

[原著論文]

佐渡海洋深層水の稲作への利用

伊藤直子、山崎貴子、岩森 大、堀田康雄*、村山篤子

キーワード：海洋深層水、亜鉛、農業利用、ミネラルの強化、米

Use of deep-sea water to agriculture application to rice

Naoko Ito, Takako Yamazaki, Hajime Iwamori, Yasuo Hotta, Atsuko Murayama

Deep-sea water pumped up from 350 meters deep off of Sado island has been utilized for drinking, preparation of food and therapeutic spas for years but other applications can now be expected. One of them is use in agriculture. In this paper, we would like to suggest the use of deep-sea water for growing rice and using zinc solution to fortify rice grains to create higher nutritional value. In use of mineral rich deep-sea water, the absence of cadmium accumulation in both soil and plants should be proven. Our study indicated the absence of cadmium accumulation but a stimulation of growth and stiffness of plants are evident. A stimulating effects and in increase of zinc content from deep-sea water have been observed in several investigations supporting this effect on rice. The taste of rice grown with deep-sea water and zinc solution is as good as ordinal commercially available rice for both young and old.

Zinc content in our soil is rather low and fortification with zinc in food materials is recommended for health, especially for some patients with anemia. Zinc chloride for Sado deep-sea water to rice plants via irrigation may contribute to regional nutrition and health promotion. Also, this deep-sea water can be used to nurture rice paddies, when small animals proliferate and these can be insure to feed Toki birds (*Nipponia nipon*) in the wild. In laboratory experiments, we have demonstrated that the use of both diluted deep-sea water in place of desalinated water and zinc solution for irrigation of rice paddies increase the harvest of rice and fortify rice grain fwith zinc without altering of the taste. We will briefly discuss the function of zinc in foods.

Keyword : deep-sea water, zinc, agricultural application, fortification of mineral, rice

和文要旨

佐渡海洋深層水を水田で葉面散布することで、カドミウム (Cd) が土壌や米粒に蓄積される事は無く、稲の生長・穂丈の強化と米の甘味増加が見られた。プランターで1/20 希釈深層水又は1mM 塩化亜鉛水溶液を用いて栽培すると、米の収量が増加し、米粒中の亜鉛含量が増加し、亜鉛強化米として健康に役立つ。また海洋深層水の利活用の一翼となる。

緒言

佐渡海洋深層水は、佐渡市畑野松ヶ崎海岸より2キロメートル、水深約320メートルより採取し、飲料、食品、

魚介類の飼育、健康浴などに使われている清浄な海水である。しかし、工業及び農業分野で海洋深層水を利用する事により、更なる大量使用が期待される。本研究では農業への利用を考え、植物食材の栄養価の増加と環境保全に貢献する可能性を検討した。我国の土壌の亜鉛含量は全般的に低く、従って食材や飼料となる植物体の亜鉛含量が低い。多くの無機イオンの他に、亜鉛を比較的多く含む佐渡の海洋深層水¹⁾の供給で食材の亜鉛含量を高め、飼料を通して、酪農製品・鶏卵の栄養価を高める可能性を示唆した。環境保全の面からは、佐渡のトキの繁殖と野生化に必要な稲作水田と水田で育つ昆虫、タニシ、小魚の生育のために、自然の湧き水以上に豊かにする事ができる可能性を考え、海

