

地下及び周辺の水環境を考慮した古代遺跡 MOHENJO-DARO の保存方法

STUDY ON HYDROLOGICAL APPROACH TO CONSERVE
REMAINS OF MOHENJO-DARO

中村隆志*・楠田哲也*・市川新**・福地隆史**

盛岡通***・松井三郎****・樋口隆哉****

Takashi NAKAMURA*, Tetsuya KUSUDA*, Arata ICHIKAWA**, Takashi FUKUCHI**

Toru MORIOKA***, Saburo MATSUI****, Takaya HIGUCHI****

ABSTRACT ; The remains of MOHENJO-DARO have a lot of precious information on Indus civilization. Now it is facing a destructive crisis because of uneffective ways of conservation as exhibiting the exposed constructual remains under severe environmental conditions, the lack of proper financial funds, equipments, and materials and a shortage of technical staffs. Hence, we will reassess the ways of conservation considering water environment around the remains such as ground water, precipitaion, evapolation, and river and canal flow. As a conclusion, we suggest reburying the remains to conserve them best.

KEYWORDS ; MOHENJO-DARO, conservation, water environment, salinization

1.はじめに

モヘンジョダロはハラッパーと並ぶインダス文明を代表する古代都市であり、その繁栄期はおよそ 2300B.C.～1700B.C.頃とされている。この都市はある特定の都市計画に基づいて設計されており、その街並は整然としている。また、その他の同時期の文明には類を見ないほどの水利用概念が発達していて、街の至る所に井戸・排水溝が設置されているのは、水の使用、処理といった生活上必要なプロセスが既に確立されていたことをはのめかすものである。またダストシュートやゴミ溜と解釈され得るものも発掘されており、当時、衛生思想が相当に発達していたことを裏付けている。しかしながらこの様な高度の生活知識があったにもかかわらず、この都市はわずか500年で滅びており、その衰退原因は幾つか考えられているがこれといった根拠は得られないままである。このような遺跡は考古学はもちろん、水利用施設に関わる水工学・衛生工学、都市文明の衰退に関わる都市工学と工学的な見地からも極めて価値性の高い研究対象であるといえよう。しかしながら、その高い文化的な価値にもかかわらず、モヘンジョダロは現在崩壊の危機に直面している。その原因として、

- (1)塩類の集積による建造物の崩壊
- (2)自然の風化による侵食作用
- (3)人為的な破壊

等が挙げられる。1974年にパキスタン政府はAPM(Authority for the Preservation of MOHENJO-DARO)

* 九州大学工学部 Kyushu Univ. , ** 東京大学工学部 Univ. of Tokyo , *** 大阪大学工学部 Osaka Univ. ,
**** 京都大学工学部 Kyoto Univ.

を設立してUNESCO（国連教育科学文化機関）との共同作業により保存計画を実行している。既に700万米ドルがつぎ込まれたにもかかわらず依然遺跡は崩壊の危機に面している。本研究ではこの危機に直面している遺跡の保存を目的として、周辺の水環境の影響を把握することによりその保存方法を考察するものである。

2.モヘンジョダロの地理的位置及び周辺の環境

モヘンジョダロは図1に示すように北緯27°17′ 東経68°14′ に位置し、インダス川河口部より約500km上流にある。現在は本流から約1km東のインダス平原中に存在している。遺跡のすぐ西側には灌漑水路であるダドゥカナルが通っており、周辺はほとんどが砂漠地帯であるのに対してこの灌漑水路周辺には田畑が広がり、米作を中心とした耕作が盛んに行われている。SPOT衛星によるリモートセンシング画像である図2より、遺跡周辺の環境が把握できる。図3に周辺の気象データ²⁾を示す。気候区分ではステップ地帯に属しており、年間を通じて降水量は約100mm程度で、そのほとんどが7月、8月の雨期に集中して降る。年間の平均気温は約27℃であるが、夏期の最高気温は50℃近くに、冬期の最低気温は0℃近くにもなるという非常に温度差の激しい所である。また日中の温度差も著しく、その差は15～30℃ぐらいの範囲で変化している。このような変化が著しい気温と集中的な降雨が遺跡の崩壊に寄与していることは明白である。

