

ナル湖周辺における水・土壌に含まれる塩分起源の推定

久米 崇

総合地球環境学研究所

中内 惇夫

岐阜県飛騨農林事務所農地整備課

遠藤 仁

総合地球環境学研究所

宮内 崇裕

千葉大学大学院理学研究科

J. S. カラクワル

ラージャスターン・ヴィディヤपीド大学考古学専攻

前杵 英明

広島大学大学院教育学研究科

長田 俊樹

総合地球環境学研究所

1 はじめに

人類は様々な環境に適応し、発展を遂げてきた。一方でそれは、環境に対して人間活動が影響を与えてきたことを意味している。近年の地球科学的な分析技術の発達により、たとえば安定同位体分析を用いることで物質起源を明らかにすることが可能になってきた。流域の表流水にはその流域の地質情報が含まれており、人為起源の塩分が混入すればその Sr 同位対比の値を変化させる (Faure and Mensing 2005)。このような分析により、現状での環境診断というのは広範囲な変数に対して高精度で可能になってきている。

一方、歴史的な検証のため過去の環境を復元するのは一部の同位体分析を用いることで可能ではあるが、未だその手法も精度も改良の余地がある。本稿で対象とするのは塩類であるが、その供給源は河川や地下水、土壌中の鉱物や残留塩、肥料など様々である。そして、これらの塩分が溶質となって水の移動により混合されるため、塩分起源にはその混合成分の特定が必要となる。このような分析にも安定同位体は有効である。

本研究は乾燥地であり塩類を多く含む土壌を有しているインド・グジャラート州ナル地方における灌漑農地を対象とした。ここでは、安定同位体と微量元素の分析からなる環境トレーサビリティ手法を用いて、まずは現状での水・塩分の起源・動態を明らかにしようとするものである。そして、それらの結果を踏まえて、過去の塩分起源やその動態を明らかにするためにはどのようなアプローチや取り組みが必要とされるのかという点について議論する。なお、本稿

