

# Bangladesh の地下水砒素汚染と解決への取り組み

Arsenic Contamination of Groundwater and its Countermeasures in Bangladesh

横 田 漢 (よこた ひろし)

宮崎大学教授 工学部土木環境工学科

瀬 崎 満 弘 (せさき みつひろ)

宮崎大学助教授 工学部土木環境工学科

田 辺 公 子 (たなべ きみこ)

宮崎大学講師 産学連携支援センター

Miah M. Hussainuzzaman (ミヤ フサイヌジャマン)

宮崎大学大学院 工学研究科博士後期課程

## 1. はじめに

ガンジス川流域は上流から下流まで地下水が砒素に汚染されている。下流域のインド西ベンガル州やバングラデシュでは、砒素汚染の発見がそれぞれ、25年前および14年前と古いため調査が進んでおり、飲料水対策も一定程度なされている。しかし、ネパールやガンジス川の中流域では、砒素汚染の発見が2000年以降と最近のため、汚染実態も不明な部分も多く、対策も今後の課題となっている。

砒素汚染は、ガンジス川の他にヒマラヤ山系にその源を發するインダス川、イラワディ川、メコン川、ホー川(紅川)および黄河などの流域でも発生している。ヒマラヤ山系には造山運動に伴って形成された変成帯(ハイヤーヒマラヤ)があり、ヒマラヤ山脈の中央に広く分布している。ガンジス川やその他の川もその変成帯を流れているので、砒素鉱物の源は熱変質を受けたハイヤーヒマラヤにあると筆者らは考えている。

砒素鉱物を含む岩が砕屑・風化されながら、ガンジス川底や氾濫原または海底に堆積して地層を形成し、帯水層中での化学・生物学的な反応により砒素が地下水へ溶出していった。砒素の溶出機構の詳細については文献1)を参照されたい。

筆者らは、1996年よりNPO「アジア砒素ネットワーク(以降 AAN と略記)」およびNGO「応用地質研究会(以降, RGAG と略記)」と共同して、バングラデシュにおける地下水の砒素汚染実態と汚染メカニズムの解明、および代替水源装置の開発に取り組んできた<sup>2)</sup>。

これらの成果を踏まえて、2002年からガンジス川の支流であるネパール・テライ平原で調査・対策を行ったが、治安上の問題で2005年にストップしている。さらに、テライ平原から多くの支流が流入するガンジス川中流域・ウッタルプラデシュ州(以降 UP 州と略記)で調査を2006年より始めている。なお、テライ平原とUP州の調査は宮崎大学の全学的プロジェクトでもあり、本学における国際貢献の大きな柱になっている。また、UP州の砒素汚染ミティゲーションを対象に、本学はJICA 草の根技術協力事業を AAN と共同して来年度より実施する運びにある。

本文では、これらの活動の中でもっとも成果が得られ

ているバングラデシュでの調査や対策等の取り組みを紹介したい。それを通じて、地盤工学技術者の国際貢献や現地への技術移転のあり方を考えてみることにする。

## 2. 砒素汚染状況と砒素ミティゲーション

### 2.1 砒素汚染状況

バングラデシュで地下水の砒素汚染が最初に見つかったのは1993年、ガンジス川沿いの西の端、インド西ベンガル州と接する地域であり、慢性砒素中毒患者もそこで1994年に初めて8人確認された。当時、インド西ベンガル州ではすでに広範囲な砒素汚染地域が認められ、慢性砒素中毒患者も20万人に及ぶと言われていた。

イギリス国際開発部局(DFID)がバングラデシュ政府公衆衛生工学局(DPHE)と共同して、1998~2000年に全国レベルの地下水のサンプリング調査を行った。その結果、東南のチッタゴン山岳地帯を除いて、全国的に地下水が砒素に汚染されていることが分かった。これらの地下水汚染データを統計的に解析した場合、飲用許容値(50  $\mu\text{g}/\text{l}$ )以上の井戸水を飲用している住民は、約2900万人にのぼり、将来癌にかかる人の数は375000人と推定されている。

