

## インド・バングラディシュにおける地下水ヒ素汚染と健康影響

安藤 正典

Arsenic contamination of ground water in India and Bangladesh  
and its health effect

Masanori ANDO

## 1. はじめに

我が国では、平成4年に水道水質基準の改正が行われたが、これに伴って、基準値や指針値を超過する水道水がみられ、各水道事業者ではその対応に苦慮してきた。その一つがヒ素であり、地下水の利用や温泉排水などの混入によって水質基準を越える可能性の高い原水が多数存在していることが明らかになってきた。さらに最近、US.EPAではヒ素におけるリスクアセスメントにおける暴露評価の結果から高いリスクであることが明らかで基準値の見直しを検討中であると言われている。このことから、ヒ素の健康影響に関するリスク評価の再検討が緊急でかつ重要な課題となっている。

一方、著者は国際協力事業の一つとして、インドやバングラディシュの西ベンガル周辺地域における地下水ヒ素汚染に伴う健康影響の改善のためのWHOへの協力や水道施設改善計画に関わる国際厚生事業団（JICWEL）への支援に参加する機会を得た。

インドやバングラディシュの西ベンガル周辺では、地下水のヒ素汚染が世界で最大規模で発生していることが明らかになってから久しいが、その実態の把握と飲料水確保の方策を立てることは急務であるにも関わらず、遅々として進んでいない。

そこで、本稿ではヒ素の自然環境での挙動、健康影響及び暴露量を考察すると共に、ヒ素の地下水汚染の現状と課題の概要についてインド国西ベンガル州側から述べる。

## 2. 自然環境でのヒ素の挙動

## 1) 自然環境中のヒ素

ヒ素は、自然環境中では硫黄含有鉱物である硫と鉄鉱や黄鉄鉱中に最も一般的に含まれ、これが発生源となることが多い。地表面のヒ素の大部分は、鉱物の風化作用を経て土壌や水中に供給される。また、地表水への供給は、温泉などの自然現象の他、人為的な地下水の汲み上げ等が大きな原因となる。

一般環境中あるいは生態系でのヒ素の存在量は少ないが、

すべての生物体から検出される。地球上におけるヒ素の存在割合は、岩石では0.2～15mg/kg、土壌中では2～23mg/kg、大気中では0.005～0.1 $\mu$ g/m<sup>3</sup>程度であるのが一般的である。

地表水や海水中でのヒ素の含有量は少なく、0.00xmg/L程度に存在するのみである。しかし、温泉水のような地下水が地表に漏出するものの中には、無機ヒ素を高濃度含む場合が多い。これらは地質に由来し、ヒ素の化学形態はヒ素5価とヒ素3価であり、有機ヒ素の形態はほとんど存在しない。

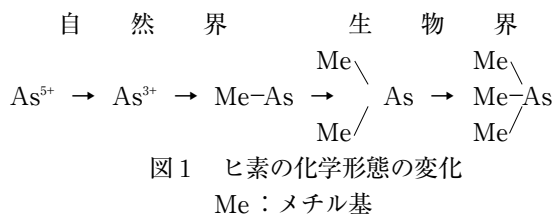
## 2) 生態系及び生物環境中のヒ素の存在量

ヒ素は生態環境中にも微量に、しかも広範囲に存在し、その多くは供給源の無機ヒ素は生物作用によって速やかに有機ヒ素に変換される。生物の中で、陸生生物での存在量は環境土壌や摂取物に影響されるが、極めて低濃度である。これに対して、海洋性生物では海水濃度が低いにも係わらずその濃度は高く、存在量の大部分は有機ヒ素の形態で存在している。魚介類、甲殻類では数 $\mu$ g/g（有機ヒ素の形態）であるのに対して、海藻では数十mg/kgとの報告例が多く、存在形態は有機ヒ素ばかりでなく無機ヒ素も含んでいる。

## 3. 健康影響

## 1) ヒ素の化学形態

ヒ素の毒性を評価する場合、摂取したヒ素の形態を考慮することは重要である。自然界及び生態や生物体内でのヒ素の化学形態は概ね図1のように変化する。無機ヒ素のうち5価のヒ素は体内で3価のヒ素に変換される。3価のヒ素はさらにモノメチル、ジメチル化、トリメチル化されて有機ヒ素化合物に変換していくことが尿中代謝物から明らかにされている。また、最近では尿中代謝物として確認されていた有機ヒ素は5価体であり、生体内ではメチル化の過程で3価のメチル化体が生成し、これが、生体影響を及ぼす可能性を示唆する報告が見られる。



1) 毒性

(1)動物に対する毒性

①急性毒性

マウスに対する急性毒性としてのLD<sub>50</sub> (経口) は、表1に示すように三酸化ヒ素 [亜ヒ酸, As(III)] 0.0013~0.0345 g/kg, ヒ酸As (V) 0.0048g/kg, モノメチルヒ素 (MAA) 1.8~2.8 g/kg, ジメチルヒ素 (DMAA) 1.0~1.35 g/kg, アルセノバタイン9.4~11.5 g/kg, ガリウムヒ素4.7g/kg, トリメチルアルシン (TMA) 7.87g/kg, TMAO10.0g/kg, アルシン31ppm (50分吸入) であることが報告されている<sup>1)</sup>。このことからヒ素の毒性は、アルシン>無機亜ヒ酸塩 (As (III)) >有機3価ヒ素化合物>無機ヒ酸塩 (As (V)) >有機5価ヒ素化合物>アルソニウム化合物>ヒ素元素の順で、水に対する溶解度と毒性の強さに相関があり、ヒ素化合物の種類によって毒性の発現メカニズムは異なるものの、同様の中毒症状が生じるものと考えられる<sup>2)</sup>。

