

講座

## アジア地域における地下水環境

### 4. ガンジス川流域における地下水砒素汚染

横田 漠 (よこた ひろし)

宮崎大学教授 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

瀬崎 満 弘 (せざき みつひろ)

宮崎大学准教授 工学部土木環境工学科

#### 4.1 はじめに

地下水の砒素汚染は、現在、アジアや南北アメリカなど世界各地で起こっている。例えばアジアでは、ガンジス川、インダス川、メコン川、ホー川（紅川）および黄河など、ヒマラヤ山脈・チベット高原にその源を発している大河川の流域でみられている。このアジアにおける砒素汚染は、インド西ベンガル州（ガンジス川下流域）では1982年から、また黄河流域の中国内モンゴル自治区では1989年から知られていたが、その他のパキスタン、カンボジア、ベトナムなどでは2000年前後に確認されたばかりである。これらの流域における地下水砒素汚染状況については別に報告した<sup>1)</sup>。

ここでは、ガンジス川流域の地下水砒素汚染について述べているが、その一つの焦点を「地層中への砒素の堆積」においている。すなわち、ヒマラヤ山系で産まれた砒素鉱石（硫砒鉄鉱や黄鉄鉱など）を含む岩は、風化されながらガンジス川水系を流下して土砂化し、ネパールでは扇状地、インドのガンジス川中流域では氾濫原、バングラデシュなどガンジス川下流域ではデルタの中に堆積した（図-4.1参照）。その地層中の砒素が帯水層中での化学・生物学的反応によって地下水へ溶出していった。

これらの地層形成、砒素溶出メカニズムや汚染対策などについて、ガンジス川下流域ではバングラデシュとイ

ンド西ベンガル州、また上中流域ではネパールとインドウタールプラデシュ州（以降UP州と略称）とビハール州を対象としてここでは概観している。

筆者らはバングラデシュの砒素汚染メカニズム解明と代替水源開発を1997年より、NPO「アジア砒素ネットワーク：略称AAN」やNGO「応用地質研究会」とともに行ってきた<sup>2)</sup>。この10年にわたる研究でバングラデシュの砒素溶出メカニズムはほぼ解明されたといえる。また、代替水源についても種々開発されてきたが、これもバングラデシュでの代替水源の仕様基準づくりに大きく貢献している。これらの内容については誌面の関係上、ここでは十分には述べられていない。文献1)、2)を参照していただければ幸いである。

また、ネパールとUP州に関しては、砒素汚染の発見はここ最近の出来事であり、我々の行った調査・対策事業も限られたものとなっている。

さらに、西ベンガル州とビハール州に関しては文献調査によるところが多いため、説得性にかけるかもしれない。これらについては容赦していただきたい。

#### 4.2 ガンジス川流域の地層中の砒素の起源

地層中の砒素の起源は通常、火山活動にある。マグマにより砒素を含む岩石が生まれ、その岩石の風化に伴って砒素は、砂や粘土粒子等とともに河川や海に堆積して

地層を形成する。その後、地層中の砒素は、自然的または人工的な環境変化により、生物・化学的な反応が起こって地下水へ溶けてゆくこととなる。その詳細については前著1)を参照されたい。

しかし、ヒマラヤでは日本列島の火山活動に関連するようなマグマ発生はない。後者では海洋プレートが大陸プレートにもぐり込むときのエネルギーによりマグマが発生しているが、前者では大陸プレート同士の衝突であるため、そのようなマグマが発生する

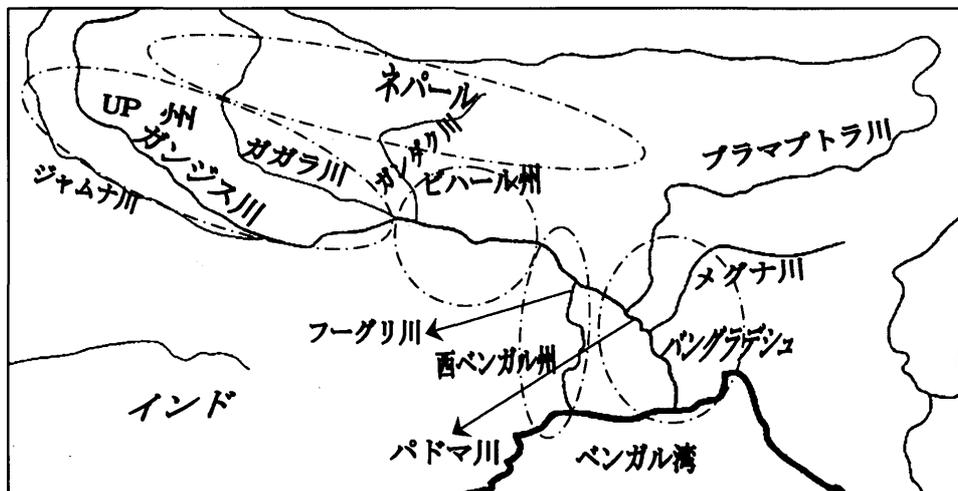


図-4.1 ガンジス川水系における砒素汚染分布  
(1 点鎖線部分は国や州の大体の領域を示す)