2002年2月より政府は、これまでの調査結果を踏まえて、許容値(50  $\mu\text{g}/\text{l}$ )を超える地域を対象として、世銀援助のもとで全国レベルの詳細調査を開始した。対象地域は270郡(全国の郡数は469郡)であり、各郡においてすべての井戸水のスクリーニングと代替水源装置の建設が行われた。その結果、許容値を超える井戸の割合は30%であり、汚染率(許容値以上の井戸数の割合)が80%を超える村の割合は15%であった。また、慢性砒素中毒の皮膚症状を有する人は約38500人であった<sup>4)</sup>。この調査結果を受けて、バングラデシュ政府は汚染率が80%以上の村を対象にして、2005年度から代替水源装置の建設を始めている。

### 2.2 宮崎大学を中心とした研究活動

宮崎大学は AAN とともに、1996年に初めてバングラデシュを訪問し、翌1997年より2000年までRGAG, NIPSON(国立予防社会医療研究所, バングラデシュ)およびBUET(バングラデシュ工科大学)と共同で、ジェソール県シャムタ村をモデル村として、地下水の砒素濃度や地下水流動などの詳細調査を実施した。なお、

RGAGは地質学エンジニアを中心とする日本のNGOであり、地下水流動などの調査解析を担った。

図-1にシャムタ村のすべての井戸の砒素濃度を示しているが、50 μg/lを超える砒素濃度を持つ井戸が90%以上になることを明らかにした。この砒素汚染マップを利用して、我々は代替水源装置の設置場所などを決定したが、そのスタイルはその後、世界銀行、JICAなどが実施した砒素汚染調査の際の典型的な方法となった。また、我々は、この砒素分布を説明しようとする砒素汚染メカニズムを追及し、砒素は還元下で地下水に溶出するという結果を得た<sup>3)</sup>。

我々はまた、代替水源装置としてポンドサンドフィルター (PSF) を開発した。PSFは池の水(砒素は含まれていない)を砂利槽と砂槽によりろ過するもので、全インド衛生公衆健康研究所(AIIH & PH)のPSF<sup>5)</sup>を改良したものである(図-2参照)。PSFは今や地域社会の水供給システムにおける代表的な装置となっており、今までに約30基のPSFがAANにより設置されている。

シャムタ村の砒素対策青年委員会は、我々と一緒にPSF設置に携わって技術を吸収し、今では代替水源装置の専門家として成長している。AANバングラデシュ(NGO)の専門スタッフとしてここ数年来働いている。

しかしながら、乾季には池の水が少なくなるので、PSFの使用は困難となる。それゆえ、PSFのハイブリッド利用として、乾季の間に井戸水(砒素汚染水)を注入し、砒素除去装置として利用する研究が本学を中心にして行われた。

