

古代遺跡モヘンジョダロにおける給排水システムの再考*

Reconsideration of water supply-drainage system on the ancient remains of Mohenjo-Daro

中村 隆志*² 楠田 哲也*³
市川 新*⁴ 松井 三郎*⁵ 盛岡 通*⁶

by Takashi NAKAMURA, Tetsuya KUSUDA,
Arata ICHIKAWA, Saburo MATSUI, Toru MORIOKA

Mohenjo-Daro is widely known as one of the largest cities of Indus Civilization and with its numerous brick-made structures. In particular, its drainage system is unique among the other remains flourished at the same period of Mohenjo-Daro. As yet, this system has been interpreted as simple sewer based on the results of past archaeological researches, however few researches with the engineering point of view have been made. Therefore, the authors approached to its water supply-drainage system with the civil engineering view and tried to investigate the original purposes of the drainage system. This supply-drainage system includes some pieces of software such as water supply capacity, rainfall intensity, and water use form and also hardware such as sewer, well, and soak-pit. As a conclusion, this drainage system seems to have been made mainly for the removal of waste water from floor-paved rooms near wells.

1. はじめに

モヘンジョダロはハラッパー (Harappa) と並ぶインダス文明期の古代都市であり、図-1 に示すように現在ではバキスタン・イスラム共和国の主要都市カラチ (Karachi) よりインダス川に沿って約500km程上流に位置している。モヘンジョダロの全体は、図-2 に示すように総面積約85haであり、西側に城塞部、東側に市街地区がそれぞれ丘陵の上に築かれており、

この配置はインダス文明都市の特徴である。現在までに遺跡の発掘は、図の斜線部の6カ所で行われており、これらは遺跡全体の約10%にすぎないと推測されている。モヘンジョダロの繁栄期は1700B.C.～2300B.C.頃であるといわれており、ここでは、他の

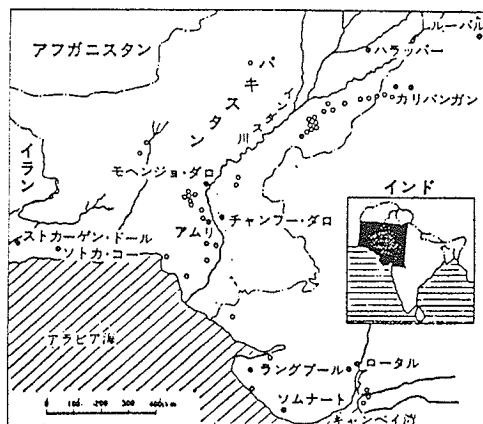


図-1 モヘンジョダロの地理的な位置¹⁾

* keywords: モヘンジョダロ、水利用、排水溝

*² 学生会員 九州大学大学院生工学部建設都市工学科

*³ 正会員 工博 九州大学教授工学部建設都市工学科
(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

*⁴ 正会員 工修 東京大学助教授工学部都市工学科
(〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)

*⁵ 正会員 Ph.D. 京都大学教授工学部附属環境微量
汚染制御実験施設 (〒520 大津市由美浜 1-2)

*⁶ 正会員 工博 大阪大学教授工学部環境工学科
(〒565 大阪府吹田市山田丘 2-1)

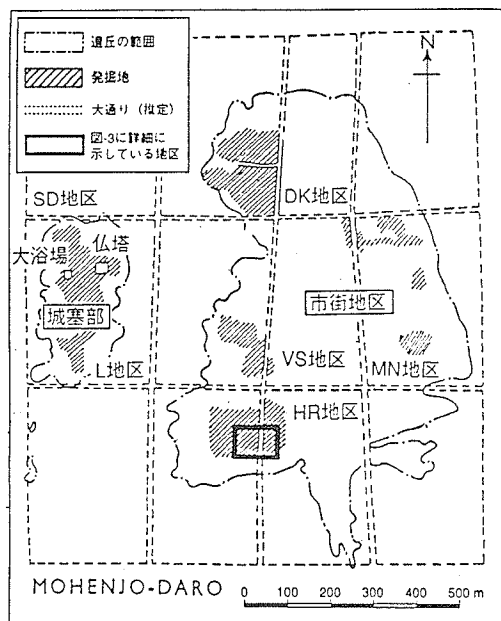


図-2 モヘンジョダロの全体図²⁾

同時期の文明には類を見ないほどの水利用・処理觀念や衛生思想の発達を示す考古学的かつ工学的に貴重な構造物が多数存在しており、中でも「排水溝」と解釈されているものは、歴史的にも有名な構造物の一つである。しかしながら、今日に至るまで、この古代都市システムの解釈は1920年代の発掘時の調査結果に基づいたものが支配的であり、大きな変化は見られない。これは、発掘物の科学的な裏付けが乏しいこと、また、他の古代文明とは異なり文書類が一切発見されず、しかもインダス文字の解明も未だ不十分な状態にあることなどから、モヘンジョダロ繁栄期の生活文化については推測の域を脱していないのが実情である。このように土木工学として非常に価値の高い研究対象であるにもかかわらず、手

つかずの状態にあり、遺跡は崩壊の危機に面している。現在、モヘンジョダロではUNESCOとパキスタン政府が遺跡保存計画を進めているにもかかわらず、塩害による構造物の崩壊、人為的な破壊が進んでいる。

