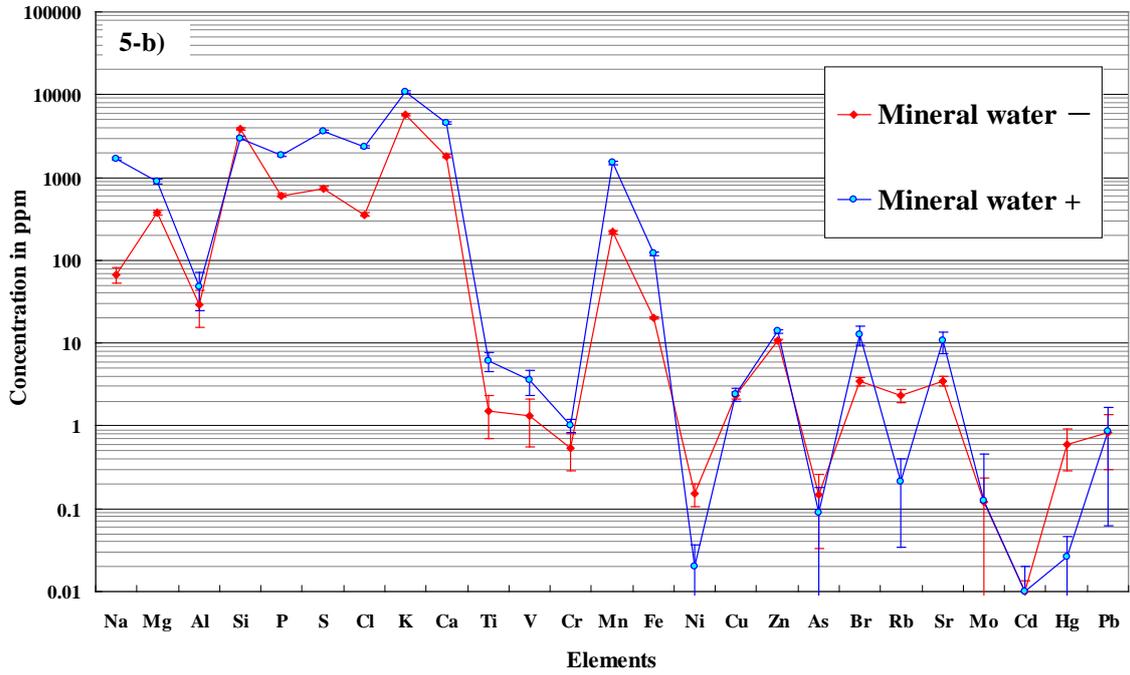


Fig. 5 Elemental concentrations in rice with and without spraying mineral water, where a, b and c show concentrations in haulm, leaf and grain, respectively.