## 講 座

ような大規模なもぐり込みがないからである。筆者らは砒素鉱物の起源をヒマラヤの変成岩発生に関連するマグマであろうと、考えている。

ヒマラヤの形成は、その第1人者である酒井治孝九大教授の「ヒマラヤ山脈の成り立ち」<sup>3),4)</sup>によれば、以下のようなものである(図-4.2参照)。

インド大陸は約5000万年前(古第三紀始新世)にユーロシヤ大陸と衝突した。その折、両大陸の間にあった海(古テーティス海)のプレートはユーロシヤにもぐり込んでいたが、やがてそのもぐり込みが出来なくなった。そのために、同海洋プレートを押ししていたインド大陸プレートは、同海洋プレートの下にもぐりはじめた。

その結果、同海洋プレートはインド大陸棚・大陸斜面上の堆積物(テーティス堆積物)の上に乗れ上がり、南方に滑動して広がっていった。テーティス堆積物の上を覆ったこの海洋プレートはその後、侵食を受けて、孤立した岩体(図-4.2中のオフィオライトクリップ)となった。

このインド大陸プレートのもぐり込みもやがてとまったが、テクトニクス力(圧縮力)は新しいもぐり込みライン(MCT: Main Central Thrust)を約3000万年前(古第三紀漸新世)に南方に起こした。

一方、テーティス堆積物やその上に乗れ上がった海洋プレートは、その後隆起や侵食などを受けていたが、それによって生じていた堆積物(レッサーヒマラヤ堆積物)がMCTに沿ってのもぐり込みを続けることとなった。その沈み込みは深さ40kmにおよび、また温度も750℃となって変成岩が発生した。

その変成帯は2500~1600万年前にMCTに沿って上昇し、テーティス堆積物を突き破って、南方に100~180km水平移動を起こした(ハイヤーヒマラヤ)。その結果、テーティス堆積物(深さ約10km)は北方へすべり、エベレストなどを形成することとなった。なお、その後、もぐり込みラインは約1500万年前に南方に移動し(MBT: Main Boundary Thrust)、レッサーヒマラヤは約100万年前に急上昇することとなる。現在でももぐり込みは続いており、新たな断層や沈降帯がMBTの南方に存在している。

このヒマラヤ形成を踏まえて、ガンジス川流域の地層

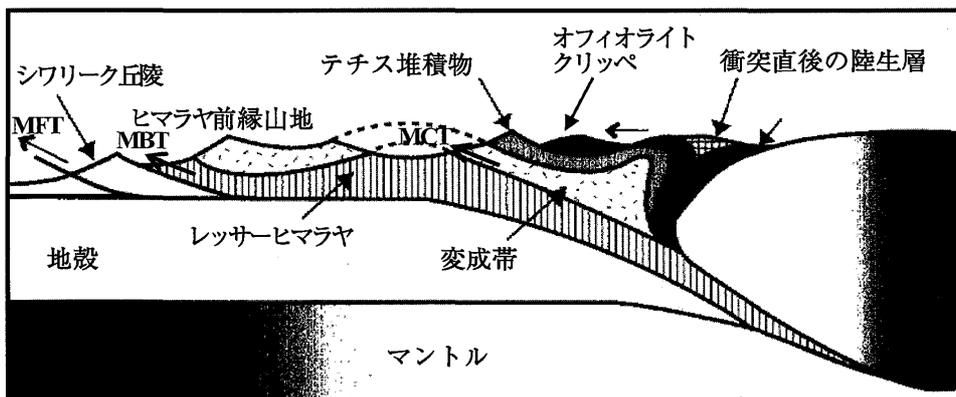


図-4.2 ヒマラヤの形成過程(文献4)より転載)

中の砒素堆積を筆者らは次のように推察している。ハイヤーヒマラヤ(変成帯)はヒマラヤ山脈の中央に広く分布しており、ガンジス川もそこを流れている。熱変質を受けたハイヤーヒマラヤには各種の鉱物が生まれており、花崗岩が多く分布している。

花崗岩には一般的に、砒素を含む鉱物(硫砒鉄鉱や黄鉄鉱など)が多く含まれている。この花崗岩が砒素源ではないかと推察しているところである。ネパールのトリバン大学も花崗岩を対象として、砒素源追跡を行おうとしているようである<sup>5)</sup>。