2. 給排水システムの再考の意義

上述したようにモヘンジョダロには非常に興味深い構造が多数存在している。表-1にその土木工学的要素の概要を示す。とりわけ排水溝は同時期の他の遺跡と比較しても相当に発達しており、街中の至るところにそれらしき構造物が残存している。排水溝は、雨水排除のために造られたものであるという主張^{3) 4)}もある。しかし、これらは、例えば図-3に示すHR地区では一部例外を除いて井戸、“煉瓦敷の空間”、排水溝の3点が空間的に連続した形で存在しており、モヘンジョダロ全体でもこのような配列がよく見られる。従って、井戸から汲み取った水を“煉瓦敷の空間”で使用し、その排水のために排水溝が作られたとも考えられる。“煉瓦敷の空間”では従来から「宗教的な沐浴」のために水の使用があったという主張が為されてきたが、先述したように科学的な根拠に基づく考察が不十分であるために、その信憑性は乏しく、当時の水利用形態が十分に確定されていないのが現状である。そこで本研究は、遺跡内の給排水システムについて土木工学的な見地から検討・考察を行い、排水溝の本来の目的を明確にするものであり、当時の水利用形態確定のさきがけ的なアプローチである。

3. 個々の給排水システム要素についての考察

表-1 モヘンジョダロにおける土木工学的な要素

社会施設	(城塞部) 仏塔、沐浴場、穀物倉、会堂、見張り台、製粉場 (市街地区) 家屋、寺院
上下水道衛生設備	井戸、沐浴場、排水溝、排水管、ダストシュート、ウォーターシュート、汚水溜、トイレ、ゴミ溜
建設材料	煉瓦(焼成、日干し)、木材、モルタル、石膏、石
基準尺	二進法、十進法(道路幅の規律、煉瓦のサイズ等)

システム全体を評価する前置きとして、構造物などのハードウェアと水利用形態等のソフトウェアから成る個々の構成要素を評価しておく。図-4はモヘ

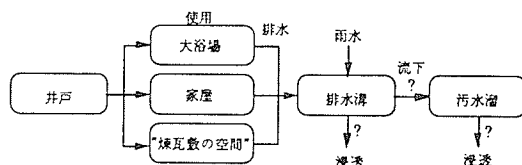


図-4 水循環のフロー図

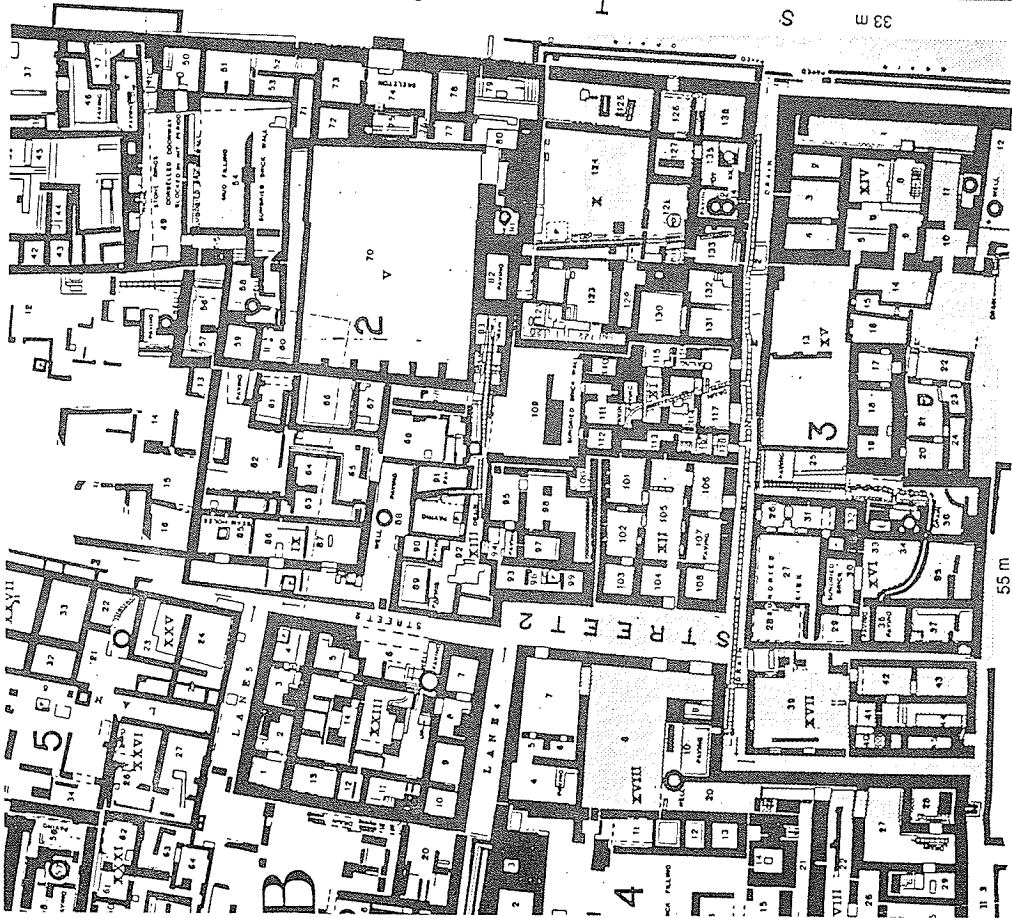


図-3 HR地区の一部⁵⁾

ンジョダロにおける水循環の概念図であり、ここでは次の8点について考察を加える。

- (1)井戸 (2)大浴場(沐浴場) (3)“煉瓦敷の空間”
(4)人口密度 (5)1人1日当りの水使用量(排水量)
(6)排水溝 (7)汚水溜 (8)雨水流出量