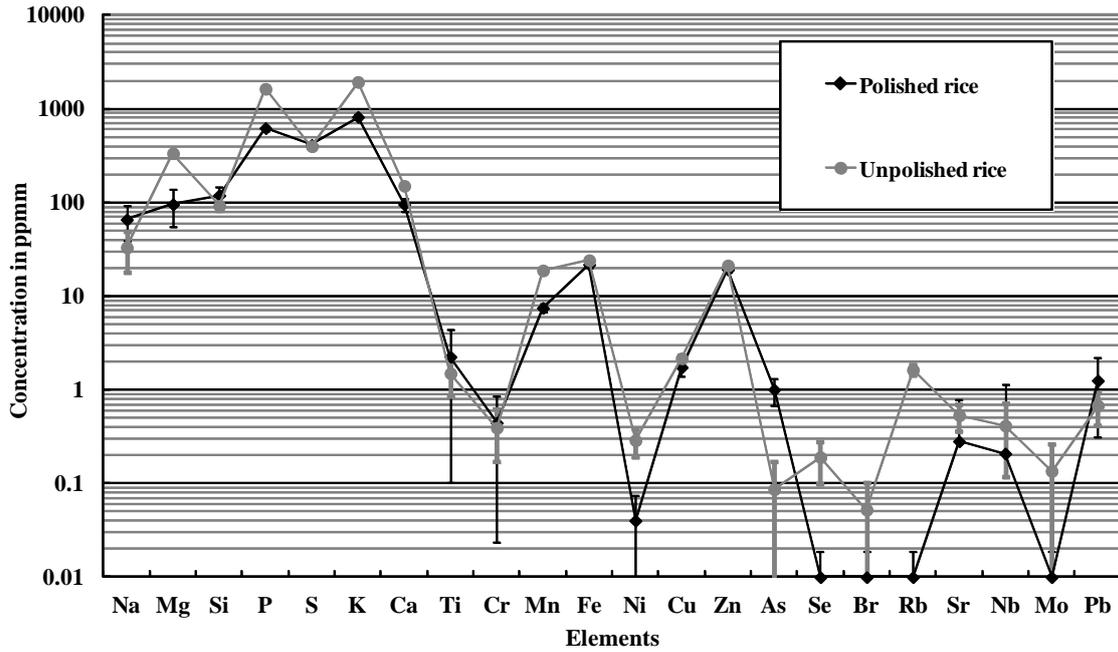
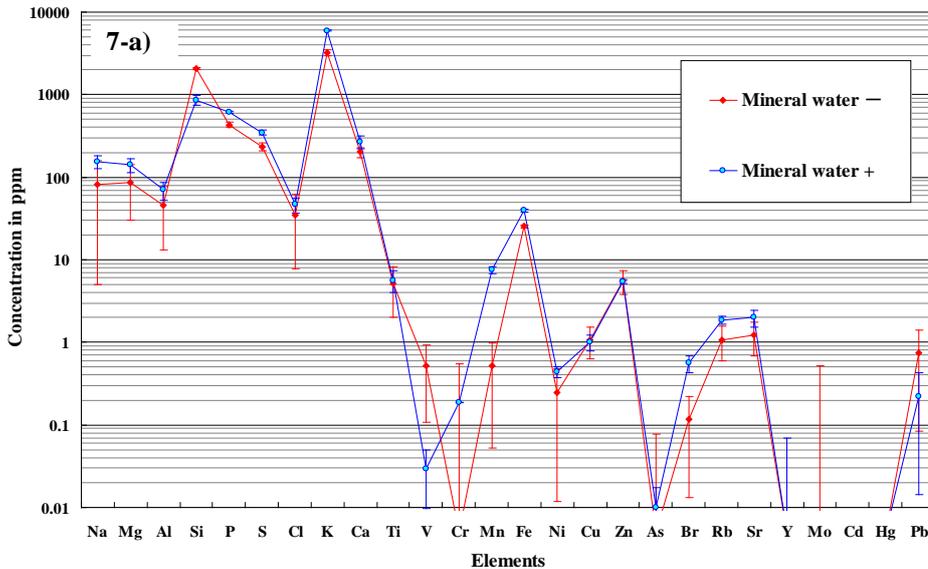


Fig. 6 Comparisons of elemental concentrations in unpolished and polished rice collected from the same ear growing in a field in Tochigi Prefecture, where mineral water was sprayed onto them.

Fig. 7には Fig. 5 と同様の比較をトウモロコシに対し行った結果を示す。茎と葉に関しては、ミネラル水投与によりリン、硫黄、カリウム、カルシウム、そして鉄濃度が上昇している。しかし可食部である実に関しては、明確な上昇は認められなかった。

Fig. 8にはアスパラガスの結果を示すが、多くの元素濃度にミネラル水投与の結果減少傾向が見られるという意外な結果となった。この原因は、試料採取時期が不適切だったためと考えられる。この試料は 7 月に収穫に合わせて採取された。この時期以降、アスパラガスは殆ど生長しないためである。多くの農作物は収穫の時期が近づくにつれて根に貯め始めることが知られており、根の方にミネラルが移行した可能性がある。その意味では、試料採取の時期が遅すぎたと言える。Fig. 9にはフキの結果を示すが、図に見られるように明確なミネラル含量の変化は認められない。