その花崗岩質の地表面は、洪積世の氷河時代に氷河の移動によって掘削・破砕されたと考えられる。その風化堆積層はtillと呼ばれているが、砒素を含むtillはアメリカの五大湖周辺(ミシガン州など)における地下水砒素汚染の原因となっている<sup>6)</sup>。例えば、最終氷期の最盛期(約1.8万年前)には海面は現在と比べて約100m低かった。ヒマラヤ地帯では氷河は著しく発達し、tillの形成も大きかったであろう。その後の間氷期における氷河後退に伴って、tillはガンジス川に流出していった。

tillやその他の砒素を含む岩はガンジス川によってさらに風化されながら、下流や海へ運ばれてゆき、地層を形成していった。地層形成後、帯水層中における化学・生物学的な反応により砒素が地下水へ溶出していった。

ガンジス川の上・中・下流域では砒素の堆積環境が異なるので、砒素の地下水への汚染メカニズムも違っているはずだが、その違いはまだ十分にはわかっていない。以下、分かっている範囲内で汚染状況も含めて概観する。

#### 4.3 ガンジス川下流域における砒素汚染

##### 4.3.1 砒素汚染メカニズム

ガンジス川下流域のバングラデシュやインド西ベンガル州では、砒素は5000年ほど前の地層に含まれている。堆積時は縄文海進の時代であり、同地層は当時のベンガル湾の浅海底や沿岸部を構成していたのであろう。

現在、砒素はピート(泥炭)層中で高濃度に検出されている。したがって、沿岸部のマングローブなどの根の部分に砒素が泥とともに堆積したという環境が考えられる。というのは、マングローブの根部分では、高濃度な塩分の存在のために有機物の分解が遅く、マングローブ

森林があったところでは、いわゆるマングローブ泥炭が多く存在しているからである<sup>7)</sup>。

ガンジス川から沿岸部に運ばれてきた砒素は、泥や鉄などと一緒に堆積する。特に、鉄(3価鉄)は周囲の砒素などを吸着しながら沈殿する特性(共沈)をもっている。このような堆積が続いて、例えばマングローブ泥炭地層などが形成されてゆくと、地層中は大気からの酸素の供給が

なくなってくるので還元環境となる。

還元環境下では鉄は3価から2価へ還元され、水に溶解する。したがって、砒素と共沈していた鉄(3価鉄:鉄水酸化物)は、還元下の帯水層中で3価鉄から2価鉄に変わって地下水中に溶けてゆき、吸着されていた砒素も地下水中に溶出することとなる<sup>8)</sup>。

この鉄水酸化物還元による砒素溶出は微生物活動によって加速される。マングローブ泥炭には微生物の栄養源になる有機物が残っている。地層中に溶存酸素がある間は好気微生物がまずは、活動することとなるが、やがて溶存酸素が消費されて環境は還元状態となる。そのため鉄水酸化物の還元が促進されることとなる。

また、砒素を含むボーリングサンプル試料を使って、還元状態のもとで微生物培養を行うと、同試料から砒素の溶出が起こることが実験的に確認されている。鉄還元菌の働きである<sup>9)</sup>。

なお、バングラデシュでは1980年代から乾季・地下水灌漑稲作が大々的に行われているが、その水源は泥質層(難透水層)下部の帯水層である。そのため同帯水層(被圧)の水圧が低下し、上部の泥質層中の砒素を含む水が帯水層へにじみ出てきたことが考えられ、これも砒素汚染の一因だといわれている<sup>10)</sup>。

また、西ベンガル州では、①砒素に富む黄鉄鉱が主な砒素の溶出源であり、②鉄や砒素硫化物を有している粘土やピートが還元下で砒素を溶出させたことにより、一層砒素濃度が高くなった、③高濃度の砒素を含む地下水は老年期デルタの上流地域の三日月湖地帯に限られている、などが従来から指摘されている。

#### 4.3.2 バングラデシュにおける汚染状況

地下水の砒素汚染が最初に見つかったのは1993年、ガンジス川沿いのインド西ベンガル州と接する西部地域であり、そこで慢性砒素中毒患者も初めて1994年に確認された。その後(1999~2000年)、全国レベルで井戸水のサンプル調査が行われた結果、地下水は東南の山岳地帯(3県)を除くすべての県(全国64県中61県)で汚染されていることが判明した。

汚染はガンジス川(パドマ川)の南側やメグナ川との合流点近傍でひどく、ついで東部のメグナ川上流という分布となっている(図-4.1, 4.3参照)。これらの地下水汚染データを統計的に解析した結果、バングラデシュの飲用許容値(50 µg/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、将来癌にかかる人は375000人にものぼると推定されている<sup>11)</sup>。