3.1. 井戸

井戸が水の供給源として古来より世界中で使用されてきたことは広く知られている。ここモヘンジョダロでも井戸73基が確認されており、これらは主要な水供給源であったと思われる。現在、モヘンジョダロはインダス河岸に位置しており、夏期と冬期におけるインダス川の水位変動による地下水位の変動が大きく1968-70年の統計では地下水位の変動差が1.5~2.0mであった⁶⁾。繁栄当時のインダス河道は未だ明らかにはされていないが、遺跡に洪水襲来の痕跡があることや、船の図柄が刻まれた印章が発掘されていることから当時もインダス河岸に位置していた可能性が高い。また、当時の気象は今日と同レベル、もしくは少なくとも湿潤であったとされている⁷⁾ので、インダス川の流量も今日と同程度であったと考えて差し支えないと思われる。よってここでは、当時の地下水位変動が今日のものと同程度であったと仮定する。モヘンジョダロの住民はこの変動特性をうまく利用して、地下水位の高い夏期に豊富な水を得た可能性が高い。ここではこれらの井戸が唯一の水供給源であったとして井戸の給水能力を推定することにより給水限界量を見積る。

3.1.1. 井戸の空間的配置

表-2に井戸の空間分布の状況を示す。城塞部では井戸1基当りの水供給面積は3000m²強であり、地区面積の割には井戸数が少ないことから、当時ここは

表-2 モヘンジョダロの井戸特性⁸⁾

地区	地区面積 (m ²)	井戸基数 (基)	井戸1基当たりの水供給範囲 (m ² /基)	平均口径 (m)
(城塞部) SD	12,700	4	3,175	1.77
L	6,400	2	3,200	2.04
平均			3,183	1.86
(市街地) DK-G	28,000	21	1,333	0.93
DK-A,B,C	12,200	8 (10)	1,525 (1,220)	0.84
VS-A,B	13,000	10	1,300	0.85
MN-A,B,D,E	7,200	5	1,440	0.78
HR-A,B	20,600	23	895	0.91
平均			1,209	0.89
全体	100,100	73 (75)		

居住区ではなく公共施設が置かれたような所であったと推定される。実際、発掘された建築物の構造から判断して、ここが都市の中心地区で行政の中枢であったという解釈も為されている⁹⁾。一方、市街地区では比較的に井戸密度が高く、特にDK-G地区とHR地区で各々全体の1/3の井戸数(21、23基)を有しており、当時これらの地区が遺跡の水使用の中心地区であった可能性が高い。

3.1.2. 井戸の構造

地区別平均の井戸口径を表-2に示す。これから市街地区での井戸径は0.8~0.9mであり、城塞部の井戸はその約2倍の径となっている。井戸は全て煉瓦で造られており井戸側は楔形の煉瓦を円形に並べているが、井底までこの構造を有していたかどうかは定かでない。巻き上げ機の有無に関しては、井戸によって井戸側の煉瓦にロープの溝跡が有るものとそうでないものが存在することから、Marshall¹⁰⁾は前者は人の手によるもの、後者は巻き上げ機等の機械を使った井戸であると推測している。しかしながら、くさび形煉瓦を円形に並べて造った井戸側は構造上、力学的に井戸外部からの応力には強く、内部からの応力には弱いことから、井戸側を支点としてロープを引き上げたとは考えづらく、井戸側の溝跡から巻き上げ機の使用は断定できない。よってここでは、水はすべて人の手によって汲み上げられたものとする。

3.1.3. 地下水位

Jansen¹¹⁾はモヘンジョダロ及びハラッパーでの過去のボーリング結果から繁栄当時の地表面は現在の地表面(海拔47~49m)より低い海拔40m程度であり、地下水はさらに5~6m下方にあり海拔34~35m付近であったと仮定した。この仮定を踏まえると、HR地区においては井戸口の平均高度が海拔54.3mであることから、井戸口から地下水面までが約20m程度の距離であった可能性が高い。確かに20mもの深さのある井戸を掘るには相当の技術を要するはずであり、当時、これらが井戸であったことを証明するのは容易でないが、実際に遺跡発掘の際には、井戸口から地下水面までの深さが確認されていることから、ここでは全ての井底が地下水面にまで到達して

(a.m.s.l.)	Formation Thickness (m)	Formation Description
48.0	3.7	Pieces of pottery and brick mixed with some clay
44.3	1.8	Clay,hard,gray with brick and pottery
42.5	5.8	Predominantly clay,hard,gray with some pieces of pottery
36.7	18.9	Sand,fine to medium,gray with some thin layers of clay and kankar
17.8	0.6	Clay,hard,gray with some kankar
17.2	1.2	Gravel,mostly calcareous mixed with sand and clay pellets
16.0	33.5	Sand,medium,fine,gray,with some gravels between 53.3 and 54.9 some clay with fine kankar between 61 and 64 m