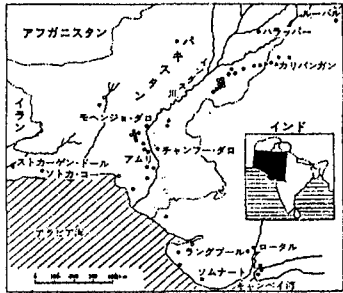


図1 モヘンジョダロの位置²⁾



図2 モヘンジョダロ付近のSPOT衛星画像

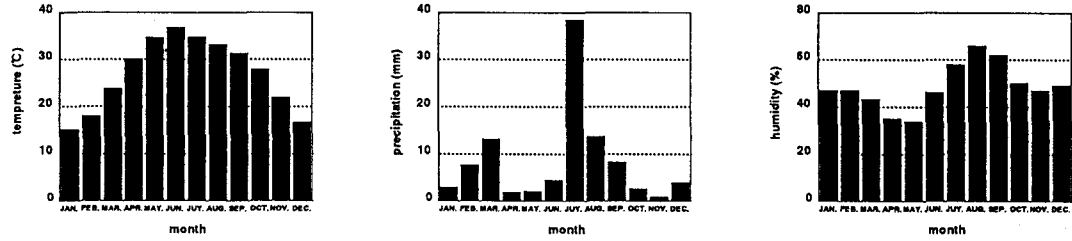


図3 モヘンジョダロ周辺の気候データ

3.モヘンジョダロの特徴

モヘンジョダロは約1km×1km程の丘陵の上に築かれており、図4に示すようにインダス文明都市の特徴を表す東側の市街地区と西側の城塞部の二つの部分からなっている。城塞部には沐浴場や穀物倉と思われるものがあり、ここはこれらを中心とした都市の統治中枢地区であったように思われる。市街地区は南北に走る大通りの両側に路地を介して住居跡が存在している。



図4 モヘンジョダロの全体図²⁾

モヘンジョダロで特に注目されるのは給排水システムである。城塞部

の大浴場は、底面に煉瓦を敷き詰めてピッチで漆喰されて防水性が保たれていた。またそこからの排水溝は人が通れる程の規模の大きな暗渠である。市街地区においては、家々からの排水が路地にある小さな排水溝に流れるようになっており、これが大通りにある本管に接続されている。本管は市街地内で完結している。その末端には汚水溜りと思われるものが作られており、ここで汚物を沈澱させて上澄みを地中に浸透させていたと思われる。(図5参照)

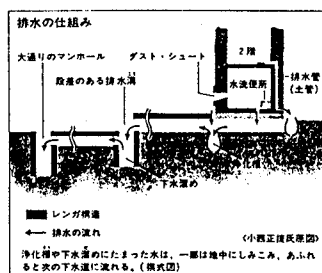


図5 排水処理方式⁹⁾

4. モヘンジョダロの発掘、保存の歴史

1920年頃、インド政庁の考古調査部長官であったイギリスの古典考古学者マーシャル (Sir John Marshall) によって派遣された部下のバナルジー (R.D.Banerji) がモヘンジョダロで仏教時代の仏塔を調査中に、ハラッパーから出土したものと瓜二つの印章、焼煉瓦、石器、彩文土器等を発見した。既にハラッパーは鉄器文化以前の金石併用時代の遺跡であることが確認されており、このモヘンジョダロも同時期の遺跡であることが明かにされた。モヘンジョダロでの発掘作業は1922年～1926年はマーシャルの監督下で行われ、1927年～1931年の間はメソポタミアでの発掘経験のあるアーネスト・マッケイ (E.J.H. Mackay) が担当し、モヘンジョダロの全容が明かにされた。

1950年にウィーラー (R.E.M. Wheeler) は-5mあたりまで掘り下げたときに地下水面に達した。しかし、遺構がまだ下層にまで続いていることが確認されたのでポンプを用いて排水をしながら発掘を行ったが、最下層部までに達することは出来なかった。1964～1965年になってアメリカの考古学者ジョージ・デールス (G.F.Dales) がボーリング調査を行った結果、-12mのところまで遺跡の層が存在することが確認された。これらより同発掘の行われたHR地区では、地表上層の堆積も加えて、22mを越す文化層の堆積があったことが判明した³⁾。

しかしながら遺跡の保存については、比較的低い関心のせいもあってか、これといった措置は取られず、発掘終了後もそのまま放置された。しかしながら遺跡崩壊の厳しい事態に直面して、パキスタン政府は1960年にUNESCOに援助を依頼した。その結果として(1)地下水位の低下、(2)残存構造物の保護、を主体とした短期・長期的な遺跡保存計画の作成が行われることになった。1972年には、これまでの調査を基に遺跡保存のための基本計画が完成した。現在に至るまでこの基本計画に基づいた保存作業が続いている⁵⁾。