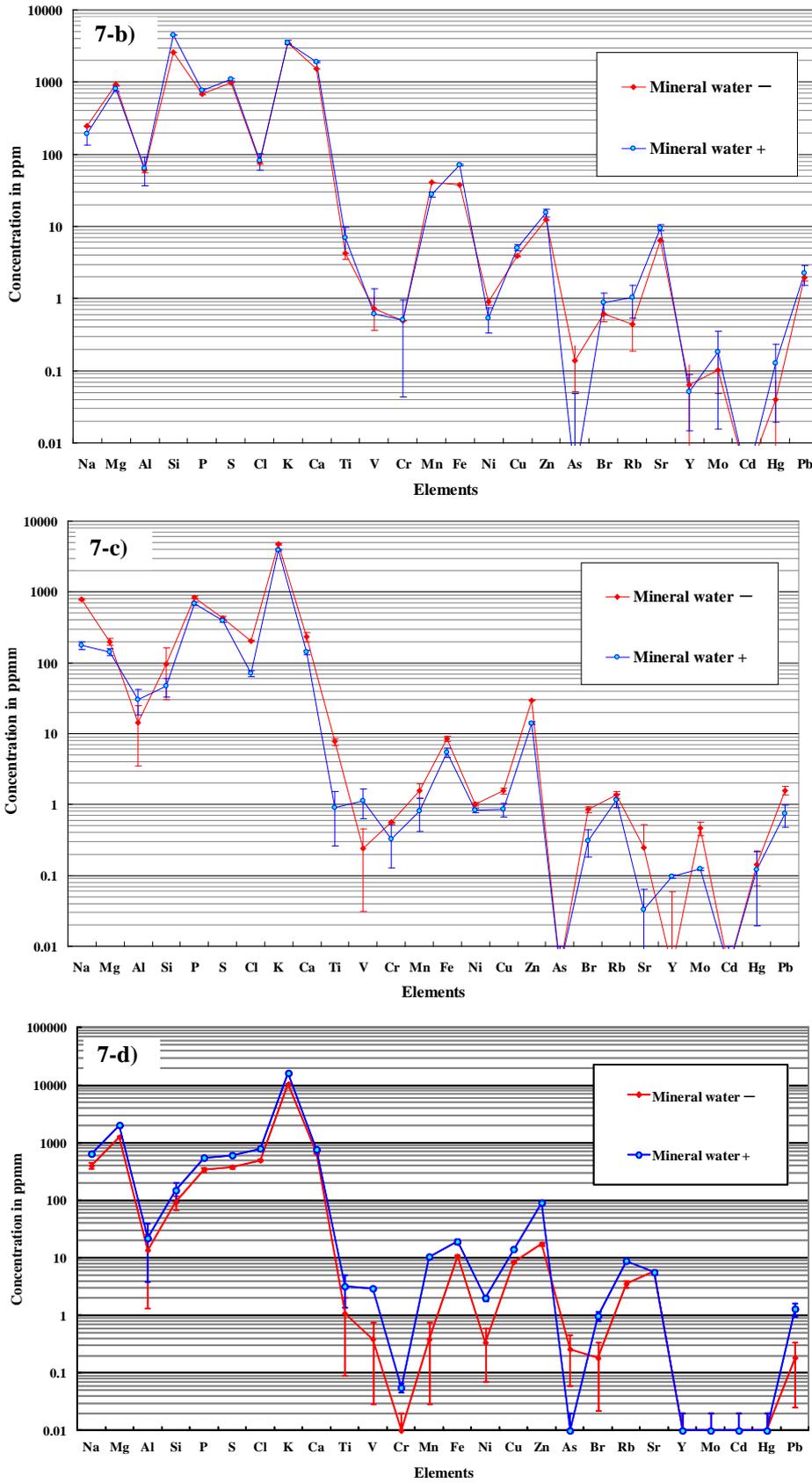
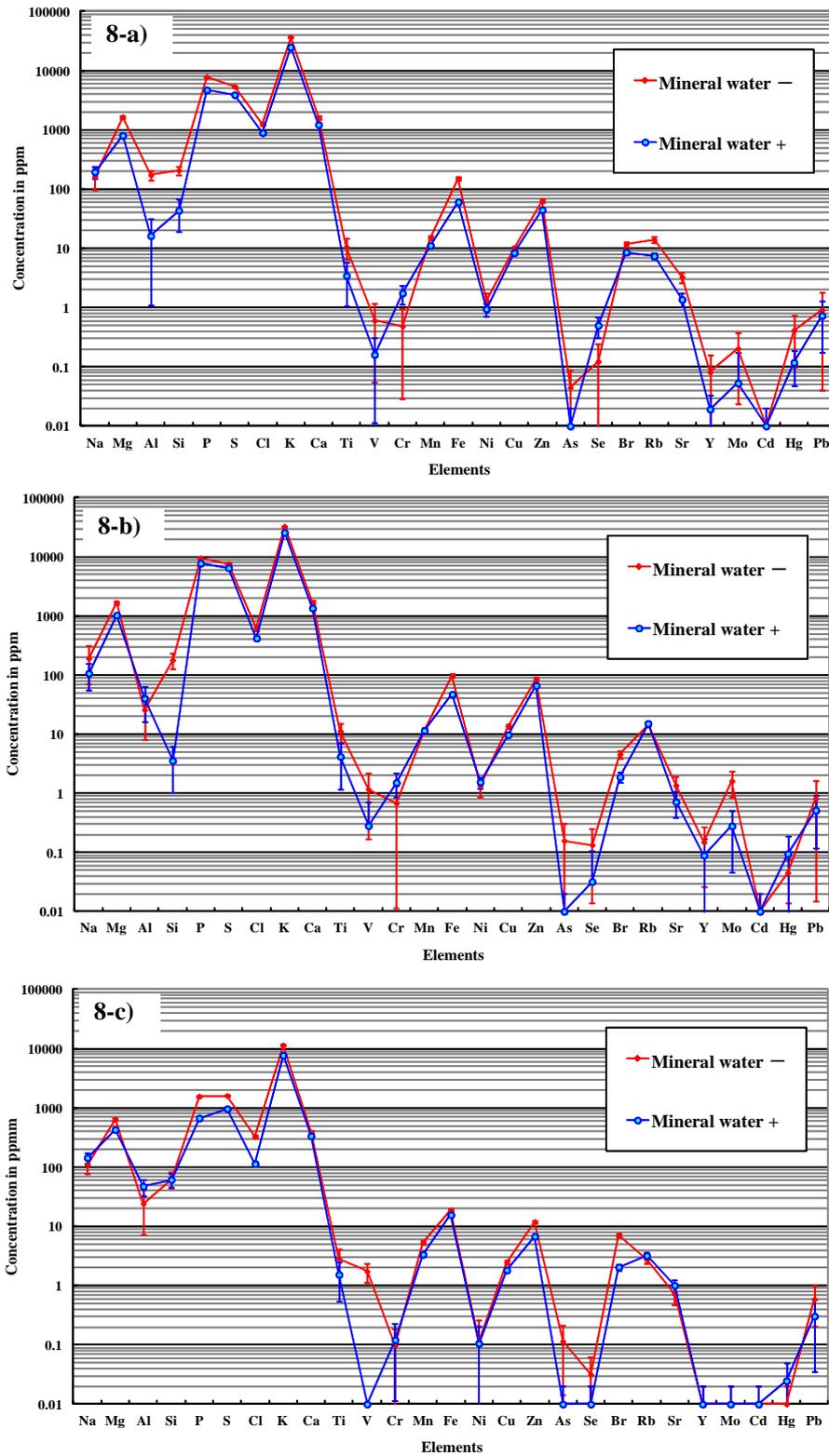
