

22. バングラデシュにおける地下水の砒素汚染実態とため池水の浄化による飲料水の確保

Arsenic pollution of groundwater and water supply by purification of pond water in Bangladesh

横田 漠*・瀬崎満弘*・田辺公子**・宮田建生***・廣木峰也*・アジア砒素ネットワーク・応用地質研究会

Hiroshi YOKOTA*・Mitsuhiro SEZAKI*・Kimiko TANABE*・Tatsuo MIYATA**・Minenari HIROKI*

Asia Arsenic Network(AAN)・Research Group for Applied Geology(RGAG)

ABSTRACT; Arsenic-contaminated groundwater has been found in 59 districts (as of January 1999) out of a total of 64 districts in Bangladesh where almost all drinking water is supplied from groundwater. The cause of arsenic contamination of groundwater is not clear yet, and it is estimated that about 40 million people are at risk of arsenic poisoning accordingly. The arsenic-free water supply system is, therefore, urgently needed in Bangladesh. Since March 1997 we have been investigating the causes of the arsenic contamination in groundwater and developing arsenic-free water supply systems by using the water in ponds, namely, a Pond Sand Filter system (“PSF” hereafter) in Samta village of Jessore district, which we have chosen as a model village for our research. Prior to the construction of PSF, arsenic, though at low levels, was found in the half of the ponds surveyed. PSF was completed at the end of January 1999. This paper shows the results of our investigations on arsenic pollution of pond water together with that of groundwater and the quality of the treated water by PSF.

KEYWORDS; Arsenic Contamination of Groundwater, Purification of Water, Water Supply

1. はじめに

バングラデシュでは飲料水をほとんど地下水に頼っているが、その地下水は全 64 県中 59 県において砒素に汚染されており(1999 年 1 月現在)、約 4000 万人の人々が砒素中毒の危険にさらされている¹⁾。また、地下水の砒素汚染の原因はまだ、明らかにされておらず、砒素に汚染されてない飲料水を早急に供給することが求められている。

我々は、地下水砒素汚染の原因解明²⁾と砒素に汚染されてない給水システムの開発のために、バングラデシュのジェソール県・シャムタ村をモデル村として、1997 年 3 月から種々の調査研究活動を行っている。我々が提案している給水システムの 1 つは、ため池水をハンドポンプで汲み上げ、濾過して飲料水として利用するものである(Pond Sand Filter:PSF と以降略称)。バングラデシュではため池は至る所に多く見かけられるため、この活用は簡便な水供給方法となる。表面水は砒素に汚染されていないといわれていたが、PSF の建設に先立ち、14 個のため池の水質調査を行ったところ、半分の池から低レベルの砒素(0.01-0.04mg/L)が検出された。そこで我々は、池水の砒素汚染の原因調査を行った³⁾。また、PSF システムは 1999 年 1 月の終わりにシャムタ村で完成し、ここ 2、3 ヶ月試運転されている。

本論文は、地下水の砒素汚染実態とその溶出について、また、ため池水の砒素汚染調査結果と PSF による処理水の性質について述べるものである。

*宮崎大学土木環境工学科 Civil & Environmental Eng.,Miyazaki University, **宮崎大学機器分析センター Materials Research Center,Miyazaki University, ***宮崎市水道局 Water supply Bureau, Miyazaki City

2. シャムタ村の地下水砒素汚染

2.1 井戸水の砒素汚染調査

乾季の1997年3月、我々はシャムタ村(人口約3,600人)で飲料水用の全井戸(282個)の砒素濃度を調査した。分析はGutzeit比色分析に基づくフィールド・キットによって行った。Fig.1は測定結果をシャムタ村の地図上にプロットしたものである。その結果、95%の井戸で砒素濃度が0.01mg/L(WHOガイドライン)を越えており、0.05mg/L(バングラデシュ基準)を越えるものが90%以上もあった。その他に、砒素の分布は北部から南部にかけて高くなる傾向が見られ、0.50mg/L以上の高濃度汚染地域は南部で帯状に東西に分布していることなどがえられた。