実験は2002年から始まり、成功裏に終わっている。その後、Hybrid型PSFは砒素除去専用装置、GSF

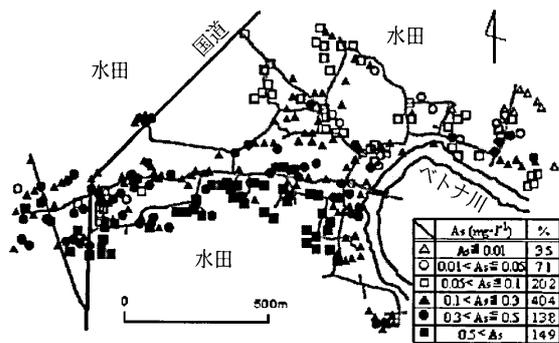


図-1 シャムタ村の砒素汚染分布状況

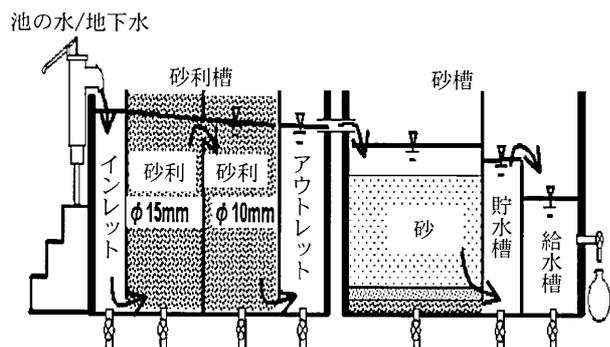


図-2 PSF/GSFの構造

(Gravel Sand Filter)へと発展した。その実験は2番目のモデル村、ジェソール県マルア村で行われた。その性能の一部を図-3に示す<sup>6)</sup>。同図は80世帯用のものであるが、その後、中規模(50世帯用)GSFも開発され、現在4基のGSFが定期的なメンテナンスの下で安全な水を供給している。

GSFによる砒素除去は、地下水中に高濃度に含まれる鉄分(数mg/l)の共沈により行われる。鉄と砒素との共沈物質は礫タンク中の礫間に沈殿する。この砒素スラッジは定期的なメンテナンス時にGSFから排出される。

砒素スラッジの溶出試験結果を図-4に示す。砒素スラッジ単体とセメント混合された砒素スラッジからの砒素溶出割合を示しているが、同割合はスラッジ中の全砒素量に対して表現されている。セメントを混合しないスラッジ単体でも、スラッジ中の砒素量の約90%以上がスラッジ中に残留している。この残留率は、スラッジ重量の2%および10%のセメント混合率に対して、それぞれ94%と96%に増加している<sup>7)</sup>。これらの試験結果は、今後のスラッジ処理方法を考える際の基本的なデータとなるだろう。

なお、マルア村の砒素対策青年委員会は我々と協力して、GSFの改善とメンテナンスを行ってきている。その結果、GSFに関する技術は彼らに移転されている。スキルアップしたメンバーはJICA/AANプロジェクトおよびAANバングラデシュ(NGO)で現在活躍している。

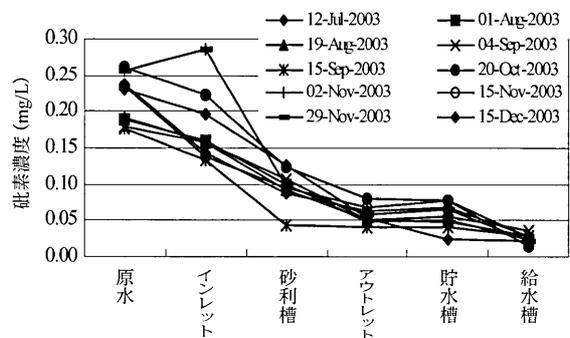


図-3 GSFの砒素除去性能

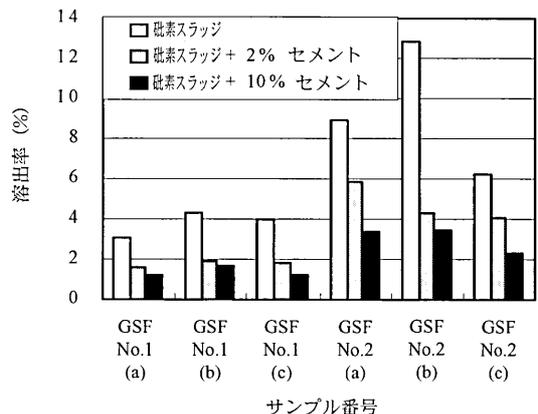


図-4 砒素スラッジ中の砒素の溶出割合

## 論 説

## 2.3 AANを中心とした砒素汚染ミティゲーション

AANは前述した1997年からのシャムタプロジェクトにコーディネータとして活躍した。現地のカウンターパート (NIPSOM) との折衝, シャムタ村での砒素対策委員会の立ち上げ, 宮崎大学やRGAGとの活動調整などを行ってきた。

