

塩類の起源に迫る

— 農地が汗をかくと塩を吹く —

久米 崇

（愛媛大学大学院農学研究科）

1. はじめに

乾燥地域の農地では、土の表面に真っ白な塩が吹くことがあります。これを塩類集積といいます。

土には様々な要因により多量に塩類を含んでいるものがあります。例えば、そもそもの地質に多量の塩類を含むことがあげられます。また、昔海底であった場所が土砂堆積などで陸地になった場合、土の中に多量の海水が閉じ込められ塩類が残存していることがあります。このように、土の中には歴史的な経緯によってさまざまな理由で塩類が存在しています。

塩類、特に塩化ナトリウムなどは、作物の大敵です。作物によって程度の差はありますが、塩化ナトリウムが土の中に多量に存在すると、多くの作物は枯れてしまいます。したがって、適切に農地の塩類を管理する必要があります。

その際に重要なのは、塩類の起源を明確にすることです。土の中の塩類がどこから来たのかがわかれば、どのような対策・管理をすればよいのかを考えやすくなります。そこで本稿では、安定同位体を用いて塩類の起源を推定する方法を紹介します。

2. 農地の塩類集積

農地の塩類集積はどのようにしておきるのでしょうか。私たちが真夏にスポーツをして大量に汗をかくと、黒い T シャツの背中に白く塩を吹くことがあります。農地でも同じことがおきます。

作物を育てるために人為的に農地に水を供給することを「かんがい」といいます。また、その水

をかんが水といいます。土の中に多量の塩類が存在している農地にかんがいをを行うと、かんがい水の中に塩類が溶けます。乾燥地のように激しく水が蒸発する農地では、塩類を溶解したかんがい水は、毛管現象により土の表面へ移動し蒸発していきます。その際、水は蒸発して大気中に霧散しますが、塩類は再結晶して土の表面に集積します。

このようにして、スポーツ後の T シャツのように、農地が汗をかく（水が蒸発する）と塩を吹く（塩類集積する）ことになるのです。

3. ストロンチウム安定同位体による塩類起源の推定

ここでは、ストロンチウム（以下、Sr）という重金属元素の安定同位体を用いて、海水起源の塩類がどの程度農地土壤に含まれているのかを推定することにします。

Sr には、複数の安定同位体があります。ここでは、質量数 87 と 86 の安定同位体の比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) (以下、Sr 同位体比) を用いることとします。その理由は、海水の Sr 同位体比は世界中どこの海から採取したものでも 0.70918 であることが分かっているからです。

大雑把ではありますが、ある水サンプル中における Sr のうち、海水起源の Sr が大半を占めていれば、その水サンプル中の塩類の主な起源は海水である（海水の影響を大きく受けている）と考えることができます。本稿では、このような考え方のもとで Sr 同位体比による塩類起源の解析を進めます。

4. 研究対象地域の概要

ここで紹介する研究成果 (Kume et al., 2010) は、総合地球環境学研究所プロジェクト「乾燥地域の農業生産システムに及ぼす地球温暖化の影響」において筆者が実施したものです。

このプロジェクトは、トルコ共和国のセイハン川流域 (図1) を対象として実施されました。流域の下流に位置するアダナ市周辺は大規模かんがい農地の開発が行われています (図2)。筆者は、このかんがい農地の上流から下流の水の流れと塩類の移動の観測・解析を担当しました。

対象とするかんがい地域は上流にダムを有し、セイハン川とかんがい水路を通じて農地へかんが



図1. トルコ共和国とセイハン川流域

いを行っています。ここでは、不要なかんがいを排除するための排水路が至るところに張り巡らされています。図2に示すように3つの灌漑ブロックがあり、それぞれに幹線排水路が設置され、排水は地中海に排出されます。下流域の土は塩類化の傾向を示しており塩類集積が認められていました。

5. 排水中の塩類の起源をみる

農地には人間活動によって水だけでなく様々な物質が供給されます。図3に示すように、排水路には、降水、肥料、農薬、かんがい水、地下水、そして場合によっては海水が浸入します。つまり排水は様々な起源から供給された塩類が混合した水ということになります。

対象地域には、先に述べたように幹線排水路が3つ設置されています。これらの排水路の末端における排水には、それぞれの排水ブロックからの排水が混合し、その特徴が色濃く反映されているはずで、混合理論を使って、それぞれの起源から供給された塩類の混合比を求めることで、塩類の起源を明らかにすることにします。