図-5 遺跡付近でのボーリング結果¹⁴⁾表-3 透水係数と土壌の関係¹⁵⁾

透水係数 k(m/s)					
1.0	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹
透水性	高い	中位	低い	非常に低い	実質上不透水層
土の種類	清浄な礫	清浄な礫 および砂礫	微細砂、シルト、砂・シルト・粘土混合土、 凝結粘土など	不透水性の土が基本で風化の 影響を受けて柔らかいもの	不透水性の土、 例えば風化を受けていない均質な粘土

いたものとする。

3.1.4. 土壌の透水係数

現在、モヘンジョダロでは塩害から遺跡を保護するために遺跡周辺に深井戸を設置して地下水位を低下させており、現在の揚水規模では地下水位を地表面下9.8mに下げると当初見積られた¹²⁾が、実際には5.2~8.8m程度の低下量¹³⁾しかない。この原因の1つとして実際の透水係数が推定値より大きかったと考えられる。この数値より井戸内の水位が分かれば、透水係数を求める。しかし、この井戸内の水位のデータは公表されていない。従って、ここでは便法を講じることとする。図-5は代表的な遺跡周辺でのボーリング結果である。これから当時の地下水

面付近（海拔34~35m）の土壌はほぼ砂質であることが解る。表-3に土壌と透水係数の関係を示す。この土壌の透水係数はおよそ10⁻⁴~10⁻⁶m/sの範疇と考えられることから、透水係数として、ここでは土壌を等方性として一律10⁻⁵m/sなる値を使用することにする。以上の数値からHR地区での井戸1本当りの給水量を算定する。モヘンジョダロの住民は冬期の地下水位が最も低下する時に鑿井して、当時は高度の排水技術が無かったために地下水位より1mしか深く掘れなかったものと仮定する。また、井戸口径は表-2でのHR地区の平均口径0.91mとし、井底は球形であり、井底だけから湧水したとする。いま井底より井戸口の半径長だけ上方に水位があるように揚水したとして従来の経験式¹⁶⁾から、可能揚水量を算定すると、

$$Q=2\pi kr_0(H-h_0)=2\times 3.14\times 10^{-5}\times 0.46\times (1-0.46) \\ =1.56\times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (1)$$

ここに、Q:単位時間当たりの揚水量 (m³/s)、 π :円周率、k:透水係数 (m/s)、 r_0 :井戸半径 (m)、 $H-h_0$:地下水面と井戸内の水位との差 (m)

となる。これが井戸の最大供給速度になる。よって揚水は日中（12時間）に可能であるとすると日最大給水量は674ℓとなる。一方で、先述したように夏期には地下水面が1.5~2.0m上昇することから、ここでは年平均の地下水位を最低時よりも1m上方にある場合、すなわち井底より2mのところ地下水位があると仮定すると年平均の揚水量は(1)式より約1900ℓ/dとなる。また、単純に仮定して容量10ℓの桶のような容器にロープを付けて水を汲み上げたとなると、計190回の揚水が必要であり、1回当たりの揚水時間は4分弱となる。口径0.91mの井戸では同時に1人のみ汲み上げられるとして、この揚水時間内に深さ20m程度の水面から水を汲み上げるのは可能である。

3.2. 大浴場（沐浴場）

大浴場は何の目的で造られたかは今のところ定かではないが、先述した「宗教的な沐浴」はここで行われていたとする見解がある。例えばインド人歴史家Kosambi.D.D.は大浴場の機能を次のように考察している¹⁷⁾。

- a) 沐浴斎戒の他に王と祭司を聖なるものにする用途があった、
 b) 水辺に降りる階段が巡礼に深く関わっていた、
 c) 人工の池の機能が原始的な増殖儀礼に結び付いていた。

この大浴場の規模は、およそ12m (W)×7m (L)×2.4m (H)である¹⁸⁾。Marshallは大浴場を破壊する恐れがあったので床の構造調査を行わずに、推測で煉瓦を数層に渡って敷き詰めている可能性が強いとした。煉瓦は石膏と砂を混ぜ合わせた物質で互いに接着されてその目地は数mmであり、さらに側壁の裏側には2.5cm厚のビチューメン(bitumen)による舗装が為されており、これは防水効果を持たせるものであったと考えている。また、浴場の西南角の壁面に0.23m(L)×0.17m(H)の矩形の排水口があり、ここから水は排出されて排水溝へと流下したとしている¹⁹⁾。この浴場には浴場側の井戸から汲み上げられた水を注いだ可能性が高い。Marshall²⁰⁾はこの可能性を否定しているが、その根拠は明かでない。しかしながら、この井戸が大浴場から距離的に最も近く、さらに大浴場を囲む外壁の中に存在することから、ここで汲み上げられた水が大浴場に注ぎ込まれた可能性は非常に高い。また、この井戸の口径は1.88m²⁰⁾であり、§3.1.4.での計算から日中の給水量は約2700ℓ(6.26×10⁻⁵m³/s)となる。1回当たりの揚水時間は10ℓの容器で汲み上げたとして約2.5分となる。また、いま井戸口高は海拔51.24m¹⁸⁾であり、地下水面まで15m程度であったと思われることから、1人で十分に揚水が可能である。この汲み上げられた水が全て大浴場に注ぎ込まれたとすると、全く水漏れが無いとして1日で僅か3.2cm程度の水深しか与えない。しかしながら漏れを考えると、水は床からのみ漏れるとして煉瓦1個(27cm(W)×5.5cm(L)×13cm(H))当たりの目地を2mmとして、その割合を計算すると約9%であるから大浴場全体では、7.6m²の目地面積となる。また1日平均の単位時間当たりの給水量は日中のみ給水する場合の半分で3.13×10⁻⁵m³/sとなる。いま目地の透水係数を10⁻⁶m/s、床は煉瓦1層敷であると仮定して維持可能な水深を求めると、

$$H = \frac{QL}{KA} = \frac{3.13 \times 10^{-5} \times 0.13}{10^{-6} \times 7.6} = 0.54 \text{ (m)} \quad (2)$$