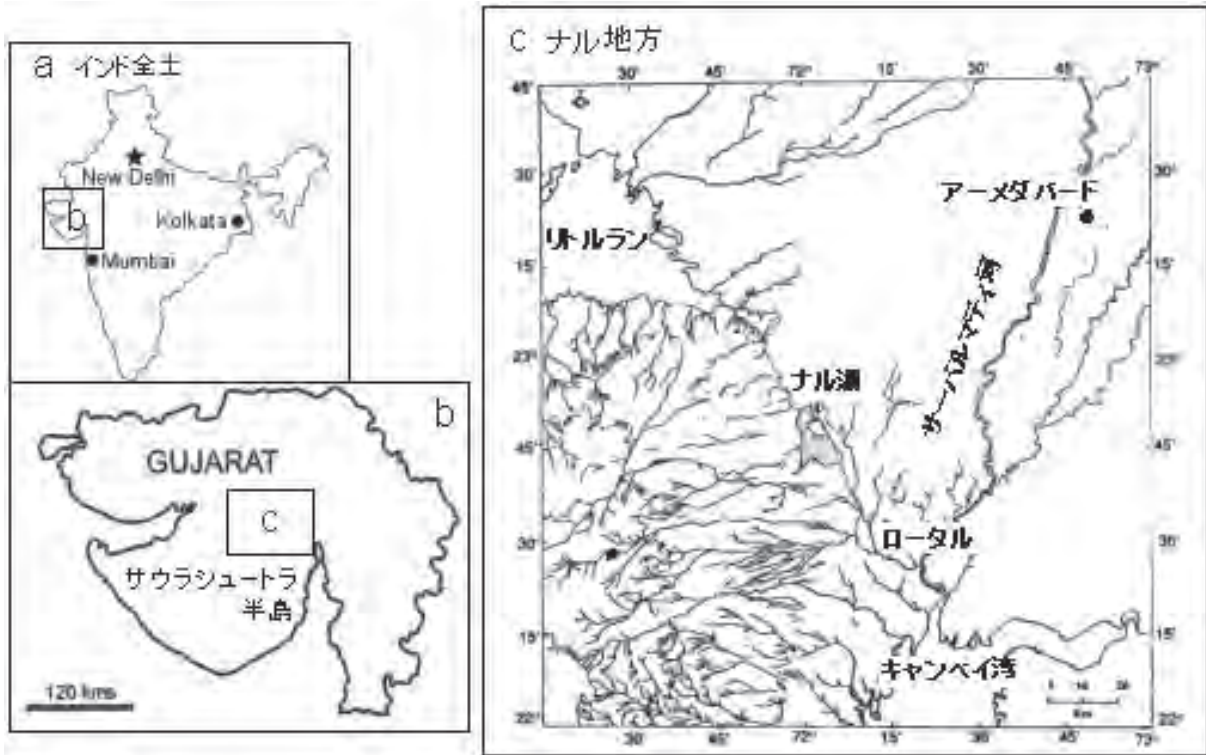


図1 ナル地方の流域図

では、未だ分析が終了していないサンプルがあることからすべての解析が終了していないため、結果の一部を報告するものとする。

2 調査地の概要（インド・グジャラート州ナル地方）

2.1 流域の概要

ナル地方は、グジャラート州中部のサウラシュートラ半島の付け根部分にあり、ナル湖を中心とした北部のリトルランとキャンベイ湾へと続く標高の低い地域である。ナル湖とリトルランの間には小さな丘があり、流域の境界となっている。この低地帯に東部と西部から河川が流入し、キャンベイ湾へと注ぐ流域を形成している。ナル地方の流域図を図1に示す。

ナル地方の年平均気温 27.5℃であり、年最高気温は 45℃、最低気温は 9℃と気温差が大きい。年平均降水量は約 800 mm でその大半がモンスーンによる降水によって供給される。そのため、この地方の河川は乾季になると流れの見られない季節河川がほとんどであり、モンスーン期の雨水・河川水を利用した稲作や綿花栽培が行われている。現在は幹線水路が整備されており、ナルマダ川からの取水により各村に飲料水や灌漑水が送水されている。

2.2 流域の地質

ナル地方の地質図を図2に示す。図2は、Sushma ら（1998）によるナル地方の地殻変動と堆積に関する研究で用いられているものである。図2から、ほとんどの地帯が新生代第四紀(258

万 8000 年前から現在) の堆積物である。ナル地方はかつて海であり、リトルランとキャンベイ湾が海で繋がっていたとされている (Merh 1992)。ナル湖は汽水湖であり、海であった頃の名残であるとされている。また、ナル地方にはインダス文明の遺跡の一つであるロータル遺跡がある。この遺跡には「ドック」と呼ばれるプールのような施設があり、これは船による貨物輸送などに使われていたともいわれている。しかし、現在のロータルには河川はなく、海からも約 40 km 離れている。このため、ロータルが栄えていた時代と現在とは地形が異なっていたのではないかと推測されている。

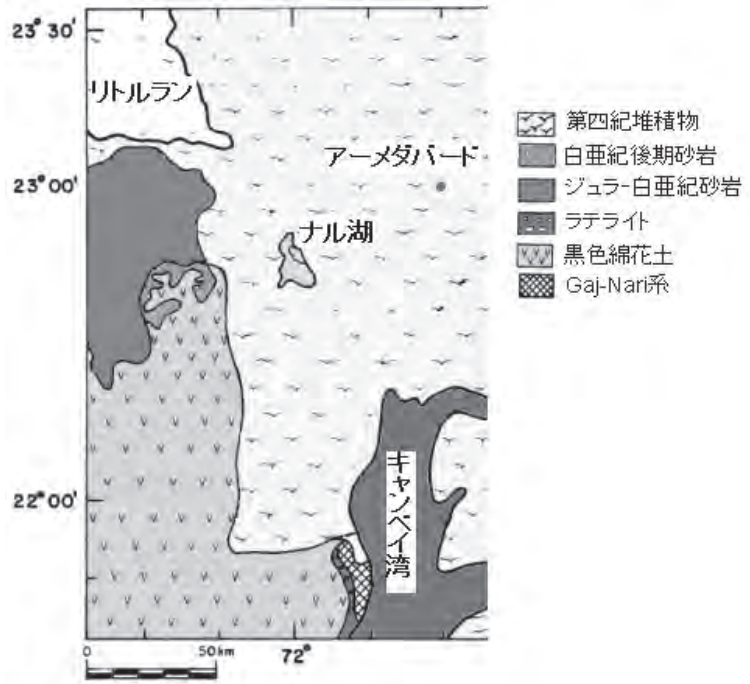


図2 ナル湖周辺の地質図 (Sushma 1988)