5. 遺跡の保存状況とその問題点

現在行われている保存作業は主に次の3つに分けられる

- (1) 地下水の制御
- (2) インダス川河道制御
- (3) 残存構造物の保護

5.1. 地下水位の制御

1922年の発掘当時、地下水位は約-7.5mであったが、モヘンジョダロから約112km上流にあるサッカルバレッジからの灌漑用水によって1968-70年には水位が-1.5～-3.6mとなった⁶⁾。この地下水位の上昇の結果、土壤中の毛管作用によって水分が地表まで移動できるようになり、土壤中または水中に含まれる塩類もそれに伴って上昇して地上の煉瓦構造物中に浸入し得るようになった。このような地下からの水分の供給や地上

での蒸発の繰り返しによって生じる析出塩の体積変化が構造物破壊の原因となっている。このため塩類の移動を抑制するために、地下水位を低下させる計画案が上述のように提案された。

(前節参照)

この計画は図6に示すように遺跡周辺に環状の深井戸を掘り、汲み出した地下水を遺跡を囲むようにして作った集水溝(collector drain)に放水し、これ

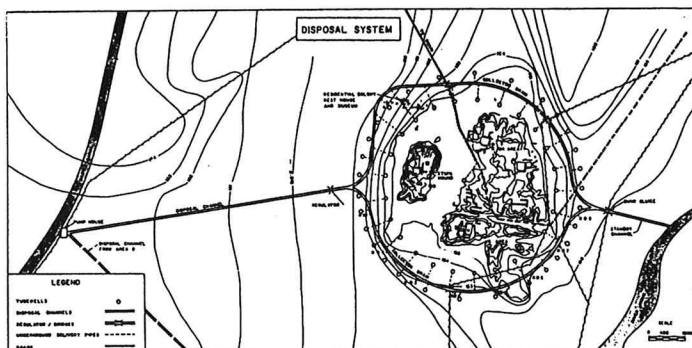


図6 地下水低下計画図⁶⁾

をポンプで排水溝(disposal channel)に汲み出し、ダドゥカナルへと排水するものである。当初は地下水位の段階的な低下案が計画されて、1972年に-4.5mであった地下水位を、第一段階としてモヘンジョダロを取り囲む14本の揚水井により-6.0mに、さらに第二段階としての12本の揚水井の追加により、-9.6mまで下げ、最終的には計56本の井戸で地下水位を-20mにすることにした。しかし現在まで26本の井戸によって2.2m³/sの地下水が汲み出されているにすぎず、地下水位も-2.1～-4.5mの範囲にとどまっている⁷⁾。これは資金不足により、計画を途中で断念せざるを得なかったことによる。また、ポンプの運転費用が負担になっており、ソーラーエネルギーへの転換が提唱されている。最近の報告では、地下水制御計画について、地下水位を低下することによる構造物からの塩類除去の効果を調べるために科学的な手法、つまり工学的に水理・地質学的面からの根本的な見直しが提唱され、この調査が終了するまでは-9.6m(34.8m a.m.s.l.)に水位を保つことが重要であると提唱されている⁸⁾。

5.2.インダス川の河道制御

先述したようにモヘンジョダロはインダス川本流の約1km東部に存在しているが、不幸なことにインダス川は年々西へと川岸の浸食作用を伴いながら移動しており、このままでは遺跡もろとも流されてしまう危険性がある。そこでAPMはインダス川の河道制御のために突堤を建設することを考え、1975年、導流堤付きのT字型突堤(hockey-cum-T-Spur)を立案したが、1976年の大洪水で河道が大きく変わってしまったので廃案となった。再度APMは測量し、7つの突堤を作ることにした。1992年7月現在、すでに5つの突堤は完成している。4つの突堤が完成していた1992年の6月から7月にかけて起きた2度の大洪水の急襲にもこれらは完全に持ちこたえた⁷⁾。(写真1参照)

しかしながら、遺跡の総合管理において不可欠であるこれらの突堤を監視するシステムが欠けている。現在、衛星データを用いた観測が提案されており⁹⁾、図2からも突堤の存在が確認できることから妥当な手法といえるであろう。



写真1 T字型突堤⁷⁾

5.3. 残存構造物の保護

モヘンジョダロでは発掘当時のようにオリジナルの煉瓦構造物が地上に露呈している形で保存されている。1972年に発表された基本計画ではこれらの構造物に対するいくつかの措置を明記しており、現在に至るまでこれに基づいた保存作業が行われてきた⁷⁾。その作業内容を以下に記す。