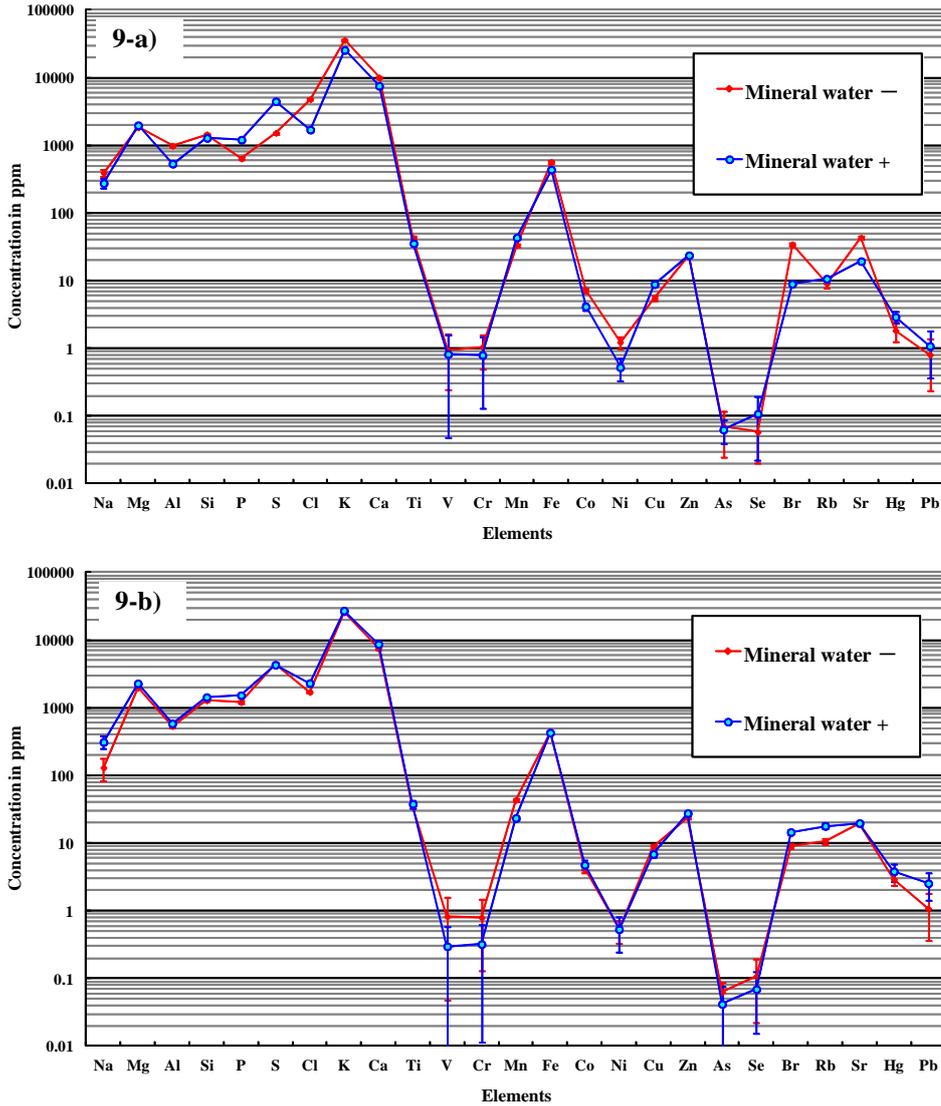