表1 ヒ素の化合物のLD<sub>50</sub> (g/Kg)

	文献	1	16
As(III)	0.0345		0.00127 (1.7 × 10 <sup>-5</sup> M)
As(V)			0.00479 (6.4 × 10 <sup>-5</sup> M)
MAA	2.8	1.8 (1.7~1.4)*	1.12 (1.5 × 10 <sup>-2</sup> M)
DMAA	1.35	1.2 (1.0~1.3)*	0.329 (4.4 × 10 <sup>-3</sup> M)
TMA	7.87		
TMAO	10.0	10.6 (9.4~11.5)*	5.54 (7.4 × 10 <sup>-2</sup> M)
アルセノバタイン	10.6		
ガリウムヒ素	4.7		
アルシンLC <sub>50</sub>	0.031ppm		

\* : g/Kg, 試験結果の範囲

②遺伝毒性

無機ヒ素のin vitroの遺伝毒性については種々の報告がなされているが、無機ヒ素は比較的弱い。一方、DMAAには変異原性がみられないとされていたが、異なった系を用いた試験で強い変異原性が確認された。また、ジメチルアルシンと酸素分子の反応物には変異原性がみられた<sup>3)</sup>。しかし、TMAには変異原性は示されていない<sup>(3, 4)</sup>。動物細胞の染

色体異常の誘発作用は、As (III) > As (V) > DMAA > MAA > TMAOの順である<sup>5)</sup>。

③催奇形性

3価及び5価の無機ヒ素は複数の種類の脊椎動物に対する奇形性が認められており、哺乳動物に対して2.5~33mg/kgの亜急性レベルの経口投与によって死産や奇形を発生させるとの報告がある<sup>2)</sup>。

④慢性毒性

哺乳動物に対してAs (III) またはAs (V) の1~10mg/kgの経口投与によって死亡あるいは奇形を発生させる<sup>2)</sup>。また動物による1年以上の長期暴露における結果は、0.01~0.1mg/kgのレベルが最大無影響量 (NOAEL) または最小影響量 (LOAEL) として示されている。

(2)ヒトに対する毒性

①急性毒性

無機ヒ素化合物は70~200mgの摂取によりコレラのような嘔吐、下痢、脱力感、筋肉けいれん、嚥下困難、心室性不整脈、皮膚びらん等の損傷が現れ、昏睡後死亡する。致死量はアルシン (AsH<sub>3</sub>) で0.10~0.15g, 亜ヒ酸 (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) では0.1~0.3g程度である。経口摂取における急性中毒の症状は、消化管の粘膜障害から嘔吐、下痢があり、脱水によるショック症状、神経症の発生もみられる。

②慢性毒性

慢性中毒は飲料水による長期摂取の他、食品等の摂取による例も多く、約0.5~1mg/dayの長期連続摂取により発症している報告がみられる。1mg/L以下の水の長期摂取によってもヒ素の慢性毒性は発症する。一般的には目・鼻・喉等の粘膜炎症に続き、筋肉の弱化、食欲減退の症状がみられ、さらに進行すると、皮膚の黒色色素沈着、脱着角化、脱毛症等の皮膚障害が特徴的にみられるようになる。さらには末梢神経炎、心臓血管障害、染色体異常、癌等に発展すると考えられている<sup>(6, 7)</sup>。

一方、飲料水として長期摂取した例は数多く、WHOでは皮膚癌は0.2mg/Lで生涯摂取した場合5%の危険性があることを示唆している。

また、1年以上の長期間暴露における肝、腎毒性及び発癌のレベルは0.1~0.01mg/kg/dayであるが、皮膚や神経障害は0.01~0.001mg/kg/dayの量で影響が認められる。

③発癌性

ヒ素のヒトに対する発癌性は確定しており、皮膚癌、肺癌、肝臓癌、膀胱癌、腎臓癌、前立腺癌、悪性脳腫瘍等、体内のあらゆる臓器に及ぶと考えられている。ヒ素に汚染された水を飲料している地域の住民では、ヒ素の曝露量とこれらの癌による死亡率とヒ素の曝露量あるいは曝露期間や年齢の増加との間に有意な相関関係があることが世界各地での報告から明らかにされている。

皮膚癌あるいはその他の毒性も約0.2~0.25mg/day以上で実証されており、この濃度が毒性の閾値と考えられている。しかし、メチル化によるヒ素の無毒化は個体差等が大きいと考えられ、0.2mg/day以下でも危険の可能性は存在するものと考えられる。

メキシコやチリなどの他の開発途上国でもがんの発生は観察されている。アメリカや他の国の報告によるとヒ素と接触する機会の多い職人などでは、肺、消化管、尿路の腫瘍の発生がみられるが、皮膚癌の発生はみられていない。皮膚癌は、蛋白質の不足した食生活を送っている国（台湾、チリなど）の国民に発生する確率が高いといわれる<sup>8)</sup>。

なお、大気中のヒ素濃度が $54.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を越える環境下での労働者に発癌の危険性が高いと報告されている<sup>2)</sup>。