バングラデシュ住民は砒素の怖さを知らなかった。砒素を含む井戸水は苦くも痛くもないので, 当然といえば当然であり, 例えば故障した代替水源装置はそのまま放置される。砒素の怖さを知らない限り, 設置された代替水源装置のメンテナンスは行われない。

したがって, AANの活動はまず, 砒素に関する啓発活動から始まり, 砒素対策委員会などの設立・運営を通じた自治意識の確立, および代替水源建設費の10%住民負担を通じた主体性の確立などへの支援を行ってきた。活動内容をまとめていけば, 啓発, 健康管理, 代替水源建設をあわせた総合的な砒素ミティゲーション活動である。

このような活動がベースとなって, AANは, 前述した2002年からの全国レベルの砒素汚染詳細調査の一環を担う形で, JICA技術協力事業(開発パートナー事業)を行った。一つの郡(シャシャ郡)を対象として, 日本人スタッフ数名と現地スタッフ30数名による3年にわたる活動であった。その結果, JICAおよび外務省から絶賛をあげるような成果をえた。

その成果を受けてAANは2005年から3年間のJICAプロジェクト(PROTECO)を実施中である。前述の80%汚染村の代替水源建設に関連したものであるが, ジェソール県内2郡(シャシャ, チョウガチャ)を対象としたこのプロジェクトは, 将来, 海外からの支援がなくなっても, バングラ政府・国民が自前・独力で砒素ミティゲーション事業を展開できるための仕組みづくりが主要な目的となっている。

そのため, 村, 郡, 県の各レベルで砒素対策委員会が構築され, 彼らが自主的に健康管理と代替水供給を維持運営できるように, AANから派遣された長期および短期専門家がそれぞれ5~6人, 現地政府のスタッフと協働しながら各種の技術移転を行っている。

AANバングラデシュ(NGO)は, 2004年からPROTECOとは異なった砒素対策プロジェクトをバングラデシュ・ロータリークラブなどから委託されて実施している。前者(PROTECO)のスタッフの数は約30名で, 後者は10名である。

宮崎大学は, AANの行う代替水源装置の選定や建設後の技術的トラブルに関して, 専門的な技術支援を行っている。RGAGは例えば, 深井戸(代替水源装置の一つ)建設の際の地質学的な技術支援を行っている。

AANはJICAプロジェクトを通して, 啓発, 健康管理および代替水供給に関する実用的な技術を開発してきている。一方で宮崎大学とRGAGは前述のように, その理論的知識を担っている。その結果, 理論と実践を兼ね合わせ, かつ途上国に見合った有効な技術が移転され

ているといえる。

## 3. バングラデシュにおける砒素汚染ミティゲーションの今後—各国の援助活動内容

バングラデシュの砒素ミティゲーションは, ほとんどユニセフ, 世界銀行などの国際機関, およびDFID(イギリス), DANIDA(デンマーク), JICAのような各国の国際協力機関などの援助協力の下で行われている。それらの最近の動向とともに, 最近の砒素ミティゲーションの状況を述べれば次のようである(JICAバングラデシュからの聞き取りによる)。

## 3.1 DFID(イギリス国際開発部局)

DFIDは2002年7月, バングラデシュ政府地方行政局内に砒素政策サポートユニットを設立して, 代替水源装置のリスクアセスメントや砒素中毒患者の分布調査などを行ってきたが, 2006年度より, 各中央省庁の上位に位置する「計画委員会」をカウンターパートとした砒素対策活動を展開する準備をしている。これは世銀のマネージメントのもとで行われ, 地下水管理調査と「計画委員会」への技術協力(調査, トレーニング等)が主な活動内容となっている。