Sushma ら (1998) は、衛星画像とコアサンプルからこの地方における海水面の変動と、それに伴う堆積物・地形の変化を明らかにしている。これによると、約 125,000 年前には間氷期の海面上昇に伴い、ナル地方は浅い海であった。その後 65,000 年前に海水面が下がると同時に、東部からの河川堆積作用が 7,000 年前まで続き、現在の地形に近い形になったとされる。このときの堆積物が、図2に見られる第四紀堆積物である。また、完新世 (約 10,000 年前～現在) の海面上昇時には、ロータル周辺部まで海が広がっていたとしている。つまり、この地方は海水の影響を強く受けており、含まれる塩も海水の影響を強く受けているのではないかと予測される。また、図1と図2を比較すると、河川が黒色綿花土やジュラ紀及び白亜紀の砂岩上を流下していることが分かる。火成岩である黒色綿花土を流下する河川と、砂岩上を流下する河川水・地下水では、微量元素の種類や量の違いが見られると考えられる。

第四紀後期堆積土砂中の粘土鉱物は、イライトとスメクタイトが多い。イライトとスメクタイトはどちらも 2:1 粘土鉱物で、層状の格子構造を持ち、格子を構成する Si^{4+} が Al^{3+} や Fe^{3+} と一部置換することで陰荷電が生じ、陽イオンと吸着している。そのため、母岩由来の元素や水分によって運ばれた元素などが吸着している事が考えられる。

2.3 サンプリングポイント

サンプリングは、2009 年 12 月と 2010 年 10 月に行った。水サンプルは、同位体比や成分が異なるようにポイントを決定し、図3のとおり採取を行った。図中でのサンプリング表記は、表流水 (INW)、地下水 (ING)、土壌 (INS) となっている。表流水は流域内の河川、湖、水路から計 44 サンプルを採取し、地下水は村の井戸から計 11 サンプルを採取した。土壌サンプルは、ナル湖のある流域中央部において、海から内陸にかけて表層土を 6 地点で採取した。



図3 表流水 (INW)、地下水 (ING)、土壌 (INS) のサンプリングポイント

3 結果と考察

3.1 表流水における Sr 同位体比の特性

図4はナル湖周辺を中央部(図中凡例の北部は中央部の北部、南部は中央部の南部を指す)、そして、ナル湖周辺を境界として東部(図中凡例の東部)と西部(図中凡例の西部)に分類して表流水のSr同位対比をプロットしたものである。

東部のSr同位対比は西部に比べると全ての点において高い値を示しており、東部と西部で明確にSr同位対比が異なることが明らかになった。中央部のSr同位対比は、おおむね東部と西部のSr同位対比の間にプロットされた。これにより、Sr同位対比の値は、東部・中央部・西部で異なる傾向が示されることが明らかになった。

東部のSr同位対比は、一点を除き緯度に関係なくほぼ一定であった。ナル湖の東岸では河川水を用いた灌漑農業が広く展開されていることから、表流水の値は地質起源に大きく左右されることなく全般的に均質化される傾向にあると考えられる。

西部のSr同位対比は、一点を除き緯度が高くなるにつれて同位対比も高くなる傾向を示し

た。西部の高緯度サンプリングポイントは、ナルマダ川からの灌漑水路に近く、低緯度に比べて灌漑水の影響を受けやすい状況にあることから、東部の Sr 同位対比に近づいていると考えられる。灌漑の影響がほとんどない西部の低緯度では灌漑水の影響を受けておらず、相対的に低い同位体比を示すことから、東部と西部では元来異なる地質起源を持つと考えられる。

中央部における Sr 同位対比は東部と西部の間にプロットされている。中央部にはナル湖があることから容易にわかるように調査地の中で最も標高が低い。従って、東部と西部からの表流水が流入・混合するために、東部と西部の中間に Sr 同位対比がプロットされたと考えられる。

ナルマダ水系の河川水は、Sr 同位体比が 0.7125 付近にプロットされるものがあり、他のプロットは東部の同位対比と似た値を示していた。他のプロットは東部の表流水が混合したと考えられることから、ナルマダ水系の河川水は他のサンプルに比べて高い値を示したことであり、東部と西部の地質由来の塩分によってその値が下げられていると考えられる。