### (3)体内運命

#### ①吸収

ヒ素化合物は経口的ばかりでなく、経気道、経皮的にも摂取され<sup>2)</sup>、肺、皮膚及び腸管粘膜から吸収される<sup>9)</sup>。ヒ素化合物のうち溶解性ヒ素は、消化管から速やかに吸収され<sup>10)</sup>、有機ヒ素は無機ヒ素に比べて吸収されやすいことが知られている。経口摂取した大部分は尿中に排泄されることから、As(III)は高い吸収率を示したのち、速やかに排泄される。As(III)とAs(V)との間に吸収率に差は認められない<sup>11)</sup>。

#### ②分布

As(III)では投与10時間で0.1%が残留するにすぎない。しかし、一旦吸収された無機ヒ素は長期間体内に残留する。また、その分布は特に皮膚とその付近に分布蓄積する。その他の臓器では、肝臓に最も多く蓄積し、次いで胃腸・腎臓・脊髄・肺・脳・脾臓・膵臓の順に蓄積していることが認められる。しかしながらヒ素による内臓癌の発生頻度は必ずしもこの順位と一致せず、肺に最も多発している<sup>9)</sup>。

#### ③代謝

吸収されたAs(III)の大部分は、肝臓でメチル化されてMAA, DMAA, TMAに代謝されて速やかに排泄されるが、このメチル化反応は解毒機構であると結論されている。また、As(III)の一部はAs(III)態のまま体内に残留し、蛋白質や酵素に結合して皮膚に蓄積し、長時間残留する。また、無機As(V)はAs(III)への還元され、As(III)のヒ素の挙動を示す。

メチル化によるヒ素の無毒化は、水道水のヒ素濃度が $0.2 \sim 0.25\text{mg}/\text{day}$ の程度の摂取で飽和量に達すると考えられている。このレベルを越えると、尿中に排泄されるヒ素濃度が急激に増加する。皮膚癌もその他の毒性も約 $0.2 \sim 0.25\text{mg}/\text{day}$ 以上で実証されており、この濃度が実際には閾値と考えられている<sup>12)</sup>。

#### ④排泄

動物から求めたヒ素の半減期は、無機28.6時間、MAA 7.4時間、DMAA 5.6時間、TMA 3.7時間、アルセノベタインは5.3時間と非常に速い<sup>1)</sup>。

メチル化されたヒ素化合物は、組織や器官への親和性が低いため速やかに排出される<sup>1)</sup>。ヒトにおいてはヒ素化合物は腎臓を経由した尿中排泄が主要な経路で、他に糞便、毛髪、爪、皮膚への排泄もある。

#### (5)WHOの評価

ヒ素の発癌性については、IARCが、高濃度の無機ヒ素の経気道的暴露（職業性）からの肺癌、そして飲料水汚染に

よる経口暴露からの皮膚癌を発生させることをそれぞれ疫学的データから因果関係を認めている<sup>1)</sup>。

生涯の発がんの確率を $10^{-5}$ （10万人に1人）として求めたEPAの基準は、飲料水が $0.022 \mu\text{g}/\text{L}$ 、環境水では $0.175 \mu\text{g}/\text{L}$ である。一方、 $50 \mu\text{g}/\text{L}$ の水を一生飲み続けた場合の皮膚癌の発生率は、およそ400人に1人の割合である<sup>8)</sup>。また、Broun等の試算した皮膚癌の生涯リスクは、 $1 \mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ で $1.3 \times 10^{-3}$ （770人に1人）であると報告している<sup>3)</sup>。

現在使用されている発がんのリスク評価は、台湾における事例のデータを基に検討されたものである。

WHOは、飲料水中のヒ素の仮の推定ガイドライン値は $10 \mu\text{g}/\text{L}$ として定めた。この濃度の生涯皮膚癌リスクは $6 \times 10^{-4}$ である。この値は、1983年にJECFAによって定められた「無機ヒ素のPMTDI  $2 \mu\text{g}/\text{kg}$ 体重、また、1988年に無機ヒ素のPTWIとして確証された $15 \mu\text{g}/\text{kg}$ 体重に基づいても、20%が飲料水から摂取されると仮定して同様の値が導ける。」等から検討すると共に、飲料水中のこの発癌性物の濃度の低減を考慮し、現行の水道水質基準の通り、 $0.01\text{mg}/\text{L}$ とすべきであるとした。

## 4. 経口暴露

### 1) 食品等からの総摂取量

ヒ素は人為汚染とは別にあらゆる食品に含まれており、特に魚介類と海藻類から高濃度のヒ素が検出され、 $100 \mu\text{g}/\text{g}$ を越える例も知られている。<sup>(14, 15)</sup>

諸外国における食品からのヒトの1日ヒ素摂取量は、約 $10 \sim 200 \mu\text{g}/\text{day}$ とその範囲は広いが、概ね $40 \sim 70 \mu\text{g}/\text{day}$ である。その結果、生体中には $1 \text{mg}/\text{kg}$ 未満のヒ素が存在している<sup>2)</sup>。