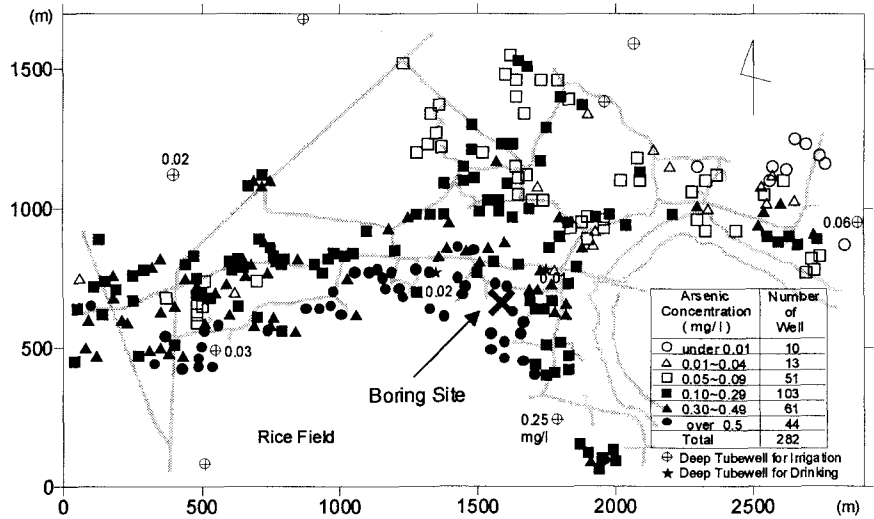


Fig.1 バングラデシュ・シャムタ村の地下水砒素汚染分布 (1997年3月)

2.2 砒素濃度と地下水流動

1998年5月(乾季)に井戸(38個)の地下水位を測定し、地下水位等高線をえた(Fig.2)。これより、地下水が北部から南部に流れ、南部地域で滞留し、東部のベトナム川に流れ込むことが推察された。砒素濃度分布(Fig.1)と比較

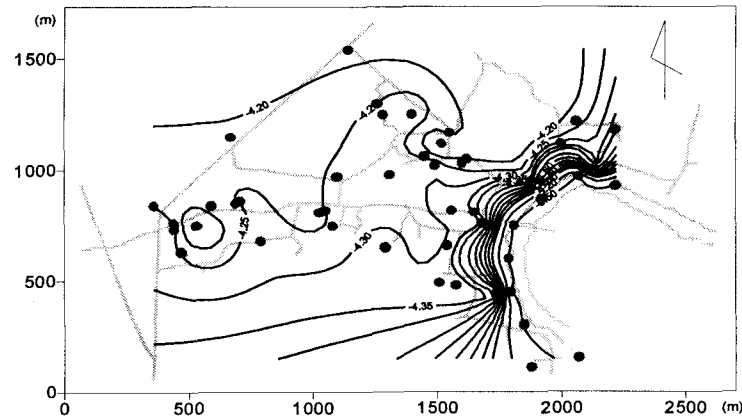


Fig.2 乾季の地下水流動 (1998年5月)

すれば砒素の高濃度地域と地下水の滞留域がおおよそ一致しているといえる。滞留状況は地下水の環境を還元下にする。帯水層に鉄と共沈していた砒素が還元下で地下水中に溶けだすことが考えられる。これについては次に述べるボーリング試験のコアサンプル分析を通じて現在、研究中である。

2.3 シャムタ村の地質層序

1998 年 5 月にシャムタ村の中央部周辺(Fig.1 参照)で行ったボーリング試験やバングラデシュ政府の深井戸掘削時におけるデータより、シャムタ村の地質層序は Table 1 に示すように、最上部砂質層、上部泥質層、上部砂質層、下部泥質層、下部砂質層に区分できることとなった。また、ハンドオーガー等による表層厚調査の結果、上部泥質層は農地では 3～10m と厚く居住区では薄くなる傾向があるものの、居住区でもボーリングサイト付近を中心に層厚が 10m に達する箇所があり、これは大体、砒素の高濃度汚染地域 (Fig.1 の砒素濃度 0.50mg/L 以上の地域) と重なっていることなどが推定された。