バングラデシュ政府は前述の調査結果を受けて、村レベルでの詳細調査を2000年から2004年にかけて全国的に行った。その調査では、我々が1997年にモデル村(シャムタ村)で行ったフィールドキットによる全井戸調査(砒素汚染マップ)手法<sup>12)</sup>が採用された。また、AANも1郡(ジェソール県, シャシャ郡, 99村, 65940世帯)の調査をJICA技術協力事業という形で実施し<sup>13),14)</sup>、模範的な成果を上げている。

全国調査の結果を表-4.1に示す<sup>15)</sup>。なお、同表中、

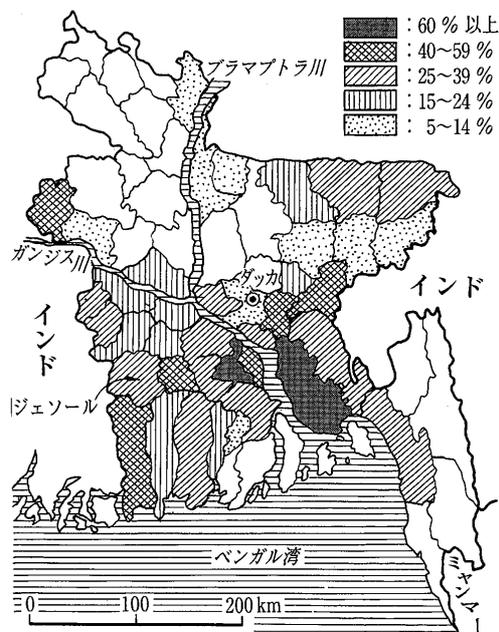


図-4.3 バングラデシュの砒素汚染分布(0.05 mg/ℓ以上の井戸の割合)(BGS 1998年データを加工)

表-4.1 全国調査の結果

調査項目	該当数	割合	全体(母)数
患者(皮膚症状)数	38,430人	0.06%	65,731千人
汚染井戸(As $\geq$ 0.05mg/L)	1,406千本	30%	4,637千本
汚染率80%以上の村数	8,546村	15%	57,482村

汚染率とは飲用許容値以上の井戸数の割合を示している。この調査結果では汚染井戸は多いものの、患者数は前述した癌患者推定値375000人の約1割と少ない。今後汚染水を飲用し続ければ、この1割は10割に近づいてゆく。換言すれば、代替水源を早急に建設・普及させて、患者数の増加をくい止めることが重要である、といえる。

この詳細調査の結果、代替水源の設置に関して、①まずは、表流水を水源にしたポンドサンドフィルター(PSF:池水を水源とする80~100世帯用の緩速砂ろ過装置。池水には砒素が含まれていない)、ダグウェル(直径1m程度の井戸。雨水、家庭排水等が帯水層に到着する以前に浅い所で局所的に貯留している水を水源とする)、雨水利用装置を検討し、②それが不可能な場合には深井戸を建設する、③また、汚染率が80%以上の村を緊急対策村とし、そこでの対策を優先する、という方針が政府から示された。現在、緊急対策村を対象とした対策が全国規模で取り組まれているが、AANも2郡をJICA技術協力事業の形で実施中である。

#### 4.3.3 インド西ベンガル州における汚染状況

西ベンガル州での地下水砒素汚染は1982年に初めて確認されている。ジャダプール大学のチャクラボーティ教授らの20年間近くの調査結果によれば<sup>16)</sup>、フーグリ川流域の9県(図-4.1, 4.4参照, 全県数:18)で高濃度な汚染が起こっており、汚染井戸の割合は27%で、汚染村は3285村に及んでいる。

## 講座

また、1万人の慢性砒素中毒患者が確認されているが、汚染井戸水を飲んでいる住民の数は650万人（9県の人口：4270万人）もあり、その中で砒素中毒の皮膚症状が発生する人は30万人にのぼる、と推定されている。

なお、代替水源として砒素除去装置が1998年末に初めて設置されたが、現在までに1900基の装置が5県内で設置されている。チャクラポーティ教授らは1900基のうち577基の状況を調査している<sup>17)</sup>。それによれば、577基のうち80%強が無効な状態にあった。その原因は、①作動していない、②砒素が除去されていない、③水質が飲料基準を満たしていない、④原水の砒素濃度がもともと許容値以下だった、というものであった。また、砒素除去装置が有効に機能するためには、砒素に対する十分な啓発、利用者組合による自主的運営、運営費の自己負担などが安全な水供給に肝要だと指摘されている。



図—4.4 インド西ベンガル州の砒素汚染分布 (0.05 mg/l 以上の井戸分布 (文献13) を加工)