*新潟医療福祉大学 健康栄養学科

[連絡先] 〒950-3198 新潟市島見町1398
TEL/FAX : 025-257-4423

洋深層水を利用する事を企画し、佐渡海洋深層水利用の安全性を調査した。通常の土壌分析では深層水から検出されないが、大量の深層水を撒布することで、カドミウムの土壌への濃縮と蓄積、その土壌に生育した稲とその米粒への蓄積、更に、トキの餌となる生物体への影響があるかどうかを調べるため、定量分析を行った。結果、深層水の大量利用によってどの地域にもカドミウムの濃縮や蓄積は見られず、佐渡の海洋深層水利用の安全性が示された。一方、我国の土壌は世界のほかの地域に比較して、亜鉛含量が低い傾向があり、そこから収穫される植物性食材、それらや牧草を食する動物性食材、特にミルクの亜鉛濃度は低いようである。佐渡海洋深層水は他の海洋深層水に比べて亜鉛含量が高いので、これの撒布によって食材の亜鉛含量を高めることに成功した。実験室試験により、希釈深層水原液、1 mM 亜鉛液を給水することで、水田で示されたのと同じく、茎が丈夫になり、米粒の増収が示された。調理した米粒の味は、水道水で育てたものと同等であった。従って、佐渡海洋深層水の利用が稲作に効果のあることが示され、それに付随する社会への貢献が期待できる。

試料と方法：

稲はコシヒカリ (*Oryza sativaum Japonica cvar. Koshihikari*) を材料とした。

試験水田は佐渡市片野尾、小田信氏所有の 8,000 方米を使用した。この試験田は山の頂上近くにあり、傾斜地を使った棚田形式である。水田の上は灌木林であり、灌漑水はこの山林から流れ出る小川より取水し、水田を満たし、下方に設けた排水口より、下の水田または小川に流れ出る。土壌試料は、田起し前 (4月)、稲生育時 (6月)、降雪前 (12月) の 3 回、灌漑水の取水口、流出口、田の中央部 2 箇所、計 4 箇所と、対照田 (深層水撒布を行わない隣接水田) 取水口、排水口、中央部の計 3 箇所より、約 20kg = 30 × 30 × 30cm を採取し、乾燥後、カドミウムを中心に無機イオン分析を行った。

土壌 (土と水と種々のイオンが混在) の pH は pH メーター (島津) を使用して測定した。

撒布した佐渡の海洋深層水は、取水ステーション (佐渡市多田) より運搬し、田植え前に 350 リットル / 10 アールを撒布し、6 月中旬と下旬の稲生育中に 60 倍希釈した深層水 約 250 リットルを葉面に 2 回撒布した。対照田には、灌漑用水を撒布した。土壌の金属イオン分析は ICP 発光分析法で定量した (新潟県環境地質科学研究所)。

実験室試験の場合、稲は同じ品種のコシヒカリ (北越農事より提供) を使用し、50 × 20 × 30 (cm) のプランターに、水田の土壌を満たし、6 株ずつ移植した苗を用いた。灌水は、佐渡海洋深層水の原液を 1/20 に希釈したもの、1 mM ZnCl₂ (水道水希釈)、水道水を使用、3 プランターを 1 グループとして、ほぼ野外に等しい状況で生育させた。

容器中の水量は付近の水田耕作にしたがって水抜きなどを行って調節した。更に、別の 3 コの容器には佐渡市片野尾の水田の土壌を入れ、稲の生長中に深層水原水を 6 月から 8 月にかけて、2 週間間隔で 100 ml を 5 回、イネに葉上撒布した。収穫した稲は一週間室温で放置乾燥したのち、籾を分離した。籾は一穂用籾摺器 (パーレスト藤原製作所・東京) で玄米として、亜鉛の定量分析を ICP 発光分析 / 原子吸光度法で行い、乾燥重量は減圧加熱乾燥法で測定した (日本食品分析センター)。

結果および考察：

1. 海洋深層水、亜鉛水 (1 mM ZnCl₂) による成長促進と亜鉛含量の増加

海洋深層水 (原液) は食塩を多量に含むため、原液を稲に与えれば稲は生長せず、塩害により間もなく枯死する。また、脱塩深層水を使用すると、稲の生育は順調であるがコスト高で大量使用の場合には適さない。原水を 1/10、1/20、1/50 に希釈して予備実験を行った結果、1/20 希釈が連続供与しても塩害などが現れず良い生長を示した。1/10 希釈では、稲の生長を抑え塩害の兆候が見られた。但し、実験は屋外で行われたので、1/20 希釈の場合でも、降雨による希釈 (2005 年の新潟市の降雨は平年並み) を考慮せねばならない。降雨による希釈効果を考えると、1/10 希釈は勿論 1/20 希釈でも、塩害の出現には注意を要する。特に、農地などで、原水を使用する場合は、降雨量を考慮に入れ、撒布回数と間隔に注意する必要がある。