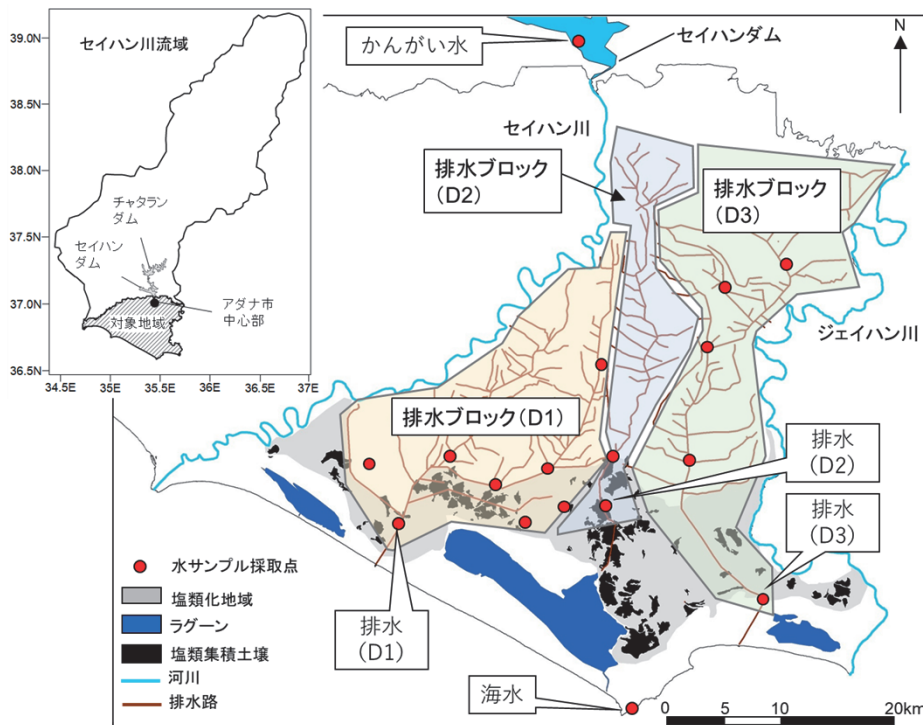


図2. 研究対象地域と各種サンプリング地点

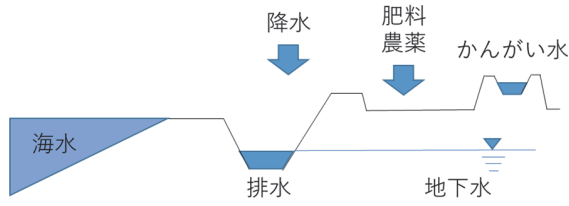


図 3. 農地におけるさまざまな水・物質起源

6. 主要な起源は何か

排水中にはさまざまな起源からもたらされた塩類が混合しています。そのすべてを対象とすることは難しく現実的ではありません。そこで、次の理由から3つの起源に注目をします。

まず一つ目は海水です。対象地域は、昔海面下にあり海水塩の影響を大きく受けているはずで、また、地中海沿岸部は、海水浸入を受けていることから海水塩は対象とするかんがい農地における主要な起源の一つと考えられます。

二つ目はかんがい水です。対象地域の農地には、春から夏にかけて大量のかんがい水が供給されます。かんがい水中の塩分濃度は低くても、それが大量になれば相当量の塩類が農地に供給されることになります。

そして三つめは肥料です。農地には大量の肥料が毎年投入されます。ここに含まれる塩類は相当な量であると推測されます。

7. 解析の方法

対象地域では春から夏にかけて大量のかんがい水が農地に供給されます。一方、秋から冬には供給されません。したがって、夏季と冬季では、排水に含まれる塩類の混合比が異なる可能性があります。そこで、ここでは夏季と冬季それぞれの混合比をみていきます。

まず、各種サンプルを室内に持ち帰り、Sr濃度とSr同位体比の測定を行います。そして図4、5に示すように海水、かんがい水、肥料そして3つの排水路（D1、D2、D3）から採取した排水のSr濃度の逆数とSr同位体比をプロットします。