## 4.4 ガンジス川上・中流域の地下水砒素汚染

ガンジス川の源流地帯における地下水砒素汚染は30数年前に報告されているが、その後の情報はえられていない。また、ネパールからはガガラ川やガンダック川など多くの川がガンジス川中流域に流れ込んでいる（図—4.1, 4.5参照）。それら河川のネパール流域内（テライ平原）では、1999年より地下水砒素汚染が明らかとなっている。

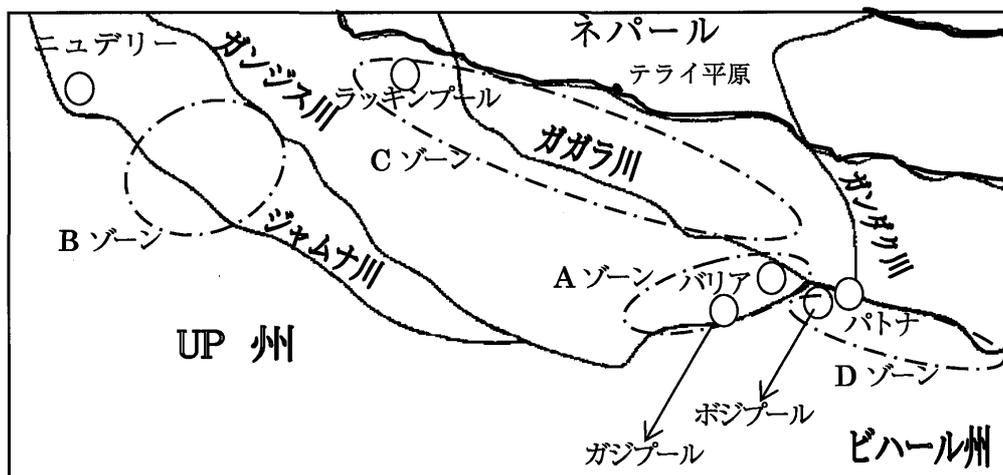
インド国内でのガンジス川中流域に位置するビハール州やUP州においても、数年前より砒素汚染が確認されている。

UP州はインド北部に位置して、その北辺をネパールと接する東西に長い形状をしている。面積は我が国の本州と北海道を合わせたほどであり、そこに大きな川が2本、ほぼ北西から南東方向に流れている。一つはガガラ川（ガンジス川支流）であり、他の一つはその南側を流れるガンジス川本流である。この二つの川はUP州の東端部分で合流している（図—4.5参照）。その合流点にバリア県があり、そこで砒素汚染が2003年に確認された。

また、UP州の東隣にはビハール州があり、合流後のガンジス川が流下している。合流点の南側部分にボジプール県（バリア県のガンジス川対岸）があり、2002年に砒素汚染が確認された。ガンジス川はビハール州に入ってすぐガンダック川と合流するが、その合流点の南側にパトナ県がある。同県でも汚染が確認されている。

ガガラ川やガンダック川はヒマラヤから砂やシルトを大量に運搬、堆積している。これらの川とガンジス川との合流点近傍では厚い沖積層（平均300 m）が堆積しており、現在もしばしば洪水被害が起きている。周辺には自然堤防、後背湿地および蛇行、直線型の旧河川や三日月湖が多い。

以上のように、地理・地質学的にみればガンジス川中流域は十分に地下水砒素汚染が考えられるところである。しかし、UP州とビハール州における砒素汚染は、インド国内でもあまり認識されていない。ここではテライ平原およびビハール州・UP州における砒素汚染について



図—4.5 ガンジス中流域における砒素汚染ゾーン

述べる。

#### 4.4.1 ネパール・テライ平原における汚染状況

ネパール南部の西端から東端に分布するテライ平原はガンジス川平野と接している。同平原には多くの川が北のハイヤーヒマラヤ（変成帯）から流下しており、扇状地がつくられている。1999年から2002年にかけてWHOやユニセフの支援の下で、砒素汚染調査が行われた結果、テライ平原の地下水は全体的に砒素に汚染されていることが判明した。

テライ平原には県の数20があるが、その20県の汚染率 ( $A_s > 50 \mu\text{g/L}$  の井戸の割合) を図-4.6に示している。同図中のT1~T20はその20県を西から東へ順に番号をつけて表したものである。砒素汚染が最もひどいのはナワールパラシ県である。テライ平原の中央部に位置しているが(図-4.6ではT8が該当する)、その汚染率 ( $A_s > 50 \mu\text{g/L}$  の井戸の割合) は26% (平均値) と報告されていた<sup>18)</sup>。

2004~2005年に、宮崎大学はAANとともに、ナワールパラシ県内の2村で砒素汚染対策事業を実施した(口絵写真-66)。その2村での汚染率は図-4.7に示すように、70~95%と極めて高かった。