佐渡海洋深層水の亜鉛濃度は、春・秋を通じて、0.03mg /liter で安定し、他の無機イオンと比較して高く、日本の他の地域で採取されている海洋深層水に比べても高い傾向がある¹⁾。

佐渡の海洋深層水は生物・有機的な汚染を含め、環境汚染物質が含まれていないか、極端に少なく、清浄度が高く、農業への大量利用に関する安全性に信頼がおける。

試験田の土壌の亜鉛含量は乾燥土壌 1 キログラム当たり約 6 mg であり、深層水撒布では変化がなかった (表 1)。即ち、深層水撒布で、土壌への亜鉛の蓄積は起こらなかった。土壌への亜鉛の蓄積は見られなかったが、深層水撒布区の稲は、目測観察で対照に比べて稲茎は強靱であった。生産性の増加に関しては正確な計測は行われなかったが、マイナス効果は観測されず米粒の増産が目測できた (米作農家の観察)。

試験では、1/20 希釈佐渡海洋深層水で育成した稲の生長は対照に比べて良好であり、収穫できた米粒の量は多く、玄米中の亜鉛含量がやや増加した (表 3)。

収穫した玄米を、炊飯器で炊いた後、成人 (年齢 25 才から 70 才までに分布) 10 人による評価試食をし

た結果、全員が味と食感（テクスチャー）について、水道水で育てた対照との差、市販米との差を認識することは出来なかった。一般に食される精米の亜鉛含量測定と味の測定は今後の問題として残されたが、食品成分表²⁾から、玄米と7分搗き米・精米の間に亜鉛含量は20%以下の減少しか見られないので、亜鉛は主に米粒の胚や糠ではなく、胚乳に存在すると考えられる。即ち、高亜鉛強化米として食することができる。

2. 試験水田の土壤中に含まれるカドミウムと金属イオン

1) カドミウムは、生体に毒性を示すイオンであり、環境汚染物質でもあるので、海洋深層水を撒布したり、灌漑に使ったときのカドミウムの水田土壌、ひいては稲や米粒への蓄積が無い事は証明されねばならない（同じ海水でも表層水の利用は、微生物を含む生物汚染と無機イオンの汚染があり得るので注意が必要である）。本試験では、カドミウムの存在が通常の方法では殆ど検出されていない深層水が撒布された時に起こる稲へのカドミウムの蓄積を測定した。

試験水田の取水口、排水口を含む3箇所より土壌を3回（田植え前、稲刈り時、田起し時）採取を行った。対照は隣接した水田で、海洋深層水の撒布を行わなかった水田の取水口と中央部より採取した土壌を用いた。結果は、試験田の土壌にも、佐渡深層水を撒布した後でも、土壌にカドミウムが高濃度で存在せずまた撒布後も蓄積することは

なかった。寧ろ、撒布区も対象区も、4月から翌年2月にかけて、土壌中のカドミウムの濃度は減少している（表1）。

また、この水田で生産される米にもカドミウムの蓄積も見られなかった（表2）。この稲の米粒が何かの障害を受けたためにカドミウムの減少が起こったのではないことは、亜鉛含量が殆ど変化していないか、寧ろ増加している事から推測できる（表2）。寧ろ海洋深層水にはカドミウムが検出限度以下¹⁾にしか含まれていないと考えるべきであろう。また、深層水撒布によって土壌中のカドミウムの含量は低下する（表2）事から、水田内の生物のカドミウム含量が増えることはあり得ないと考える。即ち、深層水を撒布された稲から取れる米は、少なくともカドミウム汚染を受けておらず、食用として安全であり、更に、その水田中に生息するトキの餌となる小動物にもカドミウムは存在しないと予想できる。