ここに、H:水深(m)、Q:単位時間当たりの給水量(漏出量)(m³/s)、A:漏れ面積(m²)、k:透水係数(m/s)、L:煉瓦高(m)

となり、約50cm程度の水深となる。従って膝が浸かる程度で用いられたと考えられる。

3.3. “煉瓦敷の空間”

これらは、浴場や便所と解釈されてきたが、実際にはどういった場所なのかはよく解っていない。Marshall²¹⁾はこれらの床は煉瓦で4～5層に渡って敷き詰められており、隅や角は細かく切られた煉瓦が埋め込まれていたとしている。さらにその上には石灰と煉瓦屑を混ぜ合わせた赤い物質が塗られており、これらの特性は防水効果を持たせるものではなかったと解釈している。先述したように、実際に地図上では、これらの空間は井戸付近や排水溝近くに存在していることから、ここで水が使われた可能性は非常に高く、実際に床は出口に向かって傾いており、隅の小さな四角形の穴から水は排水溝へと流れ込んだと思われる。この空間の広さはまちまちであるが、図-3に示すように5～6m²のものが代表的である。もし仮に井戸からの揚水量が全てこの空間で使われたとすると、§3.1.4.より井戸1基当たりの揚水量が1900ℓ/dであるから、貯水したとして1空間で30cm程度の水深を与えることになるが、煉瓦敷の空間は2～3カ所の単位で存在することや、揚水の一部が生活用水となることを考慮すると、この空間は大浴場とは異なり、水を溜めるような空間でなかったと思われる。

3.4. 人口密度

従来の研究²²⁾ではモヘンジョダロ全体の人口密度の見積りが行われてる。表-4にその結果を示す。これによるとモヘンジョダロ全体の人口は30,000～40,000人であったと推定されている。ここではその

表-4 人口見積もり一覧

算定者	推定人口(人)	推定根拠
Datta	33,496	穀倉に貯蔵されていた穀物の量の見積もりを基に算定した
Fairservis	41,250	1人につき800ℓr(74.3m ²)の所有空間があったとした
Lamberg	35,000	北西シンドのシカルブルの19世紀の統計値を基に、この場所が構造的にモヘンジョダロに似ているとして算定した

中間値である35,000人を全人口として人口密度を求めるとモヘンジョダロの面積を約85haとして410人/haとなる。現代において過密人口地帯の一つであるタイのクロントイスラムの人口密度が1ha当り600人弱であることから、この値は实际的に有り得ると言えよう。また表-2に示すように井戸1基当りの給水面積は最も狭いH R 地区では895m²であるからH R 地区での井戸1基当りの給水人口は37人となる。

3.5. 1人1日当りの水使用量（排水量）

§3.1.4.より、ここでは井戸1基当りの水供給量を1900ℓ/dと仮定すると§3.4.でH R 地区の井戸1基当りの給水人口が37人であるから1人1日当りの水使用可能量は約50ℓとなる。しかしながら、これは日中に連続的に汲み上げた値であるから、実質的にはこれよりも小さな値であった可能性が高い。現代社会における発展途上国等での1人当りの最低水使用量は1人1日当り30～40ℓ²³⁾程度であることから、ここでは1人1日の必要最低限の生活用水量は、現代においても古代においてもほぼ同じレベルであると仮定すると、当時は井戸からの給水のみで十分に生活できたものと考えられる。よって、ここでは1人1日当り30～40ℓの水を確保したとして、その用途別内訳を表-5のように仮定する。

3.6. 排水溝

排水溝の流下能力ついて、表-6に示すように幾つ

表-5 1人1日水使用量

用途	飲用	洗濯	体の洗淨	調理	掃除その他	合計
使用水量(ℓ)	3	5	10～20	6	6	30～40

表-6 排水溝流下能の算定一覧²⁴⁾²⁵⁾

試算者	算定式	排水溝 No.	場所	流量 (ℓ/s)	断面形状 W×H (m)	粗度係数	勾配 (%)	備考
市川ら (1994)	Manning式	1	沐浴場跡 (SD)	560	0.42×0.4	0.015	3.5	100% 流量
	*	1	沐浴場跡 (SD)	20	0.09×0.16	*	*	
M.Jansen (1977)	*	2	Fuss Street(DK)	100.8	0.25×0.60	0.02	4.6	35% 流量
	*	3	Long Lane(DK)	64.9	0.25×0.31	*	9.9	
	*	4	Cloaked Lane(DK)	35.7	0.20×0.23	*	12	
	*	5	Black LA(DK)	74.4	0.19×0.40	*	15	