図4、5に示すように夏季、冬季のいずれにお

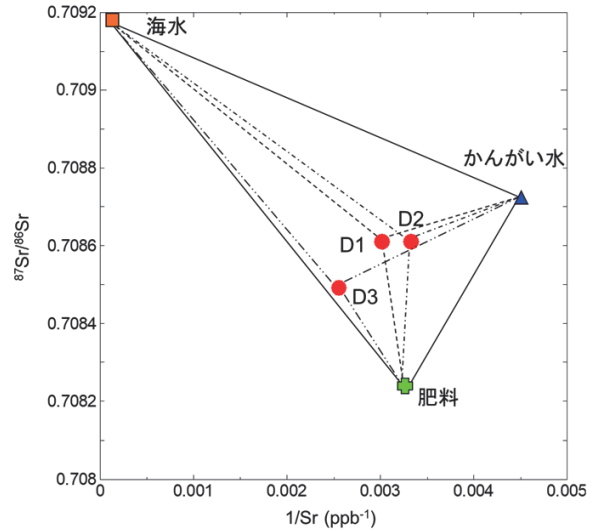


図 4. 各サンプルの Sr 同位体比と Sr 濃度（夏季）

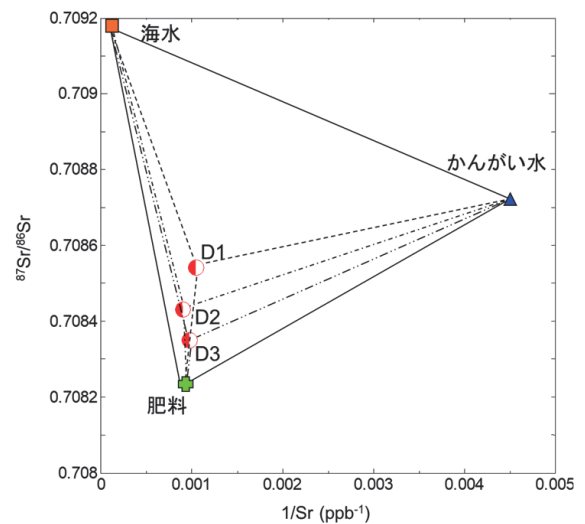


図 5. 各サンプルの Sr 同位体比と Sr 濃度（冬季）

いても、排水のプロットがすべて海水、かんがい水、肥料を結んだ三角形の中に入っています。このような場合、混合理論（Faure and Mensing, 2005）にもとづいた次の連立方程式を解くことで、海水、かんがい水、肥料それぞれから各排水に供給されたSrの混合比（割合）を計算することができます。

$$1 = f_{海} + f_{か} + f_{肥} \quad (1)$$

$$1/Sr_{排} = 1/Sr_{海} f_{海} + 1/Sr_{か} f_{か} + 1/Sr_{肥} f_{肥} \quad (2)$$

$$Sr_{比排} = Sr_{比海} f_{海} + Sr_{比か} f_{か} + Sr_{比肥} f_{肥} \quad (3)$$

ただし、 $f_{海}$, $f_{か}$, $f_{肥} < 1$

ここで、Sr 同位体比（Sr 比と表記）と $1/Sr$ (ppb^{-1}) はそれぞれ図 4、5 の縦軸と横軸に示した既知の測定値です。そして、添字の「海」、「か」、「肥」、「排」はそれぞれ、海水、かんがい水、肥料、排水を示します。 f は未知数であり、求めるそれぞれの混合比（割合）です。この連立方程式に夏季、冬季におけるサンプルの実測値を代入して計算を行いました。

8. 塩類の起源（＝混合比）の解析結果

図 6 は D1、D2、D3 それぞれの夏季における海水、かんがい水、肥料の混合比を示しています。D1 の排水中には、海水起源の Sr が 6%、肥料起源の Sr が 28%、そしてかんがい水起源の Sr が 66% 含まれていました。D2 と D3 の排水路には海水起源の Sr がそれぞれ 3%、2% 含まれていたことがわかります。