酵母のカドミウム耐性遺伝子 *ycf1* を導入したイロイヌナズナ (*Arabidopsis*) が、多種類の重金属に耐性となると同時に塩耐性を付与する事が示されている³⁾。YCF1 は細胞質の中で食塩 (NaCl) を液胞に移送する力を増加させる事により細胞質内の NaCl 濃度を下げ、結果として耐塩性をあたえる。この遺伝子をイネに組み込む事で、カドミウム耐性と同時に耐塩性の二つの特性を獲得し、海洋深層水の利用効果を高める事も可能である。カドミウム毒性を持たなければ、イネの細

表1. 試験田土壌の無機イオン含量の変化

		平成 17 年 4 月	平成 17 年 6 月	平成 18 年 2 月
カドミウム	対照区	0.267 mg / kg	0.154 mg / kg	0.090 mg / kg
	実験区	0.212 mg / kg	0.118 mg / kg	0.072 mg / kg
カルシウム	対照区	2650 mg / kg	2673 mg / kg	2748 mg / kg
	実験区	1770 mg / kg	1758 mg / kg	1845 mg / kg
マグネシウム	対照区	599.5 mg / kg	583.0 mg / kg	478.8 mg / /kg
	実験区	528.3 mg / kg	535.6 mg / kg	467.4 mg / kg
カリウム	対照区	313.7 mg / kg	433.6 mg / kg	584.0 mg / kg
	実験区	484.8 mg / kg	501.8 mg / kg	615.0 mg / kg
ナトリウム	対照区	134.7 mg / kg	95.1 mg / kg	102.6 mg / kg
	実験区	154.5 mg / kg	107.4 mg / kg	142.5 mg / kg
亜鉛	対照区	7.63 mg / kg	6.03 mg / kg	na
	実験区	5.90 mg / kg	5.88 mg / kg	na
塩素	対照区	11mg / kg	56 mg / kg	10 mg / kg
	実験区	34 mg / kg	49 mg / kg	17 mg / kg
p H	対照区	5.9	5.6	5.7
	実験区	6.0	5.7	5.8

* 実験区は4点の平均値。対照区は3点の平均値。 偏差は±5%以下。

胞内には亜鉛、マグネシウム、カルシウムなどの必須金属イオンが貯えられ、米のもつ栄養価を高める事になる。

2) カドミウムと亜鉛以外の無機イオンの変化を測定した。水田土壌中の8種類のイオン含量とpHを実験開始前、中間の稲生育時と収穫後に測定した値を示した(表1)。対照区より撒布区の含量が低いものは、カドミウム、カルシウム、マグネシウム、亜鉛などの2価金属イオンであり、ナトリウムと塩素では撒布した土壌の方が高かった。これは海水中の食塩の影響と考えられる。他方、海水中に少ない2価イオンは、土壌に含まれるものに比べて低いため、土壌中の2価イオンが海水によって洗われて低くなったのであろうが、今後に残された問題である。

pHについては生長中間期に実験区で高くなっているが、稲の根又は、根の周辺や水田中の微生物から物質が放出された影響と思われる。変化はpHの差が0.2程度で、更なる理由の解析は必要であるものの、水田土壌のpHにはほとんど変化をもたらさないと結論した。

3. 海洋深層水並びに亜鉛の植物生長促進作用

雨の不足で起きる乾燥と塩害は、稲にとって主たる環境性障害である。これらのストレスに抵抗性を与える遺伝子とその制御機構が明らかになりつつある。中国のWuhanでSun-Hee Hongと共同研究者らは、NAM、ATAF、CUC(NAC)などの特異的転写因子が乾燥や塩耐性遺伝子を制御し、耐性に働く蛋白質を作り出している事を、「日本晴れ」(ジャポニカ米)を材料として解析し、これらの転写因子を導入した形質転換イネでは、乾燥や塩によるストレスの下で22-25%の増収をあげ、生長も十分であることを示した。これらのイネは乾燥塩害の無い条件では、光合成能、生長、米の収穫量に変化が無いことを示した⁴⁾。