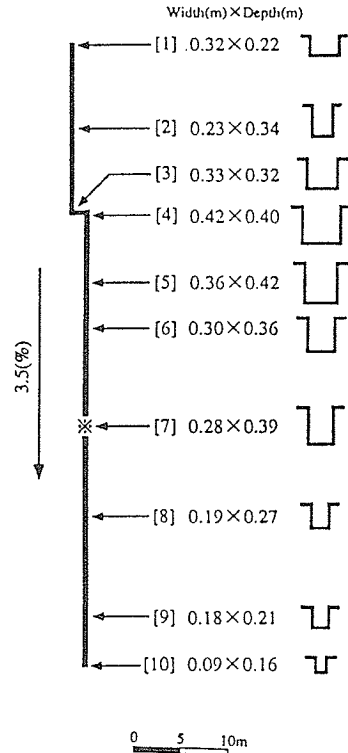


図-6 排水溝No.1の測量結果²⁴⁾

かの計算例が報告されている。著者らは一昨年の現地調査においてS D地区「沐浴場跡」のすぐ東側に南北に走る排水溝No.1を測量した。その測量結果を図-6に示す。特に中流部から下流部にかけての断面の減少が著しい。測量結果を基に排水溝No.1の流下能をManning式（粗度係数: $n=0.02$ ）を用いて求めた結果から、場所によって流量、流速の差が大きく、中流部(1-4)と下流部(1-10)とでは満流時に流量で約30倍、流速で約2.5倍の差があることが解った。また、Shieldsの限界掃流力の式をManning式で表して、掃流特性として限界掃流流速を砂粒径 d (cm)と砂粒の比重 s の関数として求めた。これらから結論として次の3点が考えられる。

- (1)いま排水溝No.1が当時の原形をそのまま残しており、排水溝からの溢流は一切なかったとすると排水溝の最小断面部(1-10)での100%流量14.4ℓ/s以下が当時の最大流量であった可能性が高い。
- (2)1-8,9,10を除いていずれの断面も100%流量時に100ℓ/s以上の流下を有することから遺跡全体の排水

溝断面の規格がこの程度であった可能性がある。すなわち排水溝No.1の下流部は後世築造の可能性がある。

(3)排水溝No.1の最小断面部(1-10)で50%流量6.33ℓ/s時の小さな掃流力でも、理論上、比重2、粒子径2cmの物質を流下させる能力があり、現代の下水道の污水管のような役割を持っていた可能性がある。

3.7. 污水溜

污水溜は主にDK及びHR地区で見つかっており、これらは排水溝の末端に位置するという構造上の特性から、流されてきた食べ滓や糞といった固形物を沈澱させる污水溜と考えられてきた。特に規模の大きさをHR地区のFirst Streetにある2つの污水溜(写真-1、図-3参照)が目立たなければならぬと思われる。これらはそれぞれ煉瓦構造であり、互いに排水溝で接続されており、まず排水溝を通じて流れ込んできた水を片方で溜めて南側にあるもう片方の污水溜に溢れた水を流すという仕組みになっている。一昨年の調査ではこれらは土砂で完全に埋まっており、構造調査は不可能であった。

Marshall²⁷⁾によると北側の污水溜No.1は大きさが1.57m(W)×1.28m(L)×1.83m(H)であり、南側のNo.2は1.42m(W)×1.00m(L)×1.52m(H)であり、2点間の距離は19.8mであった。これらは流入口と排出口が同じ高さレベルにあることから単純に計算してNo.1で3678ℓ、No.2で2158ℓの貯留能があったことになる。また污水溜は煉瓦構造ではあったが、その詳細な構造は不明である。しかしながら、污水溜No.1での溢流分がNo.2に流入した可能性が高いことから、かつてNo.1での浸透量を上回る排水溝からの流入量があり、かつ、それが少なくとも時間的に污水溜No.1が満水になるまで続いたことを示している。

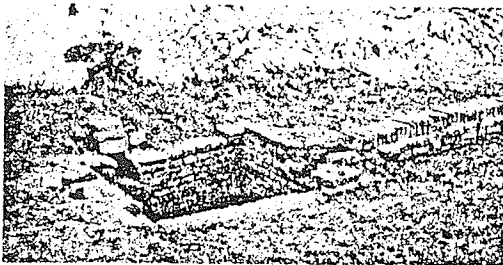


写真-1 HR地区にある污水溜²⁶⁾

3.8. 雨水流出量

雨水流出量を算定する際には対象地区の降雨量を把握する必要がある。しかしながら当時の気象状況を推定し降水量を算定することは不可能である。過去にカナダの水文学者R.Laikes³⁾がモヘンジョダロの排水溝の規模から当時の気象状況を推定したが、(1)排水溝を初めから雨水排除用として考えたこと、(2)市街地区全体からの雨水流出のみしか想定しておらず、全体の論理が余りに大ざっぱである、といった点からその考察には疑問がある。ここでは現在考えられ得る範囲での降雨量を想定して、モヘンジョダロでの雨水流出特性を考える。

3.8.1. 雨水流出量の算定式

雨水流出量を合理式によって算出する。合理式は次式で表せる。

$$Q = \frac{1}{0.36} CIA \quad (3)$$

ここに、Q:流量(ℓ/s)、C:流出率、I:流達時間内の平均降雨強度(mm/h)、A:排水面積(ha)である。

3.8.2. 流出率

一般的な流出率については従来の研究²⁸⁾により表-7に示すような値が報告されている。モヘンジョダロでは煉瓦構造物が多い上に、土壌が砂質・粘土質の混合状態であり比較的水はけが悪いことから流出率は相当に高かったと思われる。またほとんどの家屋には屋根が付いていた形跡が残されており²⁹⁾、屋根に降った雨水は壁中の排水管を通じて排水溝に流出した³⁰⁾と考えられていることから、ここでは流出率を一律0.7とする。