一方、USの大人は $45 \sim 50 \mu\text{g}/\text{day}$ の総ヒ素を摂取していると見積もられている

### 2) 無機ヒ素の摂取量

日本人では、厚生省が長年調査しているデータによると、1978年から1990年の調査では $100 \sim 600 \mu\text{g}/\text{day}$ と調査時点によって大きくバラツキ、その平均で $195 \mu\text{g}/\text{day}$ 程度である。これは諸外国に比較して高い値となっている<sup>13)</sup>。ただし、これらの摂取したヒ素の形態はほとんどが毒性の低い有機ヒ素である。

日本人の食事から無機ヒ素の平均一日摂取量（ $0.18 \mu\text{g}/\text{kg}$ ）はFOR/WHO JECFAの許容一日摂取量である無機ヒ素 $2 \mu\text{g}/\text{kg}$ を越えていない。

## 5. インド西ベンガル州住民の地下水ヒ素汚染問題

### 1) インド・バングラディッシュ周辺の西ベンガル地域におけるヒ素汚染調査

未曾有の重金属汚染でしかも健康影響を引き起こしているインド・バングラディッシュ周辺の西ベンガル地域における地下水ヒ素汚染問題は経済的にも極めて厳しい状況であるため自国や州で独自で調査することが不可能な状況である。この

ことから、UNEP,WHOあるいはNGOをはじめ多くの機関は、これら周辺地域を調査や飲料水確保に関する技術的、経済的支援の必要性を認め、それぞれの機関が調査を開始している。

2) インド・バングラディッシュ周辺の西ベンガル地域

インド、バングラディッシュに跨る西ベンガル湾周辺の堆積層の地域は、図2に示すように、南にベンガル湾、北にヒマラヤ山脈に囲まれた地域でインドの東端に位置した地域で世界で有数の人口密度を有し、しかも雨季と乾季が明確に分かれていることから、大河を有するにもかかわらず、乾期には農耕地に灌水できず農作物の収穫が期待できなかつた。このことから、両国では人口問題と社会経済問題を一挙に解決できる方策として地下水汲み上げによる灌漑の政策をここ40年来推進してきた。その結果、未曾有の地下水ヒ素汚染による皮膚がん、肺がん、角化症、黒皮症などのヒ素中毒患者が多発している。

3) 西ベンガル州における地下水ヒ素汚染

この地域は、カルカッタ等の都市部を除いて農村地帯で、飲料水あるいは生活用水には需要の大部分を汲み上げ式の井戸水に頼っている。一方、農村地帯では稲作が産業で、農業用水を多量に必要とするため機械ポンプの汲み上げによる灌漑が行われている。

西ベンガル州におけるヒ素汚染は、Guhaによって1983年に公式報告されたのがはじめである<sup>16)</sup>。その後、Saha<sup>17)</sup>、Guha Mazumder<sup>18, 19)</sup>、Chakraborti<sup>20)</sup>らは詳細な検討を行い、その汚染の広がりや予想を超えた世界的規模であることが明らかとなった。しかし、インドにおける地下水ヒ素汚染問題は、研究が始まったばかりでその概要は明らかにされつつあるものの、全体像は把握されていないので、現段階での

情報を基に記述する。

西ベンガル州政府が行っている地下水調査の進捗状況は表2のようである<sup>21)</sup>。西ベンガル州16郡うちの1/2に当たる8郡で地下水のヒ素汚染が確認されている。8郡うち1郡は、最近調査が始まって明らかになった地域である。

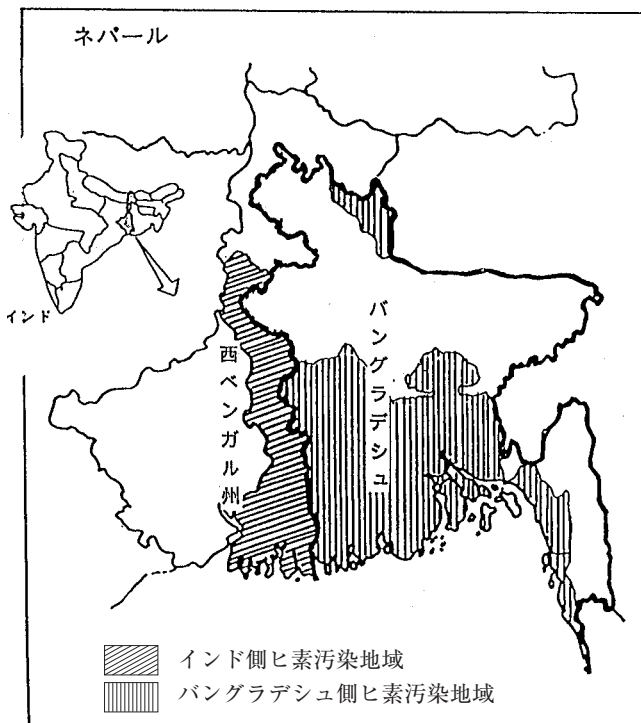


図2 インド・バングラディッシュ周辺の西ベンガル地域州の地図

表2 各郡の調査の進捗状況

District	調査地下水の割合(%)	ヒ素調査数	ヒ素濃度範囲
Kochbihar	4.42		
Malda	29.67	410	不検出~1.434
Midnapur	27.90		
Hooghly	31.20	44	0.60
Howrah	13.70	20	0.04~0.08
Darjeeling	1.33		
Jalpaigur	1.05		
Bankura	14.52		
Burdwan	24.47	25	0.06~0.48
North24Parganas	55.77	607	
U&D Dinajpur	22.86		
Murshidabad	49.22	1441	
Birbhum	14.06		
Purulia	8.35		
Nadia	55.89	803	
South24Parganas		2307	