夏季は、上流のダムから供給されるかんがい水

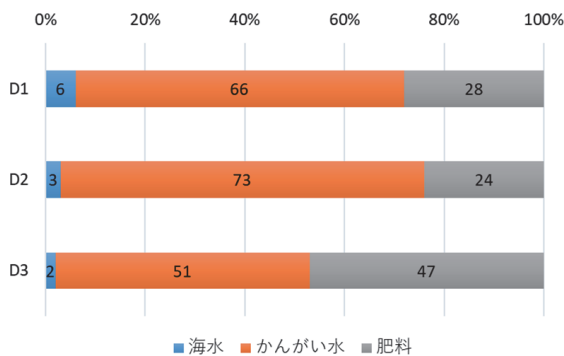


図 6. 各排水における塩類の混合比（夏季）

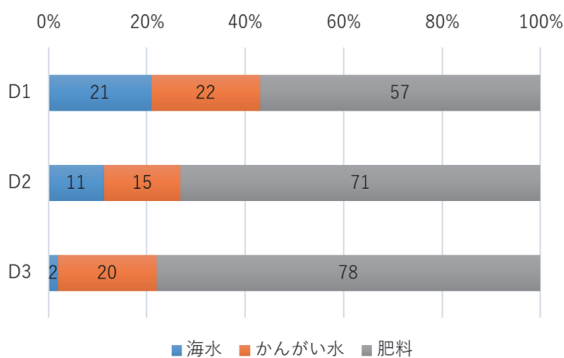


図 7. 各排水における塩類の混合比（冬季）

が多量なため、その中に含まれている Sr が農地から排水路に排水されていきます。その影響がとても大きいということになります。また、肥料も大量に農地に投入されます。肥料は、かんがい水によって溶解され不要な肥料分はやはり排水路に排水されます。このような理由から、夏季における混合比は、どの排水路でもかんがい水と肥料が大きな値を示したと考えられます。

次に、図 7 を見てみましょう。これは冬季における混合比です。夏季とは違って、それぞれの排水中に含まれる海水起源の Sr に明確な違いがみられました。D1 では排水中に含まれる海水起源の Sr は 21% でした。夏季は 6% でしたから 3 倍以上も増加したことになります。D2 も海水起源の Sr が 3% から 11% に増加していました。D3 は夏季と同じ 2% でした。

冬季における Sr の混合比の違いの原因は何でしょうか。それは、土の塩分濃度にあると考えられます。D1、D2 の排水路には、図 2 に示すように排水ブロック中に多くの塩類集積農地の存在（図中の黒く塗られている箇所）が認められます。一方、D3 の排水ブロックにはほとんど塩類集積農地が認められません。

夏季には、これら塩類集積農地から排出された塩類は大量のかんがい水によって希釈されるため海水の混合比は小さくなります。しかし、冬季はかんがい水による希釈がなくなるので、排出された塩分濃度が混合比にそのまま表れてくるのです。つまり、土は海水の影響を受けており、海水起源の塩類が排水路に排出されてくるのです。肥料の混合比が夏季に比べて冬季に大きくなるのも同様の理由です。

9. おわりに

本研究で示したように、塩類集積が発生している農地における海水塩の影響を Sr 同位体比と Sr 濃度を用いて解析することで定量的に明らかにすることができました。海水、かんがい水、肥料、そして排水にはそれぞれ固有の Sr 同位体比があ

り、それを質量分析器で測定することができます。

農地における複数の排水路から排水サンプルを採取し、その Sr 同位体比を測定するだけでも明確に異なる値が得られるはずで、それをもとにして、各農地の塩分起源の差異を簡便に診断することもできるでしょう。

さらに応用すれば、津波や台風などによって沿岸域農地に海水が被った際に、土中水や排水などの Sr 同位体比を測定することで、陸域における海水の影響評価を実施することができます。

この塩はどこから来たのだろうか。またどこへ行くのだろうか。そんな疑問に対して科学的に答えを示してくれる Sr 安定同位体比はとても魅力的なものだと思いませんか。

引用文献

Faure, G. and Mensing, T.M. Isotopes, Principles and applications (Third edition), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005

Takashi Kume, Erhan Akca, Takanori Nakano, Takanori Nagano, Selim Kapur and Tsugihiko Watanabe, 2010, Seasonal Changes of Fertilizer Impacts on Agricultural Drainage in a Salinized Area in Adana, Turkey, Science of the Total Environment, vol. 408, issue16, 3319-3326, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.028>

著者情報



久米 崇 (愛媛大学大学院農学研究科准教授) 2004 年京都大学大学院農学研究科博士後期課程修了、博士 (農学)。総合地球環境学研究所プロジェクト上級研究員、鳥取大学乾燥地研究センタープロジェクト研究員、総合地球環境学研究所プロジェクト上級研究員・特任准教授を経て、2012 年より現職。

(2021 年 3 月 31 日掲載)