Fig. 7 Same as Fig. 5 but for each part of corn (a: haulm, b: leaf, c: grain, and d: flower bud).

一方アマランスの場合、茎と葉中のいくつかの必須元素濃度は明確に上昇したが、実中の元素濃度変化は見受けられなかった。そばに関しては茎・葉・実ともに顕著な変化は見られなかった。これらの図は省略する。



Figs. 8 Same as Figs. 7 but for asparagus. (a: stem, b: leaf and c: seed.)



Figs. 9 Same as Figs. 8 but for butterbur; (a: stem and b: leaf.)

3.3 農作物の収穫量

Fig. 10 には米の収穫量変化を写真で示す。2007 年八幡平市で栽培された米の、1 m²あたりの収穫である。左がミネラル水非散布、右が散布米であり、収穫量が飛躍的に増加したことが分かる。この場合も日照・土壌などの条件はほぼ同一である。米ばかりではなく、他の農作物にも Table 3 に示すように顕著な収穫量の増加が認められた。葉や茎を食するものに関しては、実際の可食部の選別がやや不明確であるため表には加えていないが、一見して明確な増加が観測された。表には秤量が容易な実を食するもののみが載せられているが、トウモロコシに関しては、収穫直前に野生のタヌキに食べられてしまい、計測できなかった。Table 3 に見られるように、米と大豆に関しては 3 から 4 倍以上の収穫量の増加が認められ、そば、アマランスについても 50% 以上の増加となった。