また、地下水中の砒素は一般的に3価または5価の状態が存在するが、図-4.8に示すように高濃度砒素汚染の井戸では3価の存在割合が高く還元状態にあり、非汚染井戸では酸化状態にあった<sup>19)</sup>。

バングラデシュにおけるもの(図-4.9参照)と比較すれば、やや異なった趣はあるが、ほぼ同様な傾向を示している。堆積環境(バングラデシュ:デルタ地帯, テ

ライ平原:扇状地)の違いが砒素溶出に与えている影響はよくは表れていない。また、テライ平原では、バングラデシュで砒素汚染要因の一つといわれている乾季稲作は行われていない。バングラデシュの大デルタ地帯とは違った砒素溶出メカニズムが存在しているようである。

その後、ネパールでは内戦が激化したために、砒素対策事業は中止せざるをえなかった。現在、王制から民主制に変わりつつあり、政情も落ち着いているようである。本学が設置した6本の深井戸も安全な水を供給しているとのことで、早急に調査・対策事業を再開しようと考えているところである。

#### 4.4.2 UP州における汚染状況

2003年、バリア県で砒素汚染が明らかとなった以降、州政府やユニセフは全国レベルで地下水のサンプリング調査を行った。その結果、バリア県の隣県2県(ガンジス川上流側ガジプール県等, 図-4.5中のAゾーン)、および州西部4県(同Bゾーン)での汚染が確認されている。

西部4県の汚染はガンジス川支流であるジャムナ川流域の砒素汚染を示すものである。また、州東部2県および北部4県(ラッキンプル県等, 図-4.5中のCゾーン)でも砒素汚染が確認された。これらの汚染はガガラ川流域のものであり、ネパール・テライ平原での汚染との関連性を示している。