表3 8郡 (District) におけるヒ素汚染地下水を飲用している人数

District	全ブロック	ヒ素汚染 ブロック	村落数	District 人口	ヒ素汚染 人数
North24Parganas	22	14 (63%)	85+8	7,281,881	887,170 (12%)
South24Parganas	30	9 (30%)	124	5,715,030	788,258 (14%)
Murshidabad	26	15 (58%)	242	4,740,149	1,168,283 (25%)
Nadia	17	13 (76%)	168+8	3,852,997	834,730 (22%)
Haora	14	2 (14%)	3+1	3,729,664	191,192 (5%)
Bardhaman	32	2 (6%)	7	6,050,605	19,132 (1%)
Maldah	15	5 (33%)	128	2,637,032	540,193 (20%)
Hufhli	18	1 (1%)	-	4,355,230	33,545 (1%)
Total	174	61 (35%)	757	38,361,688	4,462,503 (12%)

#### 4) ヒ素汚染地下水を飲用している推定人数

1991年に纏められた西ベンガル州のヒ素汚染地下水調査結果は、表3に示したように汚染が確認された8郡の中の地下水汚染地区 (block) の面積は40,000km<sup>2</sup>, この地域に住んでいる総人口は38百万人にも及んでいる<sup>22)</sup>. ヒ素によって影響を受けた地域は既に全ブロックの35% (61/174ブロック), 750村落以上にも達している。

驚くべきことは、これらの地域でヒ素汚染の地下水を飲用している人数は4.4百万人以上にも及んでいると試算されていることである。

さらに調査が進むにつれて汚染地域は新たに発見され、少なくとも毎年20%づつ増加している。

Chakrabortiらの最近の汚染状況調査 (1996年, 1月) によると表4を示したように、560村落の調査の段階でヒ素汚染地域に住む人数は960万人で、WHOの飲料水ガイドラインである0.01mg/L以上の水を飲用している人は150万人、0.05mg/Lを越えた水を飲用しているものは110万人、皮膚

表4 Chakrabortiらによる1996/1の調査結果

調査郡	8郡
調査面積	37,493km <sup>2</sup>
調査郡の人口	34,632,024人
対象地域 (ブロック)	162
ヒ素汚染地域の人口	9,562,898人
ヒ素汚染村落	560
0.05mg/L超過飲料水の飲用人口	1,100,000人
0.01mg/L超過飲料水の飲用人口	1,500,000人
皮膚疾患発生数	220,000人

疾患患者数22万人に及ぶと報告している<sup>23)</sup>. また、別の報告によると、既に30万人以上がヒ素に関連する疾病に侵されていると試算しているものもある。しかも、皮膚障害はヒ素毒性のうち遅く現れるものであることを記憶しておくべきであり、疾病者数はこれより少ないことはないと考えられる。

#### 5) 地下水及び地層のヒ素濃度

州政府による井戸水中のヒ素の調査結果では、表5に示すように0.01mg/Lの濃度を超える井戸が全調査井戸の62%, 0.05mg/Lのヒ素濃度を超える井戸は調査井戸の実に45%にも及んでいることが報告されている<sup>23)</sup>. また、調査井戸の平均ヒ素濃度は0.2mg/Lで、最大3.7mg/Lを含有している。

地質調査による異なった搾井の各深度における土砂中ヒ素濃度を測定した例では、表6のようにヒ素含有濃度は15~77mg/kgと非常に高濃度で、濃度範囲が広いことはみられるものの一定した地層に局在することは認められていない<sup>24)</sup>.

#### 6) ヒ素汚染地域における慢性ヒ素中毒

慢性ヒ素中毒患者の報告は、Guraiらが24Parganas郡の1農村で16例を発見したのが最初である<sup>16)</sup>.

Mazumderらは、カルカッタ49km南の2つの農村で163人について疫学調査を行い、62例 (38%) の慢性ヒ素中毒患者を見いだした<sup>18)</sup>.

また、Chakrabortiらは、24Parganas, Burdwan, Nadia郡の6農村において127家族のうちの48家族に、また784人のうち197人 (25%) に慢性ヒ素皮膚疾患を認めた。これ

表5 調査井戸のヒ素の濃度の頻度

濃度の範囲	0.01	0.01-0.049	0.05-3.7	全調査井戸数
平均濃度	-	0.025	0.220	
井戸の数	7548	3405	8754	19,707

表6 深度による地層のヒ素含有量 (mg/kg)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
6-12				14.9						
21-43					17.2					
37-40						43.1				
49-76					25.7					
61-67		19.4	19.7							
73-79				15.9					21.9	
79-82									41.8	122.5
82-85									18.5	
85-91				17.4						
107-110					20.6					
110-113					18.9		28.4			
137-152								77.6		
154-157	24.5									
155-195								15.2		
170-177				13.4						
208-211	69.5									

らの地域の71井戸水の調査によると平均濃度0.64mg/Lで、55井戸(77.5%)で許容濃度を超過していた。

1986年～1991年までにカルカッタの病院で観察した慢性ヒ素中毒と診断された1506人のうち1040人(66%)で慢性皮膚疾患に罹っていることが再確認された。また、Mazumderらは、最近ある農村において110家族636人の調査を行い、手のひら、足底の過角化症(雨滴)状色素沈着が63人(9.9%)がみられた。636人のうち93人は飲料水中ヒ素の濃度は許容値以内であったが、残りの543人は0.06～2.98mg/Lの井戸水を飲用していた<sup>19)</sup>。