4 議論

リンは農作物の三大栄養素の一つでありその成長に大きな影響を与えることが知られている。しかし Table 1 に示すように P.M-4000 には含まれていない。収穫量の増加や根の張り方に見ら

れるように、必須ミネラルの補給により植物の代謝が促進されることが分かる。しかしリンの不足は農作物の成長や滋養には負の影響を与えることも予想される。本研究においては、ミネラル水散布効果のみを見るため化学肥料の併用は行わなかったが、今後は次に述べる知見からも併用を考えていきたい。

我々は大気 PIXE による「生きた植物中の元素濃度短時間変化の観測法」を開発し^{8,9}、条件を変えて測定を行った。その結果、照射に伴うアポトーシス発生機序に関係すると思われる多元素濃度変化が観測されたが、同一植物に対し水のみを与えた場合変化のなかった Mn、Cu、Zn などの濃度が、窒素・リン酸・カリを含むハイポネックス（栄養剤）を投与したところ大幅な上昇を見せた。これらの元素は SOD（Super Oxide Dismutase）の活性中心であることが知られており、照射に伴う SOD の酵素活動が三大栄養素投与により活性化した可能性を示唆している。このことから、ミネラル水に加え化学肥料を用いることによりさらに大きな効果が観察されることも期待される。

可食部のミネラル含量に大きな変化が見られなかった理由については、以下のような解釈も可能である。Table 3 にみられるように、米、大豆をはじめ多くの農作物の収穫量が格段に増えている。ミネラル濃度が変わらず収穫量が数倍になったということは、トータルのミネラル量としては数倍になっていることになり、ミネラル水投与の効果は十分にあったと断定できる。

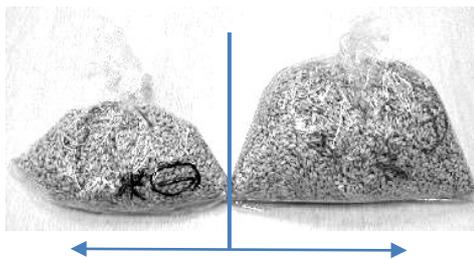


Fig. 10 Photographs showing total amounts of rice per 1 m² without (left) and with (right) the spraying mineral of water.

Table 3. The effects of spraying mineral water on the yield. The yields per 1 m² are shown in grams.

Farm products	PM-4000 (no use)	PM-4000 (use)
Buckwheat	300	500
Soy beans	850	3500
Amaranth	100	150
Rice	222.9	667.7

5 結論と今後の展望

Table 1 に示すようにミネラル水 P.M-4000 には高濃度のミネラルが含まれており、それが農作物の成長に大きな効果をもたらすことが証明された。またこれらのミネラルは酵素活動を通して植物の代謝を促進させ、それによりミネラル摂取をさらに促すことが期待される。

収穫量の観点からは、Fig. 10 と Table 3 に示すように農作物によっては 4 倍以上の収穫量となるなど画期的な効果が認められた。この研究を進めれば、世界的な食糧危機を解決する糸口がつかめるかもしれない。

農作物中の元素濃度の観点からは、多くの農作物が増加傾向を示し、ミネラル水が可給態と

して農作物中に吸収されていることが確認できた。しかしアスパラガスのようにむしろ減少傾向を示したものもあった。今回は葉への散布のみ試みしたが、今後は土への散布など、個々の農作物に応じ最適な投与方法を検討していきたい。しかし上述のように、全ミネラル量としては確実に上昇しており、ミネラル水投与効果は現段階でも明確に認められたと言える。農作物中必須元素濃度に関しては、それを食する人々の健康にも関わる問題であり、毛髪分析による体内元素濃度変化の観察なども合わせて、健康食品の観点からも農作物収穫量増加・品質向上のための開発を手がけていきたい。