(1) 防湿層の挿入

煉瓦構造物中にコンクリート製の厚板を水平（上部、下部）、鉛直方向に挿入して地下水の上昇や降雨による水分の移動を妨げ、塩類の集積を防ぐものである。

(2) 支持強化

既に劣化している煉瓦を新しいものや中古のものと取り替えて、構造物の安定を保つものである。また観光客が構造物上を歩くなどして間接的に破壊が進んでいるところの煉瓦の取り替えも行われている。

(3) 塩類の除去

構造物に厚さ約2.5cmの泥の覆いを施し、煉瓦中に集積した塩類を吐き出させる作業が行われている。また構造物周辺の塩類を含んだ土壌を塩を含まない土と入れ換えることで塩による構造物への影響を抑制している。

(4) 排水作業

降雨の際に、雨水が流出し易いように遺跡内に排水溝や排水管を設置する。

これまでに城塞部(SD area)及び市街地区(HR, DK area)においてこれらの作業が為されてきたが、現在のところ計画は予定より遙かに遅れており、かなり問題があることが解る。この原因として

(1) 材料・設備の不足

(2) 技術スタッフの不足

が挙げられている。

UNDP（国連開発計画）は1992年に59.5万米ドルの財政的・技術的な援助を約束した。日本も資金援助として33.9万米ドルの財政支援を約束している。パキスタン政府は50万米ドルを用意した。これを基に次の計画が実行されている。

(1) 追加の遺跡管理者の任命

(2) 最適な科学的保存方法の開発のためのデータ収集・解析や科学的な記録や文書の作成におけるスタッフの訓練

(3) モヘンジョダロ研究所のための追加の設備の提供

6. 塩類集積度合の推定

灌漑による塩類の集積は乾燥地帯でよく見られる。モヘンジョダロもその例外でなく、すぐ西側を流れるダドゥカナルの建設により地下水位が5m近くも上昇した。遺跡でのボーリング調査では、その土質は砂・シルト・粘土が混在しており、毛管作用による地下水上昇高は3m以上とされている。この地下水上昇によって水分が地表上まで運ばれて、これに溶解した塩類が構造物中に浸入して煉瓦の破壊に寄与している。過去に行われた構造物からの塩類の溶出試験⁸⁾によって判明した塩の種類と含有量を図7に示す。

これらの塩類集積度合を定量的に推定・把握するためには物質輸送

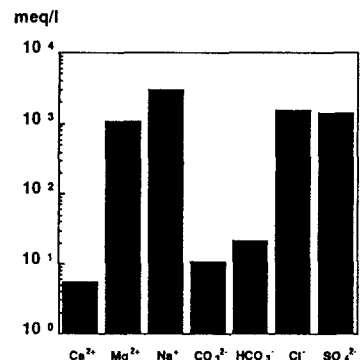


図7 地上構造物中に含まれる塩の種類と濃度

モデルを用いたシミュレーションを行うのが好ましい。ここでは説明を簡便にするため、簡単な一元物質輸送方程式を示す。

土壤中での水移動の基礎方程式としてRichardsの式¹⁰⁾を用いる。

$$C(\Psi) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\Psi) \cdot \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right\} \quad (1)$$

ここに、 $C(\Psi)$ ：水分容量、 Ψ ：マトリックポテンシャル、 t ：時間、 $K(\Psi)$ ：不飽和透水係数、 z 軸は鉛直上向きを正とする。

Van Genuchten¹¹⁾は体積含水率 θ と不飽和透水係数 $K(\Psi)$ をマトリックポテンシャル Ψ の関数として表した。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\{1 + (\alpha |\Psi|)^n\}^m} \quad (2)$$

$$K_r(\Psi) = \frac{K(\Psi)}{K_s} = \frac{[1 - (\alpha |\Psi|)^{n-1} \cdot \{1 + (\alpha |\Psi|)^n\}^{-m}]^2}{\{1 + (\alpha |\Psi|)^n\}^{m/2}} \quad (3)$$