表2. 試験田で収穫された玄米中のカドミウムと亜鉛

	カドミウム	亜鉛
深層水撒布	0.055 mg / kg	20.2 mg / kg
対照(無撒布)	0.221 mg / kg	19.2 mg / kg

表3. 実験室プランターで収穫された玄米の収量と亜鉛含量

	収穫玄米量	玄米の亜鉛含量
1/20 希釈深層水	188 g	20.2 mg / kg
1 mM ZnCl ₂	258 g	60.1 mg / kg
水道水	173 g	19.2 mg / kg

乾燥や塩、重金属などの環境ストレスは、体内に過酸化物の蓄積を誘導する。ストレス耐性をもつ植物は細胞内に抗酸化システムが組み込まれている。その一つがCSD1とCSD2と呼ばれる銅/亜鉛依存過酸化物除去酵素(Cu/Zn superoxide dismutase)である。この酵素の発現レベルは、mi398と呼ばれる小型RNA(micro-interference RNA)が制御していて、平常時は、CSD1,2の遺伝子が作り出す伝令RNA(mRNA)を切断して、酵素の生産を低く保っている。環境ストレスが起こると、mi398の生産が抑制され、CSD1,2が大量に生産され、ストレスで増えた過酸化物を除去する。環境ストレスに強い植物では、mi398抵抗性のCSD2をもつことから、mi398の制御を受けないようにする事で、塩害や乾燥に強い植物を得ることができる⁵⁾。

他方、海岸近くの農地で、台風などによる一時的浸水があった後には、塩害の可能性もあるが、逆に作物の生長が良く、産物の品質が上がる例が知られている。例えば、キャベツ、トマト、トウモロコシが通常より甘くなる。また小規模の野外研究で、海洋深層水を撒布する事で、丈夫で甘味の強いキャベツが生産され^{6) 7)}、牧草や枝豆の生長にも促進作用があることが示されている⁸⁾。コシヒカリに海洋深層水を5月下旬(田植え前)に反当り350リットルを撒布し、6月中旬に1/60希釈深層水を200リットル葉面撒布した結果、稲穂の茎、葉が硬くなり倒伏予防効果が見られ、米に甘味の増加が見られている⁹⁾。

今回の実験で、深層水撒布によって危惧された、カドミウムの蓄積は水田と米粒には起こらない事が証明され、他のイオン含量に関して水田中にふくまれる、2価イオンの低下、1価イオンの増加傾向が見られたが、何れの変化も、米の食材としての価値を変えるものとは考えられない。事

表4. 亜鉛含量の多い食材

食 品	mg / 100g
カキ(生)	13.2
ウシ 和牛肩赤肉(生)	4.9—5.7
乳用肥育牛肩赤肉(生)	4.5—6.6
第一胃(ゆで)	4.2
ラム 赤肉(生)	5.0
ヤギ 赤肉(生)	4.7
ホタテ貝(生)	2.7
いなご(つくだ煮)	3.2
そらまめ(乾)	4.6
えんどう(乾)	4.1
だいず(乾)	3.2
きなこ(脱皮大豆)	3.7

実、佐渡の水田で収穫された米の味は、対照に比べて甘味があつて良いという評価を受けている。

屋外プランター栽培の実験結果では 1/20 希釈深層水を与えた稲の玄米中のカドミウムの量は対照に比べて顕著に減少し、安全性が示された。一方、米の収量は顕著に増加した(表1)。単位重量あたりの亜鉛含量も多少増加していることから、深層水の利用は明らかな効果を示した。これらが、深層水中の亜鉛の作用によるものであるか否か十分な証明はない。然し、海洋深層水が稲作に利用できる事は事実である。

本実験で用いた塩化亜鉛 ($ZnCl_2$)、代用可能な酸化亜鉛 (ZnO) は、共に 1 キログラム 1 万円以下であり、1/10mM 溶液を 10 万リットル作成でき、1000-2000 アール又はそれ以上の水田に撒布する事が可能である。1/20 希釈深層水はより安価に農業に利用する事が可能である。