PIXE法は本研究の目的には最適な分析法であり、Na以上の全元素を同時に測定可能であり、また植物の各部位のみならず、生育環境中の水・土壌などに加え投与する肥料など、あらゆる試料中の元素濃度を分析できる。さらに我々の方法^{8,9}により植物中の元素動態の観測も可能であり、今後その方法を用い、より効果的なミネラル水散布方法を検討する予定である。このようにPIXEの農学分野への応用は、将来に向けてますます発展可能な有力な分野と期待される。

謝辞

NMCC共同利用の運営に携わる他の日本アイソトープ協会仁科記念サイクロトロンセンター及び岩手医科大学サイクロトロンセンターのスタッフの方々に謝意を表します。

参考文献

1. J. Itoh, Y. Saitoh, S. Futatsugawa and K. Sera, "Elemental Analysis of Vegetables on the market. -Comparison with wild plants-", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.16, No.3, 4 209-220 (2006)
2. J. Itoh, Y. Saitoh, S. Futatsugawa, K. Ishii, and K. Sera, "Elemental Analysis of Edible Plants in natural Environment. -Trace elements in wild plants-" *Int'l Journal of PIXE* Vol.17, No.2, 3, 119-127 (2007)
3. 吉村親、赤澤典子、佐川了、駒木玲子、世良耕一郎、伊藤じゅん、"大豆及びほうれん草のミネラル含量の変動について", NMCC共同利用研究成果報文集, 第13巻, 186-190, (2005)
4. 棚山巖、伊藤伸彦、江尻剛、社領聡、古川義宣、二ツ川章二、世良耕一郎、"リンパ腫と食餌中Se含量に関する研究(第一報)", NMCC共同利用研究成果報文集, 第2巻, 175-178 (1994)
5. S. Futatsugawa, S. Hatakeyama, Y. Saitoh, and K. Sera, "Present Status of NMCC and Sample Preparation Method of Bio-Samples.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 3-4, 319-328 (1993)
二ツ川章二、畠山智、斉藤義弘、世良耕一郎、"PIXE試料調整法の検討", NMCC共同利用研究成果報文集, 第一巻, 70-81 (1993)
6. K. Sera, T. Yanagisawa, H. Tsunoda, S. Futatsugawa et al., "Bio-PIXE at the Takizawa Facility (Bio-PIXE with a Baby Cyclotron)", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.2, No.3 325-330 (1992).
7. K. Sera and S. Futatsugawa, "Effects of X-ray Absorbers Designed for Some Samples in PIXE Analyses.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 5-2,3, 181-193 (1995)
8. K. Sera, S. Goto, C. Takahashi and Y. Saitoh, "Movement of Light Elements in Living Plants by Means of a Standard-free method in In-air PIXE", *Int'l Journal of PIXE*, Vol. 23-3,4, 77-91 (2014)
9. K. Sera, K. Terasaki, T. Sasaki, S. Goto, C. Takahashi, and Y. Saitoh, "Movement of Heavy Elements in Plants by Means of a Standard-free Method for Living Plants in In-Air PIXE.", *Int'l Journal of PIXE*, Vol.22-1-2, 149-155, (2012)

Effects of spraying mineral water onto farm products on their growth and nutrition

T. Sasaki¹, K. Sera¹, S. Goto², T. Hosokawa², Y. Saitoh² and Y. Matsumoto³

¹Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

²Nishina Memorial Cyclotron Center, Japan Radioisotope Association
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0603, Japan

³General Research Center
1220-69 Oaza Tomioka, Nasu-chou, Nasu-gun, Tochigi 329-3212, Japan

Abstract

The effects of spraying mineral water onto agricultural crops on their yields and mineral contents were examined. We sprayed a solution containing a large quantity of essential minerals onto the leaves of various agricultural crops every other week for a few months. The mineral concentrations in the agricultural crops and of the sprayed solution were measured by PIXE(Particle Induced X-ray Emission). It was found that the effect of spraying mineral water on the crops was remarkable, especially for rice and soy-beans, for which the yields became nearly three times higher and the concentrations of many essential minerals increased in their stems and leaves. However, no clear increase in the mineral contents was observed for polished rice. In addition, not all of the farm products showed positive effects. This indicates that an effective method and timing of spraying mineral water should be examined depending on the conditions of each individual agricultural crop.