Table 1 シャムタ村の地質層序

層	深度 (m)	層厚 (m)	層相	帯水層
最上部砂質層	0～3	0～3	極細粒砂 ～ 粗粒シルト	宙水の帯水層
上部泥質層	5～10	0.5～12	粘土 , シルト	難透水層
上部砂質層	98～110	90～100	上部：極細粒砂 ～ 細粒砂	第1帯水層
			中部：細粒砂 ～ 中粒砂	
			下部：中粒砂 ～ 粗粒砂	
下部泥質層	135～150	25～35	粘土 ～ 極細粒砂 (不連続)	難透水層
下部砂質層	220+	90+	極細粒砂 ～ 中粒砂 (部分的に粘土に挟まれている)	第2帯水層

2.4 砒素含有量と溶出試験結果

ボーリング試験で得られたコアサンプルの砒素含有量と溶出試験を行った。砒素の含有量はFig.3(a)に示すように、そのピークは上部泥質層にあり、その泥質層に吸着されていた砒素が地下水に溶出してきた可能性も考えられる。

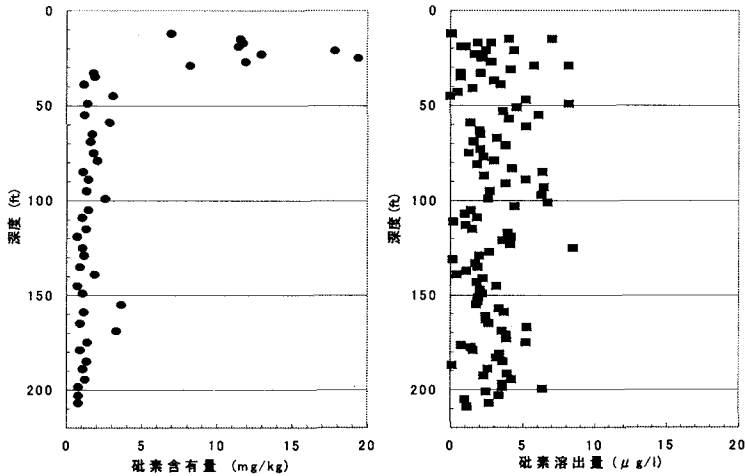


Fig.3(a) コアサンプルの砒素の含有量 Fig.3(b) コアサンプルの砒素溶出量

しかし、そのピーク濃度は 20mg/kg(深さ 6m)とそれほど高い値ではなく、また、溶出試験の結果(Fig.3(b))では泥質層から最高値で大体 8 μg/L、砂質層から同じく 6 μg/L の砒素の溶出が認められ、両者に大差は見られなかった。これについてはなお、今後も検討をつづけてゆくが、ここでは砒素溶出に関する酸化説と還元説の両方を伺わせるデータがえられたことを示しておく。1 つは、井戸の水質分析結果から鉄イオンはほとんど 2 価の状態であり、また ORP (酸化還元電位)は負の値を示すなど、地下水は還元状態にあり、さらには 2 価鉄と砒素の相関が高いというデータ (還元説) がえられているということである。他の 1 つは、サンプルの鉱物定量分析の結果から上部泥質層に砒素を

含む黄鉄鉱が確認されたということであり、これは雨水が同地層を浸透することに伴って黄鉄鉱が酸化作用を受け、それによって砒素が溶出したという酸化説のデータを提供していると考えられる。

3.池水の砒素汚染

3.1 池水の砒素汚染原因調査

PSF の対象ため池に 0.04mg/L の砒素が検出されたため、PSF 建設に先立ちシャムタ村の 14 個のため池を対象として水質調査を行い(1998 年 5 月)、対象ため池の砒素汚染の原因を調べた。調査を行った池の位置を Fig.4 (PSF の対象ため池は P4)に示す。砒素を含む地下水がため池に浸透した可能性を調べるため、池のすぐ近くの井戸の水位を測定した。また、シャムタ村には污水处理システムが存在しないため、井戸からの排水は主にため池に注ぐ。