植物の生長分化/生殖(種子生産)に、亜鉛が重要な役割を果たしている事は、亜鉛の欠損が各種の遊離基の増加、光合成の低下と葉緑体の消失、生長ホルモンの減少、細胞膜の変動によるイオンチャンネルの低下、栄養吸収の低下が起こることから明らかである。然し、亜鉛が異常に高濃度になると害を及ぼす事もある。これらに関しては総説が参考になる¹⁰⁾。

4. 高亜鉛食の意義

市販の容器入り飲用海洋深層水は市販の飲用水と比較すると、マグネシウムは約 20 倍、カリウムは約 8 倍、亜鉛は約 50 倍多く含んでいる^{11), 11)}。日本の土壤の多くは、亜鉛含量が低く、従って野菜・果物などの植物中の亜鉛含量も少なく、それらを餌とする、動物から生産される牛乳・鶏卵などの食材の亜鉛含量も低い。食材中亜鉛を多く含むのはカキ、哺乳類(ウシ、豚、ラム、羊など)の肉や内臓(表4)であり、例外としていなご(昆虫)の佃煮が注目される。植物性食品では豆類に比較的多くの亜鉛が含まれている²⁾。亜鉛は多くの酵素に存在するイオンであり、zinc-finger protein と呼ばれる酵素の多くが核酸や蛋白の代謝、情報伝達の重要なメンバーであり、亜鉛の少しの不足でも代謝に重大な影響を及ぼす。

栄養性貧血が鉄の不足に起因する事はよく知られているが、この治療には鉄と共に亜鉛が投与された時に高い治癒率が得られている。従って、海洋深層水撒布で得られる高亜鉛含有の米は、健康に役立ち、深層水の撒布は稲茎を固くし倒伏を防ぐ為、収量を高める結果になる。現在未だ藁の利用は進んでいないが、倒伏や病虫害の無い藁は、エネルギー源として利用できる可能性がある。

以上、海洋深層水の農業への利用を考察した。

謝辞: 本研究の一部は新潟県産業想像機構 NICO (2003-4)、佐渡海洋深層水利用活用組合 (2005) の支援を受けてなされ

た。深く謝意を表します。

引用文献

- 1) 新潟県環境地質研究所:平成 12 年度 成分分析結果報告.(2004)
- 2) 文部科学省科学技術・学術審議会資源調査分科会:五訂増補日本食品標準成分表(2005)
- 3) Eun-Ji Koh et al.: Expression of yeast cadmium factor 1 (YCF1) confers salt tolerance to *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* 170: 534-541 (2005)
- 4) Sun-Hee Hong, John Bunge, Sun-Ok Jeon and Slava S. Epstein: Predicting microbial species richness. *Proceedings of the National Academy of Science, U.S.A* 103:117-122 (2006)
- 5) Ramanjulu Sunkar, Avnish Kapoor, and Jian-Kang Zhu: Posttranscriptional induction of two Cu/Zn superoxide dismutase genes in *Arabidopsis* is mediated by downregulation of mi398 and important for oxidative stress tolerance. *Plant Cell* 18: 2051-2065 (2006)
- 6) 金田雄二: 海洋深層水施用によるトマト栽培. 農耕と園芸 6 月号 (2004)
- 7) 鈴木智之: 神奈川県立平塚農業高校の実験 (未発表)
- 8) 小田 誠: 海洋深層水の農業への利用 片野尾とき米生産組合報告 (2004)
- 9) 伊藤直子, 山崎貴子, 岩森 大, 本間沙織, 川上未央, 堀田康雄, 村山篤子: 佐渡の海洋深層水の農業への活用 牧草と大豆と人参の場合. 新潟医療福祉学会誌 6: 000-xxx (2006)
- 10) Cakmak, Ismail: Transley review No.11: Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytol.* 146: 185-205 (2000)
- 11) 佐々木弘子 他: 容器入り飲用海洋深層水の性状について. *日本食生活学会誌* 15:202-209 (2004)