2005年度後半より、ユニセフはUP州と共同して、

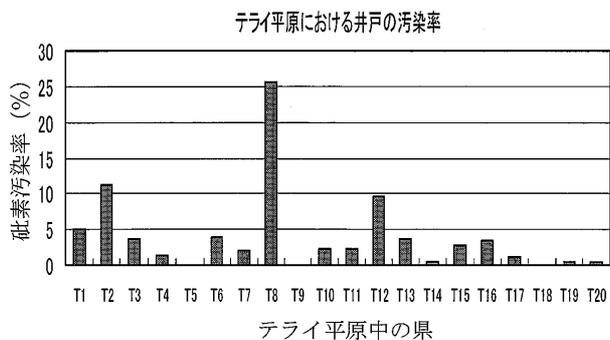


図-4.6 ネパール・テライ平原の砒素汚染状況

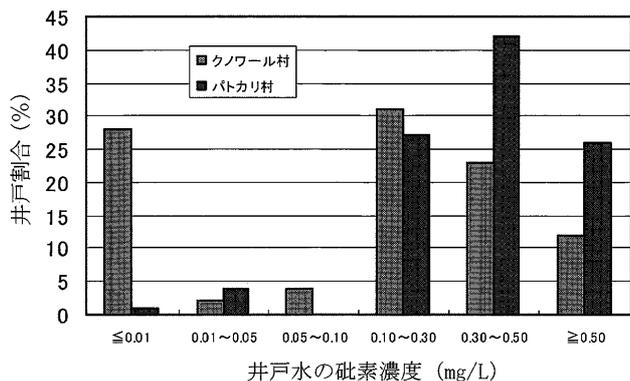


図-4.7 テライ平原2村での高濃度砒素汚染例

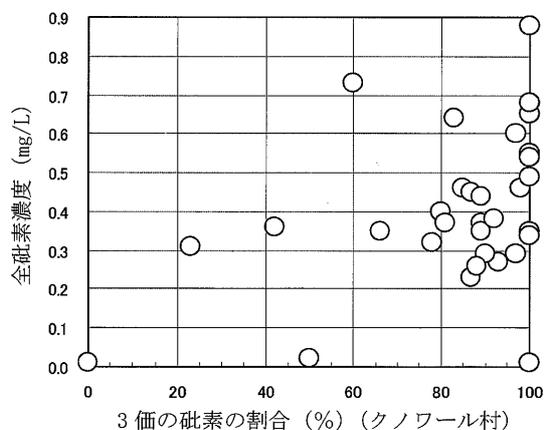


図-4.8 テライ平原クノワール村の井戸水の砒素濃度と酸化還元状態との関係

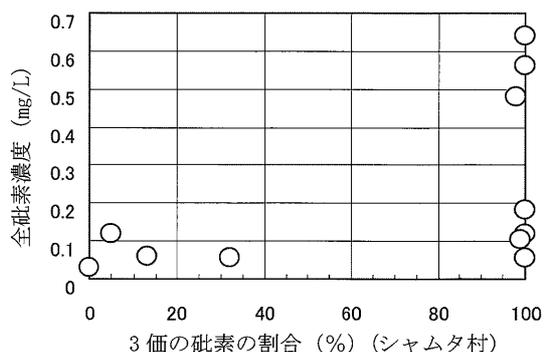


図-4.9 バングラデシュ・シャムタ村の井戸水の砒素濃度と酸化還元状態との関係

## 講座

バリア県とラッキンプールケーリ県（Cゾーンでの高濃度汚染県）の公共用井戸を対象として、砒素汚染調査を行った。その結果に基づいて、2006年度後半には両県でそれぞれ250本の深井戸が代替水源として設置されている。現在、新たに49県（UP州の総県数は70県）で井戸のサンプル調査がなされているが、汚染分布状況が判明すれば逐次代替水源が設置されてゆくようになっていく。

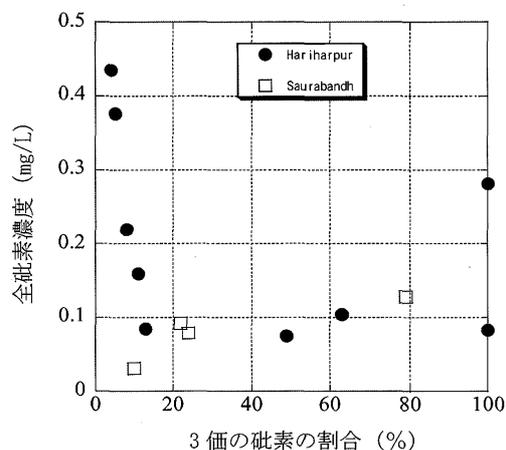
宮崎大学はAANと共同して、2006年1月にバリア県、9月にその隣接県（ガジプール県）で調査を行った（口絵写真—67）。その結果、図—4.10にみられるように酸化環境下でも高濃度砒素汚染が起こっていることが確認された<sup>20)</sup>。同図は図—4.8、4.9とは異なった傾向を示しており、ここでは還元と酸化の両環境での砒素溶出が考えられる。数千年間の氾濫により形成された厚い沖積層中の地下水は、やはりデルタ地帯や扇状地とは異なった砒素溶出メカニズムがあるのだろうか。

宮崎大学はAANとともに、JICA草の根技術協力で砒素ミティゲーション事業を2007年度よりUP州で開始する予定であり、現在、JICAはインド政府との間でその実施のための協定づくりを行っている。砒素溶出メカニズムについても、JICA草の根対策事業を行う中で今後考えてゆきたい。

## 4.4.3 ビハール州における汚染状況

2002年10月ボジプール県シャープール郡の2村で患者が数人発見された後、中央政府と州政府は両村での井戸汚染を確認した。ユニセフはテライ平原と接する北方の諸県で調査したが、汚染は認められなかった。州政府は現在、ユニセフの支援を受けて、ガンジス川と接する11県（全県数38）を対象に、南北両岸10 km以内の公共用井戸の砒素汚染調査を実施中である。

なお、ボジプール県とパトナ県での調査はすでに終了しており、その結果によればボジプール県では対象となったすべての郡（6郡）で汚染が認められている。汚染率は5～40%であり、1 mg/l以上の高濃度汚染井戸も数箇所確認されている。また、パトナ県ではその北側がすべてガンジス川に面しているが、その西端から東端



図—4.10 UP州における井戸水の砒素濃度と酸化還元状態との関係

まで汚染されていることが判明している。

両県での汚染村の数は233村にのぼっているが、州政府はそこではダグウェルの新設や改良、また雨水利用装置の設置などにとりかかっている。また、表流水や深井戸を水源としたパイプ給水や逆浸透膜砒素除去によるパイプ給水システムなども計画されている。なお、州政府は2005年、中央政府に調査対策計画書を提出して、「11県調査ではすべての県の汚染が確認されているので全井戸調査が必要であり、また残る27県でもサンプル調査を行うことが必要である」を訴えている。

## 4.5 おわりに

原稿を執筆しながら、筆者は今、バングラデシュにて学生と一緒に砒素除去装置の性能向上の実験を行っている。筆者らが開発した砒素除去装置（GSF: Gravel Sand Filter）は砂利槽と砂槽からなるもので、鉄の共沈を利用して砒素を除去するものである（口絵写真—68）。コミュニティ用であり、現在4基がバングラデシュ内で稼働中である。

一方、AANは現在、前述のようにJICAの砒素汚染対策技術協力事業を展開中である。ジェソール県内2郡を対象としたこのプロジェクトの目的は、将来、海外からの支援がなくなっても、バングラデシュ政府・村人が自前・独力で砒素対策事業を展開できるための仕組みを構築することにある。