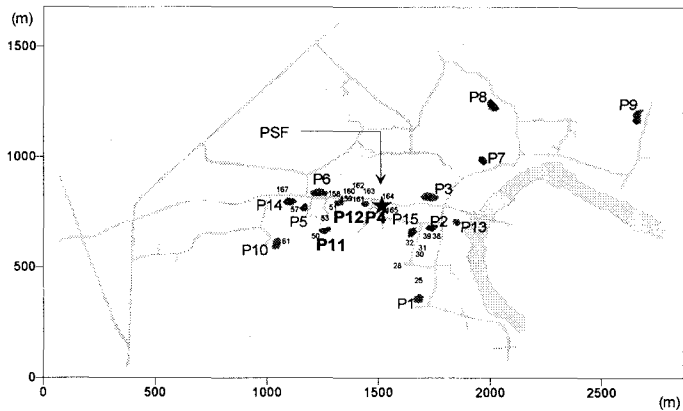


Fig.4 シャムタ村における調査対象のため池の位置

この 2 点を中心にして調査が行われたが、池水の砒素濃度、電気伝導率(EC)、酸化還元電位(ORP)、pH、温度、池水の濁度の測定結果を Table 2 に示す。

Table 2 ため池水質測定結果

Pond	As	Water level (m)		Turbidity	EC (μ S/cm)	pH	ORP (mV)	Temp ($^{\circ}$ C)
	(mg/l)	Pond	Well					
P1	0.02			Turbid	525	8.7	145	35.1
P2	0.00			Turbid	488	9.3	124	33.3
P3	0.02	-2.68	-4.31	Turbid	545	8.7	165	33.9
P4	0.04	-2.95	-4.27	Turbid	711	8.6	146	33.8
P5	0.00	-2.41	-4.26	Turbid	523	8.4	166	35.7
P6	0.00	-3.29	-4.27	Clean	786	7.7	119	36.6
P7	0.00			Clean	408	8.8	156	34.3
P8	0.02			Turbid	555	8.0	165	35.1
P9	0.03			Turbid				
P10	0.04	-3.19	-4.17	Clean	417	9.0	138	36.0
P11	0.03	-3.21	-4.35	Turbid				
P12	0.00	-1.54	-4.27	Turbid				
P13	0.00	-2.79	-4.14	Clean				
P14	0.00	-3.55	-4.21	Clean	359	8.4	140	

Table 2 に示すように、14 個の池のうち 7 個の池から低濃度の砒素が検出された。また、9 個の池に関してその水面水位と近くの井戸の水位を比較したところ、すべて池水の水位の方が高いことがわかった。このことから地下水のため池への浸透は考えられないこととなった。

井戸からの排水はため池に流入する。P11 近くの井戸(As=0.60mg/L)の排水は、まず井戸のそばの水たまりに留まり、それからため池に流れてゆく。その水たまりとため池の砒素濃度はそれぞれ 0.40mg/L、0.03mg/L であった。また、PSF の対象池 P4 でも井戸排水が溝を通して流入しており、P11 と同様な砒素汚染が認められた。また、P12 の近くに砒素に高濃度汚染された井戸(As=1.16mg/L)があり、その排水がおよそ 10 年にわたって P12 に流れ込んでい

た。しかし、その井戸は2年程前に封印され、飲用のために新しい深井戸が同じ位置に取り付けられた(この深井戸の砒素濃度は、0.03~0.07mg/Lの範囲中で変化している)。このような砒素汚染の歴史にもかかわらず、P12の池水からは砒素が検出されなかった。これは過去2年間に砒素が池の底に沈澱してしまったためとみなされる。

これらの調査から、ため池の砒素汚染は井戸からの排水の流入が主原因であると考えられる。我々は1999年5月(乾季)にP4池の再掘削を行い、池底汚泥の除去とその分析を行う予定である。

また、砒素によって汚染された7個の池中6個の池で濁りが見られた。それは富栄養化に起因した青緑色、褐色のものであった。濁りのみられなかった池の数は5個であったが、そのうち4個の池では砒素が検出されなかった。また、砒素汚染された池の底には汚泥が厚く堆積しており、砒素汚染のない池では巻き貝のような生物が見つかった。このことから池底の嫌気性状態は砒素汚染で主要な役割を果たしている可能性が示唆されている。