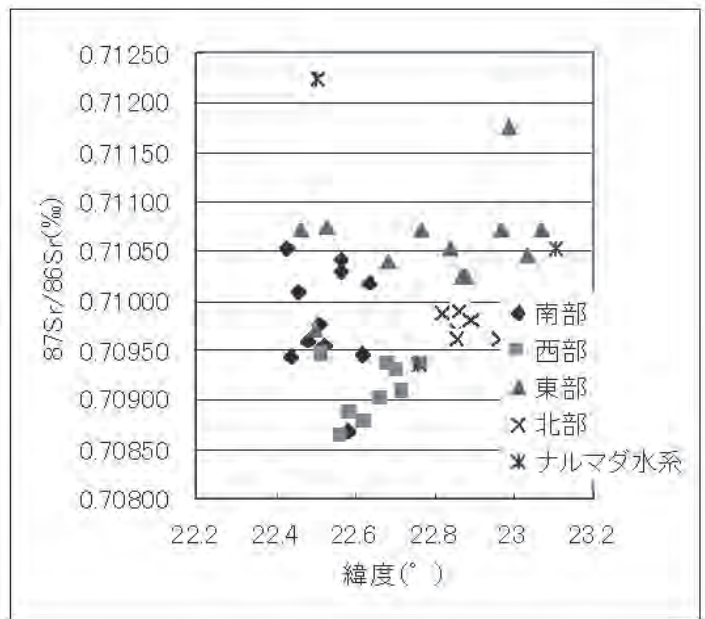


図4 ナル地方における緯度・経度による Sr 同位体比の分布

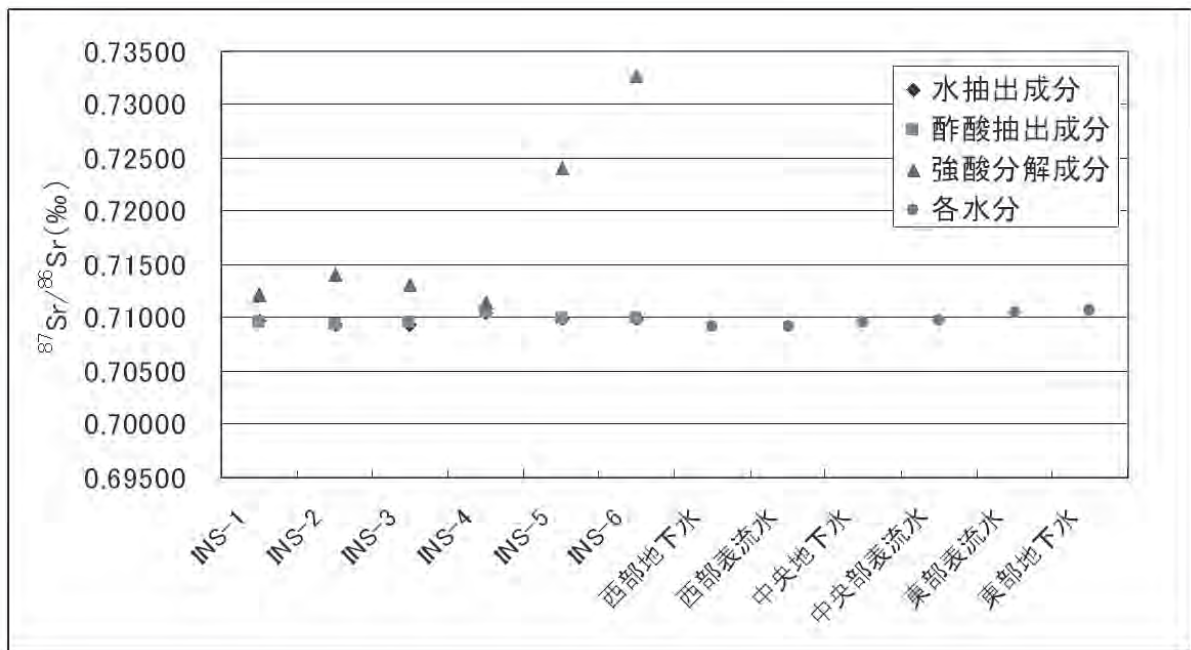


図5 表流水 (INW)、地下水 (ING)、土壌 (INS) のサンプリングポイント

3.2 土壌サンプルにおける Sr 同位対比の特性

次に土壌の各成分と東部・中央部・西部の表流水と地下水を比較したものを図5に示す。表流水と地下水の Sr 同位体比の値は平均値を用いた。図5より水および酢酸抽出成分は、表流水および地下水の Sr 同位対比とほぼ等しい値を示したことから、土壌水および土壌に吸着している塩分は、灌漑農業の影響を強く受けていたと考えられる。

一方で、土壌の強酸 (HF) 分解成分の抽出物における Sr 同位対比は、沿岸部 (南) からナル湖 (北) に向かうにつれて高くなる傾向を示した。INS5 および INS6 の Sr 同位対比は明らかに他のサンプルよりも高くなっている。図5に示す INS1-4 はナル湖の南部、INS5 および INS6 はナル湖の北部における試料である。採取したサンプルは表層から深さ 15cm 程度であるが、これらのデータよりナル湖の南部と北部の土壌は、異なる地質起源からなる土砂堆積で形成されていることが伺える。