さらに、Mazumderらは、来院したヒ素中毒患者156人の疾病の割合を検討している(表7)。それによると、全患者に色素沈着がみられ、同時に角化症、肝臓肥大、結膜炎、衰弱、咳等が高い頻度で認められたと報告している<sup>25)</sup>。

また、汚染地下水を飲用した住民の尿、爪及び髪の毛中のヒ素含有量を調査した結果は、表8のようである<sup>26)</sup>。尿中

ヒ素の排泄量は対照群で0.02mg/Lに対して、0.05mg/L以上のヒ素含有井水を飲用した住民は実に36倍以上の0.8mg/Lのヒ素の排泄を示している。ヒ素汚染の程度を知るのに重要な指標となる爪では、対照群が0.76mg/kg程度であるのに対して、ヒ素汚染住民では15mg/kgで20倍以上を示している。さらに、髪の毛では対照群に比して実に40倍以上の8.44mg/kgを認めている。また、対照群はないものの、皮膚中でのヒ素含有量は頭髮と同様な値を示していた。

7) ヒ素汚染の原因

この地方では飲料水は地下水を汲み上げてこれを利用してきた。1970年、地下水のヒ素汚染はなかったか若しくは少なかったと考えられる。1970年代後半に入り、この地区では2つの大きな変化がみられた。1つには、独立等の影響によってバングラディッシュから人口流入が起り、これに伴っ

表7 156患者の症状別割合

疾 病	発症数 (率)	疾 病	発症数 (率)
色素沈着	156 (100%)	衰弱、虚弱	110 (70.5%)
角化症	96 (61.5%)	知覚異常	74 (47.4%)
貧血	74 (47.4%)	咳	89 (57.0%)
肝臓肥大症	120 (76.9%)	血痰吐出	8 (5.1%)
脾臓肥大症	49 (31.4%)	呼吸困難	37 (23.7%)
腹水症	5 (3.0%)	頭痛	32 (20.5%)
足部水腫	18 (11.5%)	吐き気	17 (10.9%)
結膜炎	69 (44.2%)	腹痛	60 (38.4%)
多発性神経症	21 (13.4%)	下痢	51 (32.6%)
皮膚がん	2 (1.3%)		

表8 0.05mg/L以上の水を飲用する住民の尿、爪及び髪の毛中のヒ素含有量

		対象地区の住民	0.05mg/L以上の水の飲用住民
尿	平均+SD	0.0242+0.0105	0.865
	範囲		0.03-4.58
	人数	0.013-0.056	1166
爪	平均+SD	0.756+0.1089	15.25
	範囲		1.10-57.6
	人数	0.50-1.10	990
髪の毛	平均+SD	0.204+0.1057	8.44
	範囲		1.00-42.15
	人数	0.175-0.494	671
皮膚鱗屑	平均+SD		8.66
	範囲		0.8-17.75
	人数		150

て水需要が増加したことが挙げられる。さらに重要なことは、これら対象地域は、以前は1毛作であった。これに対して、州政府は地区の農民の生活向上を目指して、経済効果の高い2あるいは3毛作を奨励した。しかしながら、この地域は米作を主体とするもので農業用水を多量に必要とした。さらに、この地域は雨期と乾期に分かれ、雨期でのガンジス川からの取水は可能であっても、乾期にはガンジス川の利水は望めず農業の水需要を賄うことはできない。このため、多量に地下水を汲み上げる方策が必要となり、現在も行われている。

また、この地域は、ガンジス川の河口付近に近く、広範囲にしかも厚く砂層で構成された埋積層を形成している。この地層にランダムにヒ素を多量に含有した層が形成されていると考えられている。さらに、この地層には不透水層が深井戸程度の深度まで無いものと考えられている。

このような条件から、大量の地下水を汲み上げた場合、明らかにヒ素含有層から井戸の取水の深さまでヒ素で汚染する可能性があると考えられる。

また、これと異なった考え方として、地下水位の低下が空気中の酸素を地中に引き込み、これが黄鉄鉱に触れてヒ素が溶出しやすくなったとする見方もある。

#### 8) インド西ベンガル州とバングラディッシュにおける比較

西ベンガル周辺におけるインドとバングラディッシュは図2にも示したとおり、国境で分断されているものの地理的あるいは地形的には同様な状況であることが予想されるが、ヒ素汚染における状況を比較すると表9のようである。そのヒ素汚染の面積：インド西ベンガル州；88,752km<sup>2</sup>のうち37,000km<sup>2</sup>、バングラディッシュ；38,000km<sup>2</sup>、合計75,000km<sup>2</sup>（北海道83,000km<sup>2</sup>）、汚染地域人口：インド；3,400万人、バングラディッシュ；3,800万人（推定）、合計7,200万人、ヒ素汚染水飲用人口：インド万人；100、バングラディッシュ；1,600万人（推定）、発症者数：インド；20万人、バングラ

ディッシュ；不明等の状況で、ヒ素汚染地域では人口の20%以上がヒ素中毒を発症し、年に8%の割合で患者が増加しているという深刻な事態に至っている。これに加えて、汲み上げられたヒ素含有地下水は農耕地はもちろんのこと自然環境を汚染し、生態系への影響も懸念される場所である。このような地下水による重金属汚染は、世界の開発途上国共通と言ってもいい問題であるが、特に西ベンガル湾周辺両国では世界でみられた汚染事例と比較にならないほど大規模である。