## 3.2 ユニセフ

ユニセフは, 全井戸調査, 啓発活動, 住民参加を通じた代替水源設置, 砒素中毒患者へのサポートを行ってきた。今後は, これまでの都市給水, 村落給水, 砒素対策の3部門を「水供給部門」に統合した形で活動を展開するようになっている。新たに選んだ123郡を対象として活動を行う。これらは2010年までのプロジェクトであるが, 開始は2007年ぐらいからと思われる。

## 3.3 DANIDA(デンマーク国際開発庁)

DANIDAはこれまでに, ①政策実施ユニットのバングラデシュ政府地方行政局内の設置, ②都市水供給, ③農村水供給, ④砒素ミティゲーション, などを行ってきたが, 2006年からは活動の内容自体はこれまでとは大差はないが, 考え方は大きく変わっている。すなわち, 「砒素ミティゲーション」をなくして, 「水供給, 衛生分野の戦略づくり」というように, 水供給を一つの枠組みにまとめている。また既存の中央集権システムではなく, 活動の主体を地方に移行する, というように変わっている。

## 3.4 CIDA(カナダ国際開発庁)

砒素除去装置の検証プロジェクトを政府公衆衛生工務局(DPHE)と共に進めている。第1フェーズは1999年~2004年に終わり, Lead-F, SONO, ALCAN, SIDCOの四つの砒素除去装置が認可を得ている。第2フェーズは2005年末から4,5年の予定で始まっている。内容は7~10の砒素除去装置を新たに検証するとともに, 第1フェーズでの4砒素除去装置の社会的およびフィールド的な通用性をユニセフと共同で検証するようになっている。

## 3.5 世界銀行

2000年~2004年までの全国的な全井戸調査の資金援

助(借款)をしてきた。2005年7月からは5年計画で、バングラデシュ水供給プロジェクト(無償援助)を開始している。活動内容は、①村落パイプ給水300基、②都市給水事業(新規ではなく規模拡大:3都市)、③コミュニティベースの代替水源2000基の設置などとなっている。フィールドでの展開としては活動を砒素に特化せず、水供給全般に広げようという趣旨が見られる。一方、砒素ミティゲーションに関してはDFIDと連携して、計画委員会をカウンターパートとした政策支援の活動を開始するようになっている。

### 3.6 JICA

JICAはこれまでに、①西部3県の深層地下水開発調査(2000年5月~2002年11月)、②シャシャ郡における開発パートナー事業(2002年1月~2004年12月、AAN)、③ユニセフとの共同代替水源装置調査、④深層帯水層データベース作成という4事業を展開している。また2005年12月より、⑤ジェソール県持続的砒素対策プロジェクト(2008年12月まで、AAN)を始めている。

②と⑤について少し補足する。②は前述したJICA技術協力事業(開発パートナー事業)であり、その成果の一つは三日月湖を水源としたパイプ給水の建設である。バングラデシュ農村には水道施設はないので、非常に評判が良く、ユニセフでも同様のシステムが河川水を使って建設予定となっている。

⑤前述したPROTECOである。ここでは代替水源装置としてダグウェル(直径2mほどの井戸、表流水が水源であるため砒素汚染なし)、深井戸(砒素汚染された浅水層との間に粘土層があれば砒素を含まない)およびPSFなどが考えられている。しかし、これらの代替水源装置の選択が不可能な村(80%汚染率村)があり、ここではGSFを併用することが考えられている。そのため、筆者らはその設計規格づくりに参加している。

## 4. おわりに

上述したように、宮崎大学は1997年シャムタ村で、2002年からマルア村で、ついでネパール(2002~2004年)とUP州(2006年より)のモデル村で砒素対策プロジェクトを実施してきた<sup>8)</sup>。すべてのプロジェクトはAAN, RGAG およびカウンターパートとともに実施してきている<sup>9),10)</sup>。