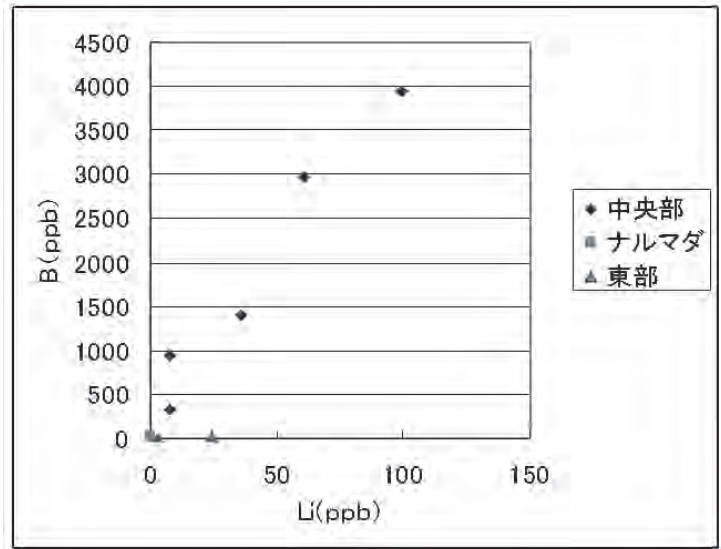


図6 ナル地方における Li 濃度と B 濃度と関係

3.3 表流水の微量元素分析

ナル地方は堆積岩地質なので表流水に溶出した B と Li の濃度が高いものと予想される。図6に B 濃度と Li 濃度の関係を示す。

ナル地方の B 濃度と Li 濃度には相関が見られた ($R^2 = 0.97$)。これは、B と Li は堆積岩由来であることを示唆する。また、B 濃度と Ca 濃度にも相関が見られた ($R^2 = 0.95$) ことから、