ここに、 θ_s ：飽和体積含水率、 θ_r ：残留体積含水率、 K_r ：相対透水係数、 K_s ：飽和透水係数である。 α 、 m 、 $n(=1/(1-m))$ は実験定数であり実測値によるマトリックポテンシャルと体積含水率の関係（水分特性曲線）に適合するように決定される。また水分容量 $C(\Psi)$ は式(2)をマトリックポテンシャル Ψ で微分したものであり、次式で表される。

$$C(\Psi) = \frac{d\theta}{d\Psi} = \frac{\alpha \cdot m \cdot n \cdot (\theta_s - \theta_r) \cdot (\alpha |\Psi|)^{m \cdot n}}{\{1 + (\alpha |\Psi|)^n\}^{m+1}} \quad (4)$$

次に塩類の移動モデルを考えると塩類中で塩素イオン Cl^- は土壤中で吸着されず、イオン交換をほとんど起こさないことから、集積度合の予測には最適の移動物質である。そこで、ここでは塩素イオン Cl^- を考慮したモデルを示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \{ \theta \cdot (Cl^-) \} + \frac{\partial}{\partial z} \{ q_w \cdot (Cl^-) \} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \theta \cdot D_e \cdot \frac{\partial}{\partial z} (Cl^-) \right\} \quad (5)$$

ここに、 D_e ：水理学的拡散係数、 q_w ：水移動フラックス
また水理学的拡散係数 D_e は次のように表される

$$D_e = \alpha_L \cdot \frac{q_w}{\theta} + D_M \quad (6)$$

ここに、 α_L ：分散度、 D_M ：分子拡散係数
定常状態では式(5)は次のように書ける。

$$\frac{d}{dt} (Cl^-) = \frac{\partial}{\partial t} (Cl^-) + \frac{q_w}{\theta} \cdot \frac{\partial}{\partial z} (Cl^-) = \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D_e \cdot \frac{\partial}{\partial z} (Cl^-) \right\} \quad (7)$$

鉛直方向の水分・溶質移動のみを考えた場合、境界条件は以下の通りである。

$$q_z = E(t) \cdot (Cl^-) - \theta \cdot D_e \cdot \frac{\partial}{\partial z} (Cl^-) = 0 \quad : z = H \quad (\text{地表面})$$

$$\theta = \theta_s, \Psi = 0 \quad : z = 0 \quad (\text{地下水面})$$

ここに、 q_z ：塩素イオンの移動フラックス、 $E(t)$ ：蒸発フラックス

図8は、平均粒径0.264mmの土壤に濃度170mg/lのNaClを地下水として

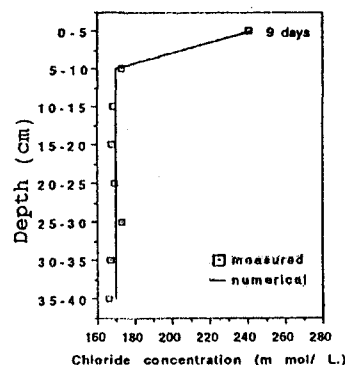


図8 土壤中の塩素イオンの濃度分布¹²⁾

与えた場合の計算結果である。この図から地表付近に塩素イオンが集積しているのが解かる。

このモデルでは水平方向の移動、土壤中の温度勾配、イオン交換などを考慮していないので、より適切な予測にはこれらの影響も加えたシミュレーションが必要となる。このため、土壌特性（粒度分布、間隙率、飽和透水係数）、地温分布、地下水位の変動、地下水中の塩類濃度、煉瓦構造物中の塩類濃度、蒸発量等のデータが不可欠であり、総合的な保存計画の中にこれらのデータの収集と管理が加えるべきである。最近では、遺跡保存に関するデータの収集・解析・管理を行うための準備が開始されたと報告されており、まずは上述したデータの収集を行うべきであると考ええる。

7.新たな保存計画の提案

同国北部に点在するガンダーラ遺跡においてもその多くが破壊されている。現在この原因はだいたい次の2つと考えられる¹³⁾。

- (1) 不用意な調査による破壊
- (2) 乱掘による破壊

(1)については、営利目的を有するような非科学的な調査によって遺跡の破壊が行われており、調査文書の作成、調査後の遺跡の保存等が為されていないか、もしくは不十分である、(2)は、観光客相手の商売目的で、遺物の乱掘が行われている、といった問題が生じている。

モヘンジョダロも例外でなく、観光客による破壊、修復作業における破壊等によってその原形が失われつつあるといえよう。現在の保存策は、モヘンジョダロの構造物を露出させることを前提にしている。これは“魅せる”ところに価値を置いた保存方法であり、日本での遺跡保存と比較すると視覚的な感動を与える点では非常に優れていると思われる。しかしながら、古代インダス文明都市の構造の解明を目的とした学術的な調査には長期的な保存対策が必要であり、それを考えると地下水、気温、降雨といった劣悪な環境条件の中では、従来の保存方法には問題があるといえよう。そこで対策案としてつぎの3点を提示する。