3.8.3. 降雨強度

現在、日本の年間降水量が約1600mmであるのに対して、モヘンジョダロ付近における降水量は年間平均100mm強であり、気候区分ではステップ地帯に

表-7 工種別の流出係数

工種別	流出係数	工種別	流出係数
屋根	0.85～0.95	開地	0.10～0.30
道路	0.80～0.90	芝、樹木の多い公園	0.05～0.25
その他の不透面	0.75～0.85	勾配の緩い山地	0.20～0.40
水面	1.00	勾配の急な山地	0.40～0.60

あたる。このように年間降水量のような長期の降水量は地域によって格差があるが、60分降雨強度のような短期のものは比較的同じような値を取ることが知られている。しかしながらモヘンジョダロにおける短期の降雨強度のデータは皆無であるので、ここでは流達時間内の平均降雨強度を代表的な値である25mm/hとした。

4. 給排水システムの考察

§3での個々の構成要素の考察を基に、ここではそれらを組合わせてシステム全体としての検証・考察を行う。今回の検証地区としてHR地区を選択した。HR地区は図-2に示すように遺跡の南端に位置しており、地区の規模、井戸の数、出土品の数から考慮して代表的な居住地区であり、水の使用頻度も高かった可能性があることから、給排水システムの検証には最適と思われる。検証をHR地区内にある一定区域で行い、その結果を基に考察を加える。

4.1. 一連の給排水システムにおける検証

この区域には図-3中のドット部に示すように「排水溝」が地図上にLane2に沿って記載されていたが、一昨年の調査では一部の煉瓦が消失したり、土が排水溝内に堆積して排水溝の断面の測定は行えず、排水溝の目視できる部分の長さ、幅と縁石の勾配を測定するにとどまった。この構造はSD地区にある排水溝No.1と同程度の規模のものであった。ここでは§3.6.での考察を踏まえて、この排水溝が80ℓ/sの流下能があったとする。さらに、地図上でこの排水溝への流域を決定し、これを検証区域とした。まず、雨水の影響を評価する。いま流出した雨水は全て排水溝へと流入すると仮定して検証区域における雨水流出量を算定すると排水面積は区域全体A=0.18(ha)であり、(3)式から $Q=8.8$ (ℓ/s)となり、これは排水溝の規模から考察して、その約10%程度にすぎない。また、表-6の排水溝の流下能力と比較しても、雨水の他にも排水があった可能性を示している。よって排水溝は雨水排除のためだけに作られた可能性は少ないと思われる。そこで雨水の他に、§3.5.で考察した生活系の排水を加えて評価する。まず§3.4.で仮定した人口密度から検証区域内の居住人口を計算する

と、 $410 \times 0.18 = 73.8$ (人)となり、約74人の人口があることになる。いまこの区域の74人全員が、使用した水を全て排水溝に流したとすると1人1日当りの水使用量が30～40ℓであるから、平均35ℓの使用量があるとして、区域全体の排出量を求めると、 $35 \times 74 = 2590$ (ℓ)となる。また、ここでは我々の通常と同じような水利用形態であったと仮定する。生活排水は時間帯による変動量が大きかったとして、日最大汚水量を日平均汚水量の2倍、時間最大汚水量を日最大汚水量の1時間当りの量の5倍、さらには瞬間最大汚水量を時間最大汚水量の1秒当りの量の10倍とすると瞬間最大汚水量は、 $2590 \times 2.0 \div 12 \times 5 \div 60 \div 60 \times 10 = 6.0$ (ℓ/s)となり、これらより考えられる流出量は15ℓ/s程度となる。しかしながら、この程度の排出量でも排水溝の規模から考えると非常に小さいことが解る。そこで何らかの特殊な水利用形態による相当な排出量の可能性を“煉瓦敷の空間”での水使用に求める試みを行ってみる。まず、仮定として体の洗浄は“煉瓦敷の空間”で行い、その他は家屋で使用し、全て排水溝に排出したものとす。また、“煉瓦敷の空間”は検証区域内に全部で6カ所ありその大きさはおおよそ5～6m²である。このような空間で2～3人が同時に使用できるとして区域全体として15人が同時に使用可能である。いま、15人が同時に使用して1人当りの最大排出量を洗面器一杯の水を1秒で使用したとして2ℓ/sとすると、排出量は30ℓ/sとなる。このとき家庭からの排出量は上記の仮定を踏まえて同様に計算して、 $20 \times 74 \times 2.0 \div 12 \times 5 \div 60 \div 60 \times 10 = 3.4$ (ℓ/s)となり、“煉瓦敷の空間”と家庭からの排出量、雨水流出量を合計して約42ℓ/sとなり、排水溝の流下能の50%程度となる。この結果から、ある一定時の同時的な、“煉瓦敷の空間”からの体の洗浄排水量は、排水溝の規模に見合ったものであると言えよう。よって、排水溝は“煉瓦敷の空間”からの排水量によってその規模が決定されていた可能性が高い。しかしながら、今回はその使用目的が体の洗浄であったかどうか明らかにできなかった。また当時の社会システムとして井戸から水を汲み上げるような仕事が職業として確立していたとして、可能な限りの揚水をしたとすれば、1人1日の水使用量も当然増加して§3.5.で述べたように50ℓ程度の1人1日水使用量を得たことになる。そうすると、