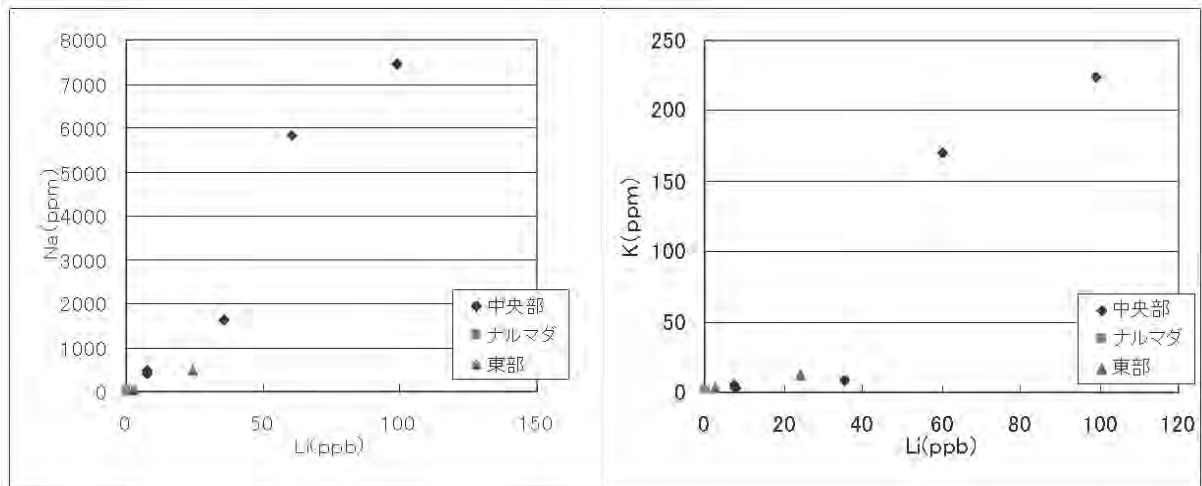


図7 ナル地方における Li 濃度と Na 濃度 (左) および K 濃度 (右) の相関関係

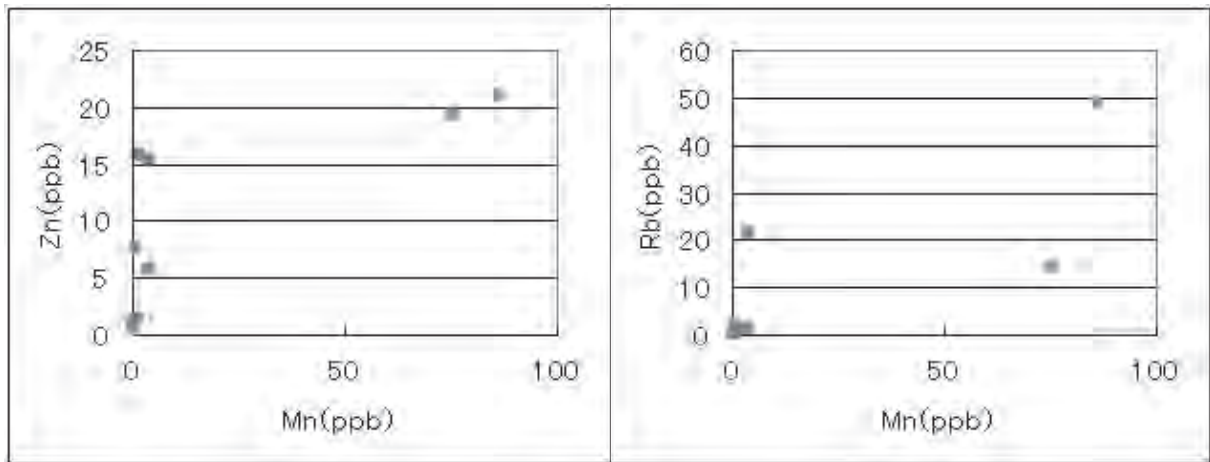


図8 ナル地方における Mn 濃度と Zn 濃度（左）・Rb 濃度（右）の関係

多くの塩類の起源は地質由来であると示唆される。

図7に Li と Na、K 濃度との関係を示す。Li 濃度は Na および K 濃度それぞれと正の相関があるようにみられる。つまり、Na と K と Li は同じ起源にあり、Li は土壌由来であることから、土壌が塩類の主要起源であると考えられる。また K 濃度も Li 濃度と相関が見られたことから肥料はナル地方の塩類の起源としてほとんど影響していないと推測される。

次に、Mn 濃度と Zn 濃度および Rb 濃度との関係を図8に示す。図8より Mn 濃度と Zn 濃度、Rb 濃度ともに相関は見られなかった ($Mn:R^2 = 0.55$ $Rb:R^2 = 0.64$)。特に Zn 濃度が高くなっているポイントが多く、Zn の多い何かしらの成分が含まれていると考えられる。Rb 濃度は K 濃度との相関が見られたため ($R^2 = 0.88$, data not shown in this report)、Mn により運搬されているのではなく、K 鉱物とともに含まれる Rb であると考えられる。これらから、Ca についても同様に岩石に含まれる鉱物によって運搬されてきたと考えられる。

4 おわりに

ナル地方における Sr 同位体比および微量元素分析により表流水は、ナル湖を挟んで東西、南北で異なる地質起源の塩分によって構成されていることが伺えた。特に注目したいのは、ナル湖西部の地質である。ここでの歴史的な人間活動の影響については多くの情報が得られていないが、現地踏査の結果から推測すると調査した流域の中では最も人間活動の影響が小さいと考えられる。したがって、この流域における灌漑等の人間活動の影響を排除した過去の地質情報については、ここでの表流水や土壌サンプルを用いることで、ある程度の推定が可能ではないかと考えられる。この結果をもとに種々のサンプルを取得し分析を進めることで、ロータル周辺における過去の塩分起源についてある程度推測することができる可能性が見いだされた。付随的な結果であるが、これらの分析により灌漑や肥料といった現代の人間活動の環境への影響評価ができることが明らかにすることができるようになった。

本調査では、諸般の事情によりロータル遺跡周辺において計画をしていた土壌のコアサンプルを取得することができなかった。しかしながら、現地関係者および日本国内の関係者、特に

インダスプロジェクトの事務局メンバーのサポートにより現地調査・サンプリングおよび分析までたどり着くことができた。ここに感謝の意を表したい。

【参考・引用文献】

Faure, G and T.M. Mensing (2005) *Isotopes : Principles and Applications*. John Wiley & Sons. INC.

Merh, S.S. (1992) "Quaternary sea level changes along Indian Coast", *Proceedings of Indian National Science Academy* A58: 461-472.

Sushma Prasad, K. Pandarinath, S.K. Gupta (1998) "Geomorphology, tectonism and sedimentation in the Nal region, western India", *Geomorphology* vol., Issues 3-4: 207-223.