4. Pond Sand Filter (PSF)

4.1 PSF の概要

PSFは2つのシステムからなる(Fig.5)。1つはAIH&PH (All Indian Institute Hygiene Public Health)によって開発されたHorizontal Roughing Filter⁴⁾(以後HRF)であり、もう1つはSlow Sand Filter(以後SSF)である。HRFの断面は1.0 m(W)×1.4 m(D)であり、入水口、3槽の濾床、放水口の5つの部分からなっている。濾床の第1、第2、第3槽はそれぞれ長さが1.0、2.0、2.0mで、直径15mm、10mm、5mmの砂利が敷き詰められている。入水口と放水口の長さはいずれも0.8mである。各槽の隔壁には多数の小孔があり、源水は3つの濾床槽を水平に流れてゆく間に沈殿・濾過されていく。HRFはSSFのための代替的な前処理として取り付けられている。

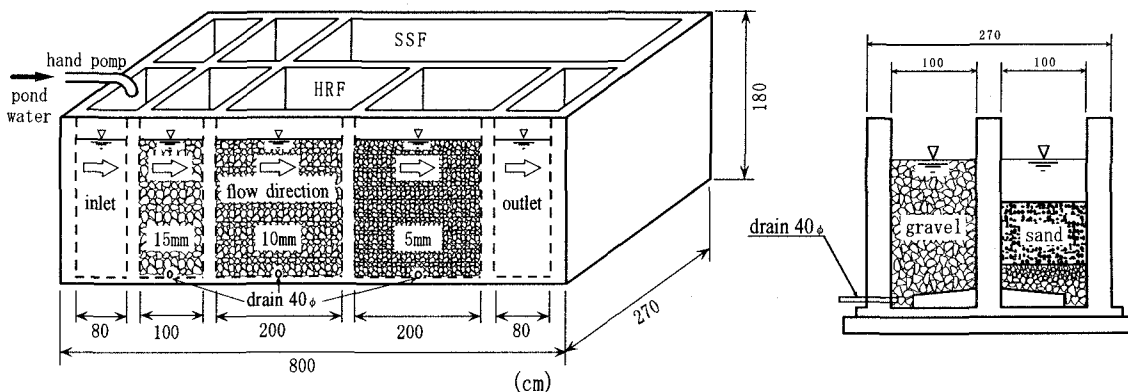


Fig.5 PSF (Pond Sand Filter) の構造

PSFは水処理容量が1000L/hとして設計されている。1日3時間の運転で、1人の飲水量を6L/day、1世帯5人にとすると、約100世帯に供給できることとなる。

4.2 HRF のモデル試験

HRFについてデータ不足のため、宮崎大学で1/2サイズの模型実験を行った。その原水はカオリンの人工的懸濁液を用いた。原水が模型HRFの濾過槽を水平に約5時間かけて流れた後、放水口中の処理水のカオリン濃度を測定した結果、原水のカオリンが高、中、低濃度のいずれの場合でも大体、濃度はFig.6に示すように1/10に低下した。シャムタ村のPSF水源の池水濁度は大体50度(カオリンの場合で50mg/L)未満であり、これが5mg/l未満に減少するので、HRFはSSFの前処理としてよく機能するものといえた。

4.3 シャムタの中のPSF試験結果

PSFは、シャムタ村で1998年10月から1999年1月の間に建設された。水源のため池はP4であり、井戸からの排水はその期間に流入しないように処置された。PSFの建設終了後の1999年1月(排水流入防止の3ヶ月後)、P4

ため池水の砒素濃度を測定した結果、砒素は検出されなかった。これは前述の池(P12)のように砒素がため池の底に沈殿したためと考えられた。

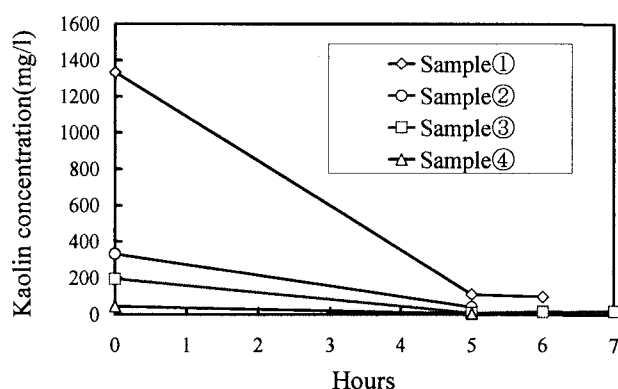


Fig.6 HRF による濁度の除去(模型実験)