AANの主な役割は、プロジェクトを計画し、実施に当たって各機関との調整を行うことにある。また、本学およびRGAGは現地の課題解決のために調査・実験・対策を担ってきた。

我々が調査・対策などを行う際、どうしてもその地域の風土、習慣、価値観などの問題に遭遇する。それらの問題に矛盾しない形で調査・対策などを行ってゆかねばならない。しかし、時には我々にも譲れない価値観がある。その折は、互いの価値観のぶつけ合いも必要となる。

いずれにしても地域の砒素対策委員会などとの共通理解や協同なくして、砒素ミティゲーション活動は成功しない。AANがこの共通理解や協同の土俵づくりを行っ

てきた(私はAANの副代表でもあり、RGAGもほぼ全員がAANのメンバーであり、皆もその努力はしてきた)。

AANには土木工学、地質学、化学、生物学、人類学、社会学、経済学、写真家、医者、著述業、主婦などいろんな分野のスタッフが存在している。AANのもつ多様性がなければ、これまでの砒素ミティゲーションの成果は得られなかったであろう。

バングラデシュで我々は10年間活動してきた。確かに現地でも砒素ミティゲーションの成果はあがっている。しかし、筆者らも地盤工学技術者から地質化学・生物学を踏まえた地盤環境学技術者へと、または水質化学者から地下水水質化学者などへとヴァージョンアップしている。

大学の役割の一つは、研究の成果を社会に、特に発展途上国に還元することにある。その還元を通じてさらに研究成果をあげてゆく。この場合、国内外のNGOとの協力が不可欠となるが、その協力は結局、途上国でのネットワークとコミュニティ形成へとつながってゆく。これは我々の持続可能な発展にとっての基盤であると考えられる。

### 参 考 文 献

- 1) 横田 漢: 地下水・土壌汚染の基礎から応用, 第10章 海外における砒素汚染, 日本地下水学会編, pp. 223~251, 2006.
- 2) 横田 漢・瀬崎満弘・田辺公子・Ahmed, F.・Rahman, H.: バングラデシュにおける地下水砒素汚染の機構解明と汚染対策の実践, 第8回地球環境シンポジウム講演論文集, 土木学会, pp. 51~56, 2000.
- 3) 田辺公子・横田 漢・廣中博見・Rahman, H.・Ahmed, F.: バングラデシュにおける地下水の砒素汚染について—シャムタ村における砒素濃度特性と溶出メカニズムに関する一考察—, 水環境学会誌, 第24巻, 第6号, pp. 367~375, 2001.
- 4) BAMWSP: <http://www.bamwsp.org/>
- 5) Nath, K. J., Adhya, A. K. and Majumder, A.: Horizontal Roughing Filter—An Appropriate pre-treatment method for upgradation of traditional surface water sources, Bulletin on Ground Water, Technical Bulletin of IWWA, Calcutta Center, pp. 81~86, 1997.
- 6) Yokota, H.: Arsenic pollutions of groundwater in the world and arsenic removal unit installed in Bangladesh, Keynote Lecture, Vietnam-Japan Joint Seminar on Geotechnics and Geoenvironment Engineering, Hanoi, November, pp. 226~242, 2004.
- 7) Hussainuzzaman, M. M. and Yokota, H.: Performance of Arsenic Removal Unit Installed in Bangladesh and Cement Solidification of Arsenic Sludge from the Unit, Proc. of 16th Intern. Conf. on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering, pp. 2379~2382, Sept., 2005.
- 8) Sezaki, M., Hussainuzzaman, M. M., Tanabe, K. and Yokota, H.: Mechanisms of Arsenic Contaminations of Groundwater in the Ganges, Proceeding of 13th ARC 2007, Dec., 2007 (in press).
- 9) 川原一之: アジアに共に歩む人がある, 岩波ジュニア新書.
- 10) 上野 登: 土呂久からアジアへ, 鉾脈社.

(原稿受理 2007.1.10)