- (1) もともとの形で残っている地上部の構造物の精密な測量・調査を行った後に遺跡を発掘前のように覆土し塩害、風化による崩壊、観光客による破壊から永久に守る。大浴場部のような中心的な構造物などは屋根付きの建物のなかで直に見学できるような措置を講ずる、
- (2) 観光用に遺跡公園として正確に復元されたものを建設して、鑑賞料金を外国人観光客を中心に徴収してこれを遺跡保存の資金源とする、
- (3) 保存に関する調査資料、出土資料を収集して、慎重に保存する

(1)については、遺跡の破壊を最小限に抑えて、長期的な保存を確立するものである。また、埋め戻しは日本国内における遺跡の典型的な保存方法であり、特にモヘンジョダロのような焼煉瓦や泥モルタルといった比較的耐熱、耐水効果の低い構造物の保存には最適であろう。しかし、これはあくまで日本文化の応用であり、現地の文化に即した保存方法とともに慎重に考慮されるべきであろう。

(3)について、最近では文書の保管、研究機関を兼ねた施設が作る準備が開始されたと報告されており、「ヴェニス憲章」（記念建造物および遺跡地の保存と復原のための国際憲章）第16条に唱えられている「保存等の報告書作成の義務」を実行するべきであるとも報告されている¹⁴⁾。

これらの保存計画は従来のものと比較して修復作業・地下水汲み上げのポンプ運転資金等が不必要な点から経済的であり、かつ長期的な保存が可能であるという長所が挙げられる。

上記の保存計画に加えて、現在UNESCOから出されている造園と植生の保全に関する作業計画において土

壤の塩類を吸収するためにサボテン等の塩類に強い植物の栽培が考えられているが、同じような乾燥気候で塩類土壌を有するエジプト周辺では商業的な価値のあるイグサが栽培されており¹⁴⁾、モヘンジョダロにおいても保存資金源となるような植物の栽培が好ましいと考える。

8.おわりに

モヘンジョダロ遺跡の保存については、多くの改良されるべき点があることが理解できよう。遺跡の破壊は深刻な問題ではあるが、適切かつ早急な保存措置が講じられれば、学術的な研究の促進が可能となり、文化遺産としての価値を十二分に与えることができるであろう。最後に、今回の論文を書くに当たって、モヘンジョダロに関する資料を提供して下さったユネスコ・アジア文化センターの梅本真司氏に心より感謝申し上げます。

参考・引用文献

- 1) Sue William: Saving Moenjodaro, The Archaeology Quarterly, Vol. V-No. 1&2, pp. 48, 1992.
- 2) 曾野寿彦・西川幸治: 死者の丘・涅槃の塔、新潮社、1970.
- 3) 国立天文台編: 理科年表(平成6年)、丸善、1994.
- 4) 学習研究社編: 遺跡の旅(5) アジア・アフリカ、学習研究社、1976.
- 5) Department of Archaeology & Museums, Government of Pakistan: MOENJODARO conservation of structural remains progress report 1980-89, 1990.
- 6) Sultan A. Aryne & Masood H. Khan: The Control of Ground-Water Table at Moenjodaro, PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOENJODARO 1973, pp. 125-147, 1975.
- 7) 財団法人ユネスコ・アジア文化センター: モヘンジョダロ 救おう! 人類共通の文化遺産、1993.
- 8) UNESCO: RECOMMENDATIONS, SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOENJODARO, KARACHI, 24-27 FEBRUARY, 1992.
- 9) Ch. Rehmatullah: Leaching Experiments to Eliminate Salt Effects at Moenjodaro, PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOENJODARO 1973, pp. 100-107, 1975.
- 10) Richards, L. A.: Capillary conduction of liquids through porous mediums, Physics, 1, pp. 318-333, 1992.
- 11) Van Guchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of American Journal, 44, pp. 892-898, 1980.
- 12) Jinno et al.: A Numerical Model Study of Soil Water and Solute Transport under Evaporation, 九州大学工学集報、Vol. 53, No. 2, 1993.
- 13) 西川幸治: 都市の思想 [下]、NHKブックス、pp. 120-121, 1994.
- 14) 高橋英一: 生命にとって塩とは何か-土と食の塩過剰-、農文協、pp. 158-159, 1986.