#### 9) その他の問題

西ベンガル州におけるヒ素汚染は1983年に公式報告されたが、その後の多くの調査でヒ素の汚染地下水の飲用による被害者は年々増加の一途をたどっている。表10からも明らかのように、この数年間にヒ素汚染地域が非常に早い速度で広がっていること及びヒ素による慢性皮膚中毒患者推定数が急激に増加していることが認められる。インドにおける調査は、この数年始まったばかりであることから、調査範囲は年々広がることが予想される。

さらに潜在的な問題として、この州における人口の推移である。表11のように2000年までに10年間で25%も増加していくことが試算されている<sup>27)</sup>。この人口増加は、ヒ素汚染地下水を利用する人口が減少するどころか増加することを意味しており、飲料水確保の対策が速やかに行われたとしても、慢性ヒ素中毒患者の発症者数を抑制させることは難しい。さらに、人口増加は一人当たりの土地の利用面積に直接的に影響し、2025年には現在の半分程度になると推定される。ヒ素中毒については栄養との関連性も指摘されていることから社会経済的な環境悪化は、ヒ素問題に加わることが予想される。

また、この地域における社会構造的な問題として、幼児（乳児？）死亡率が8%と極めて高い。一方、ヒ素による死亡率は8%を超過していると考えられる。このことは、若年

表10 ヒ素汚染の範囲とヒ素皮膚疾患

報告年	市・郡	ヒ素汚染 地区	皮膚疾患 者数	調 査 井 戸 数		
				汚染者数	井戸数	0.01 0.05 mg/L以上
1983※		47	1,214			
1991※		427	200,000		9700	5581 4008
1993	37	155		955,885	1802	
1994	65	766		3,932,990	3920	
1995	70	801		4,061,243	4283	
1996	70	999		4,462,503	5657	
1996※		560	220,000			

表11 人口の推移と土地の経年的な利用状況

年	人口 百万人	増加率 (10年)	一人当たりの 利用面積 ( )
1951	26.30		2977
1981	54.58		1435
1991	67.98	125%	1152
2000	84.34	124%	928
2025	134.5		582

層が増加せずに労働可能な年齢層がヒ素によって脅かされていることを意味しており、重大な問題である。

10) 世界におけるヒ素汚染事例とインド西ベンガル州の事例との比較

世界におけるヒ素汚染事例とインド西ベンガル州の事例との比較すると表12のようである<sup>23)</sup>。ヒ素汚染地区の住民の中の皮膚疾患の発症率は、いくつかのランダムな疫学調査(12%, 38%, 25%)から、台湾19%, タイ21.6%, メキシコ21%, チリ16%等である。これらデータを基に現在の汚染調査段階では、0.05mg/L以上のヒ素含有水を飲用している100万人の20%が慢性皮膚疾患から発症するとした場合約200,000人がこの疾患に罹っているものと試算している。しかしながら、先にも記したように、調査範囲には未だ1/2程度であり、今後疾病者数は増加の一途を辿ることは明らかである。

世界のヒ素汚染による被害の特徴は、地質に由来することから広範囲が汚染対象地域となるため対象人口が多いこ

と、皮膚疾患の罹患率が非常に高いこと及び皮膚等の疾患の後に内臓器官の疾病が発症すること等が挙げられる。その中でもこのような特徴を持つヒ素汚染問題は、インド西ベンガル州においては特に、広大な地域がヒ素含有地層であることからヒ素被害対象人口は100万人に止まらず、世界で最も悲惨な状況になる可能性を持っている。

6. 今後の課題

多くの発展途上国では、人口の増加、貧困、経済の低迷など、社会構造全般にわたる問題に悩まされている。これらの国では、問題の解決の手段として新たな産業の育成、農耕地の確保等を目指して未利用地域の再開発を施策として推進している。開発の主な狙いは、農業用水、工業用水あるいは飲料水等の水資源確保で、その手段として安価な地下水の利用が世界各国でなされてきた。しかしながら、これら地域の地下水中には有害性金属を多く含有する例も多数みられ、特に、ヒ素汚染による健康被害は世界各国で大きな社会問題を引き起こしている。また、このような発展途上国の地域では科学技術や情報の恩恵を受けることが少ないことから、人の健康上のリスクが高いことを認識していないばかりか、汚染実態を把握する調査すら実施されていないことが多い。

したがって、地下水の開発と同時に水質を調査することは極めて重要で、特に地下水中のヒ素は微量でもヒトの健康に影響を与えることから、正確に計ることが求められ、その方策として高性能な機器分析による手段が望ましい。しかしながら、これら未開発の地域では国や地域における公衆衛生に対する認識が低いこと、電気、水道、ガス、交通等の生活

表12 世界における主なヒ素汚染と砒素による皮膚中毒症例の割合

地 域	年 間	暴露人口	ヒ素皮膚疾患の%
台 湾	1961-1985	103,154	19
Antofagasta, チリ	1958-1970	130,000	16
Monte Quemado, アルゼンチン	1938-1981	10,000	多 数
Ranpibool, タイ	1987-1988	14,085	21.6(5.9)
西ベンガル州, インド	1978-1995	1,000,000	20