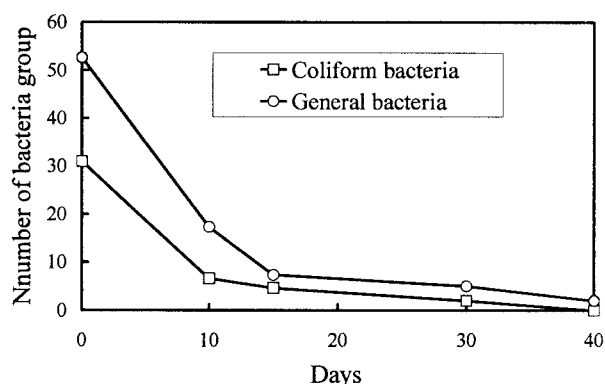


Fig.7 PSF による細菌類の除去(シャムタ村)

その後、40 日間にわたって PSF 処理水の水質を測定した結果、一般細菌群数、大腸菌群数は Fig.7 に示すように減少し、1999 年 3 月初めより処理水は飲用に供されている。1999 年 3 月 12 日に P4 ため池水の砒素濃度を測定したところ、0.01mg/L が検出された。これは PSF 利用により池の水量が減少し、乾季のため雨水の補給もないため、池の水位が低下し、池底で沈殿していた砒素が影響したものと考えられる。しかし、その時同時に、HRF の放水口の中の大腸菌群数と砒素濃度を測定したところ、大腸菌群数は 4 であり、砒素は検出されなかった。これは HRF の優秀な浄水能力を示しているといえる。4 月上旬に P4 ため池水の水深が 1m 程となったため、処理水の供用は中止され、4 月－5 月にかけての P4 再掘削を待っている状況である。

5. 結論

バングラデシュ・シャムタ村における地下水・ため池のヒ素汚染状況の調査およびため池水の沈殿濾過による浄化槽 (Pond Sand Filter:PSF) の試運転の結果から次のようなことがいえる。

- 1) 地下水への砒素溶出機構として還元説と酸化説の 2 つが言われているが、その両方を示唆するようなデータがえられた。
- 2) ため池の砒素汚染の主要な原因は砒素汚染された井戸からの排水の流入である。
- 3) 池底の嫌気性状態がため池水の砒素汚染の 1 つの要因になっている傾向がある。
- 4) HRF (SSF のための代替前処理システム) は原水のバクテリア類や濁度をよく除去できる。
- 5) シャムタ村に設置した PSF は非常によく機能している。

謝辞

本研究はバングラデシュ・ラジャヒ大学のラーマン教授、バングラデシュ工科大学のフェローゼ教授や予防社会医学研究所のアクタール医師等の協力、および文部省科研国際共同研究の補助のもとで行われた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Sk.Akhtar Ahmad, et al., "Health Effects due to Arsenic Toxicity in Bangladesh", The 3rd Forum on Arsenic Contamination of Ground Water in Asia, pp5-6, 1998.11.
- 2) 横田 漢、他、「バングラデシュにおける地下水のヒ素汚染調査結果」、第2回環境地盤工学シンポジウム、地盤工学会、pp59-64、平成 9 年 11 月。
- 3) 横田 漢、他、「シャムタ村におけるため池の砒素汚染調査とため池水の飲料水利用のための浄水装置」、第3回アジア地下水砒素汚染フォーラム、pp.73-76、1998.11.
- 4) K.J.Nath, et al., "Horizontal Roughing Filter-An Appropriate Pretreatment Method for Upgradation of Traditional Surface Water Sources", Bulletin on Ground Water, pp81-86.