水輸送の観点から“煉瓦敷の空間”での使用水量が増加した可能性も高くなる。

4.2. 考察

水の使用目的は明らかにできなかったが、既存の排水溝の規模に見合った“煉瓦敷の空間”からの排水量が考えられる。よって排水溝は“煉瓦敷の空間”からの排水のために作られた可能性が高い。

5. 結論

以上の考察により、以下の点が考えられる、

- (1)口径が1m弱の井戸の日最大供給量は約1900ℓであった。
- (2)1人1日当りの水使用量は30～40ℓ程度、最大50ℓ程度まであった可能性がある。
- (3)大浴場には深さ約50cmの水を張る程度であった。
- (4)排水溝は一部を除き100%流量時で最低100ℓ/sの流下能がある。

6. おわりに

本研究は、一部、文部省国際学術共同研究費（代表：市川新 東京大学工学部助教授）による援助を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1)曾野寿彦・西川幸治:『死者の丘・涅槃の塔』,新潮社,p.20,1970.
- 2)Wheeler, M.:THE INDUS CIVILIZATION, 3rd ed., Cambridge Univ. Press, p.36,1968. の原図に加筆
- 3)Laikes, R. L., et al.:The Prehistoric Climate of Baluchistan and the Indus Valley, American Anthropologist, Vol.63, pp.265～281, 1961.
- 4)Marshall, J.:Mohenjo-daro and the Indus Civilization, 3 Vols, London, p.281, 1931.
- 5)Mackay, E. H. J.:Further Excavations At Mohenjo-daro, 2 Vols, New Delhi, 1938. の原図に加筆
- 6)Sultan A.Aryne, Masood H.Khan:The Control of Ground-water Table at Moenjodaro, Proceedings of International Symposium On Moenjodaro 1973, NATIONAL BOOK FOUNDATION, pp.125～147, 1975.
- 7)辛島昇ら:『インダス文明 -インド文化の源流をなすもの-』, NHK ブックス, p.143～145, 1980.
- 8)Jansen, M.:City of Wells and Drains Mohenjo-Daro Water Splendour 4500 Years Ago, p.104, 1991.
- 9)辛島昇ら:『インダス文明 -インド文化の源流をなすもの-』, NHK ブックス, p.98, 1980.
- 10)Marshall, J.:Mohenjo-daro and the Indus Civilization, 3 Vols, London, p.270, 1931.
- 11)Jansen, M., et al.:Reports on Field Work Carried out at Mohenjo- Daro INTERIM REPORTS Vol.2 Pakistan 1983-84 by the IsMEO-Aachen-University Mission, p.21, 1985.
- 12)小西正捷監修:『SAVE MOENJODARO モエンジョダロ 救おう! 人類共通の文化遺産』, ユネスコ・アジア文化センター, pp.22～23, 1993.
- 13)Jameel. A.K.:Critical Evaluation of The Measures for The Control of Ground Water-Table at Moenjodaro and Alternative Solution, (未発表), p.32, 1994.
- 14)Sultan A.Aryne, Masood H.Khan:The Control of Ground-water Table at Moenjodaro, Proceedings of International Symposium On Moenjodaro 1973, NATIONAL BOOK FOUNDATION, pp.125～147, 1975.の原図に加筆、修正
- 15)土質工学会編:土質試験法, p.352, 1980.の原表に加筆、修正
- 16)土木学会編:『水理公式集 -昭和46年度版-』, 土木学会, p.369, 1971.
- 17)辛島昇ら:『インダス文明 -インド文化の源流をなすもの-』, NHK ブックス, p.98, 1980.
- 18)Marshall, J.:Mohenjo-daro and the Indus Civilization, 3 Vols, London, p.131, 1931.
- 19)Marshall, J.:*ibid.*, p.131.
- 20)Marshall, J.:*ibid.*, p.142.
- 21)Marshall, J.:*ibid.*, p.273.
- 22)Debiprasad Chattopadhyaya/著,佐藤任/訳:『古代インドの科学と技術の歴史Ⅰ・初期段階』,東方出版, p.105, 1992.
- 23)紀谷文樹ら編:『都市をめぐる水の話』,井上書院, p.18, 1992.
- 24)市川ら:古代都市モヘンジョダロの衛生思想とその現代的意義,環境システム研究 Vol.22, pp.432～437, 1994.
- 25)Jansen, M.:City of Wells and Drains Mohenjo-Daro Water Splendour 4500 Years Ago, p.59, 1991.
- 26)Mackay, E. H. J.:Further Excavations At Mohenjo-daro, 2 Vols, Plate13-5, New Delhi, 1938.
- 27)Marshall, J.:Mohenjo-daro and the Indus Civilization, 3 Vols, London, p.280, 1931.
- 28)建設省都市局下水道部監修:『下水道施設計画・設計指針と解説 前編 -1994年度版-』, 日本下水道協会, p.63, 1994.
- 29)Marshall, J.:Mohenjo-daro and the Indus Civilization, 3 Vols, London, p.277, 1931.
- 30)Marshall, J.:*ibid.*, p.281.