表流水や深層地下水は砒素を含まないため、同プロジェクトでは代替水源として池水や深井戸がまず選択される。しかし、今回それらの安全な水源が利用できない地域が増えてきたため、砒素除去装置（GSF）を活用するようになった。ここ1～2年のうちに10～20基のGSFが設置される見通しである。

GSFは西ベンガル州の例を見るまでもなく、技術移転を伴ったメンテナンスが肝要である。技術移転はこれまで大学とAANとの協働で行われてきた<sup>21),22)</sup>。増大するGSFの設置には今後ますます、AANとの協働が重要となる。筆者はAANの副代表でもあり、責任の重さを2重に痛感している昨今である。

(2007.1.2 バングラデシュ・ジェソールにて)

## 謝辞

ビハール州の砒素汚染状況に関しては、AANダッカ事務所所長の対馬幸枝氏から種々の情報提供を受けた。また、バングラデシュ、ネパールなどの調査結果はAANと「応用地質研究会」との協働でえられている。ここに記して謝意を表する次第である。

## 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，理工図書，pp. 223～251，2006。
- 2) 横田 漢・瀬崎満弘・田辺公子・Miah M. Hussainuzaman：バングラデシュの地下水砒素汚染と解決への取り組み，土と基礎，Vol. 55, No. 3, pp. 18～21，2007。
- 3) 酒井治孝：ヒマラヤの自然誌，第1章，ヒマラヤ山脈の

- 成り立ち, 東海大学出版会, pp. 1~25, 1997.
- 4) 酒井治孝: ヒマラヤ山脈の上昇とモンスーンの変動, GET九州, No. 27, pp. 39~43, 日本応用地質学会九州支部, 2006.
  - 5) R. B. Sah, Arsenic Research Committee, Department of Geology, Tribhuvan University: Studies for possible natural sources of Arsenic poisoning of Groundwater in Terai Plain of Nepal, Oct., 2002.
  - 6) Kolker, A, S. K. Haack, W. F. Cannon, D. W. Westjohn, M. J. Kim, Jerome Nriagu and L. G. Woodruff: Arsenic in Southeastern Michigan, Montana, Arsenic in Ground Water, Edited by Alan H. Welch & Kenneth G. Stollenwerk, Kluwer Academic Publishers, pp. 281~294, 2003.
  - 7) 宮城豊彦・安食和宏・藤本 潔: マングローブ, 古今書院, 2003.
  - 8) 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.
  - 9) 赤井純治: 「微生物-鉱物相互作用: 地下水砒素汚染問題に関わるサイクルでの微生物-鉱物(-有機物)相互作用」, 第7回アジア地下水砒素汚染フォーラム, AAN, RGAG, 宮崎大学, 89-95, 2002.
  - 10) 末永和幸・田辺公子・応用地質研究会砒素汚染研究グループ・宮崎大学地下水砒素汚染研究グループ: バングラデシュ西部シャムタ村における地下水砒素汚染と水文地質的背景, 地球科学, 54-2, pp. 105~125, 2000.
  - 11) Ahmed, M. F. and Ahmed, C. M.: Arsenic Mitigation in Bangladesh, BUET, Dhaka, pp. 81~174, 2002.
  - 12) 横田 漢・秋吉康弘・田辺公子: 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回地盤環境工学シンポジウム講演論文集, 地盤工学会, pp. 59~64, 1997.
  - 13) AAN: 「シャシャ郡プロジェクトの成果と課題」, <http://www.asia-arsenic.jp/jp/modules/icontent/index.php?page=55>.
  - 14) JICA & AAN: Integrated Approach for Mitigation of Arsenic Contamination of Drinking Water in Bangladesh, Final Report, Nov., 2004.
  - 15) BAMWSP: <http://www.bamwsp.org/>
  - 16) D. Chakraborti, et al., Groundwater arsenic contamination and its health effects in the Ganga-Meghna-Brahmaputra plain, J. Environ. Monit., Royal Society of Chemistry, pp. 74N~82N, 2004.
  - 17) D. Chakraborti, et al.: Million Dollar Arsenic Removal Plants in West Bengal, India: Useful or not?, Water Qual., Res. J. Canada, Vol. 41, No. 2, pp. 216~225, 2006.
  - 18) ENPHO: The State of Arsenic in Nepal-2003, 2004.
  - 19) 若林 貢・横田 漢: ネパールにおける地下水砒素汚染の特徴, 第9回アジア地下水ヒ素汚染フォーラム, 71-76, 2004.
  - 20) 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にて発表予定.
  - 21) 川原一之: アジアに共に歩む人がある, 岩波ジュニア新書. 2005.
  - 22) 上野 登: 土呂久からアジアへ, 鉱脈社, 2006.