関連の社会資本の未整備、分析機器に必要な資材の入手の困難性あるいは分析技術等の科学技術の立ち遅れのため、高性能機器分析を用いた科学的汚染の調査を実施することは大変困難な状況である。このため、このような地域でも簡易にヒ素汚染の状況把握ができる体制を構築することは公衆衛生の確保や健康被害の拡大を防ぐ観点から緊急の課題である。

## 7. 終わりに

以上のように、飲料水を介したヒ素の暴露の問題は、古い時代から問題となっていたもので、現代ではほぼ解決しているように見受けられる。しかしながら、自然界に存在するヒ素などの重金属は、人為的に作り出したものではなく、常に存在することから恒久的に汚染の状況と健康影響に気を配っていく必要がある。

インド国における地下水ヒ素汚染の解決には、地下水が利用できない状況では表流水に頼らざるを得ないが、その面積の広さから並大抵の資金では解決が不可能であり、国際的な協力を切に望むものである。

謝辞：本論文は科学技術庁二国間研究及び環境庁地球環境研究の一部によるものであり、この機会を頂いた、北海道大学大学院工学部真柄泰基先生及び国立公衆衛生院水道工学部国包章一先生に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) 山内博：砒素 (As)。臨床検査, 34 : 1456-1458, 1990
- 2) Ronald Eisler : A Review of arsenic hazard to plants and animals with emphasis on fishery and wildlife resources. Environ Sci Technol, 127 : 185-259, 1994
- 3) 日本科学技術情報センター：ヒ素及びヒ素化合物。大気汚染物質のレビュー, 平成4年度 重金属の生体影響 : 6-8, 1992
- 4) 山中健三, 林裕崇 et al. : 砒素化合物のメチル化代謝と遺伝子傷害誘発との関連性。第7回ヒ素シンポジウム講演集 : 100-101, 1995
- 5) 越智崇文, 貝瀬利一, 太田幸子 : 無機及び有機ヒ素化合物の細胞毒性と毒性発現におけるグルタチオンの役割。第7回ヒ素シンポジウム講演集 : 102-103, 1995
- 6) Korte N : Naturally Occurring arsenic in groundwaters of the Midwestern United States. Environ.Geol.Waters Sci., 18 : 137-141, 1991
- 7) Chien-Jen chen and Li-Ju Lin : Human carcinogenicity and atherogenicity induced by chronic exposure to inorganic arsenic : Advanced Environmental Science Technology, 27 : 109-131, 1994
- 8) John R.Fowle : Health effects of arsenic in drinking :research needs. Environmental Geochemistry and Health, 14 : 63-68, 1992
- 9) 中村家政 : 宮崎県土呂久に発生した慢性砒素中毒症について (第一報, 第二報)。熊本医学会雑誌, 47 : 486-515, 516-530, 1972
- 10) Hindmarsh JT, McCurdy RF : Clinical and environmental aspects of arsenic toxicity. CRC Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences, 23 : 315, 1986
- 11) Hao Xu : Estimation of human exposure to and uptake of arsenic found in drinking water. Advanced Environmental Science Technology, 27 : 173-183, 1994
- 12) D. Warner North, Risk assessment for ingestid inorganic arsenic:a reviewand status report. Environ-mental Geochemistry and Health, 14 : 59-62, 1992
- 13) 白鳥博志ら, 食品汚染物質摂取量調査 (V), 宮城県保健環境センター年報, No.9(1990)P.59-63 1991 92A0065031
- 14) 日本薬学会編, 衛生試験法。注解 1990, p581-582, 1112-1118金原出版 (1990)
- 15) 木村修一編, 第8回ABCシンポジウム 微量元素と生体 pp149-157秀潤社(1987)
- 16) Garai, R., Chakraborty, A. K., Dey,S.B. et al.: Chronic arsenic poisoning from tube-well water,J.Indian Med.Assoc. 82:34-35,(1984).
- 17) Saha, A. K.: Genesis of the Arsenic in ground water in parts of West Bengal, Amm. vol. Center for study of man and environment, p1, (1991).
- 18) Guha Mazumder, D. N., Chakraborty, A.K., Ghose, A. et al.: Chronic arsenic toxicity from drinking tubewell water in rural West Bengal, Bull. Wld. Health Org. 66: 449-506, (1988).
- 19) Guha Mazumder, D.N., Das Gupta, J., Chakraborty, A. K. et al.: Environmental pollution and chronic arsenicosis in South Calcutta, Bull. Wld. Health Org. 70: 481(1992).
- 20) Chakraborty, A. K. and Saha, K. C.: Arsenical dermatosis from tube well water in West Bengal, Indian J. Med. Res. 85:326-334 (1987).
- 21) インド国西ベンガル州資料
- 22) D. Chakraborti., Arsenic contamination in ground water in six Distriets of West Bengal, India: The background International Conference on arsenic in ground waters: cause, Effect and remedy 6-8 Fed 1995 p.
- 23) Bad al, K. R. et al., Arsenic in grand waters in sever Distriets of West Bengal, India-The Biggest Arseni calamity in the world: the statas report upto January, 1996, Current Science 70, 976-986.
- 24) D. Das, G. Basu, T. Roy Chowdhury and Chakraborty, Bore-Hole Soil-sediment analysis of some arsenic affected areas. International Conference on arsenic in ground waters: cause, Effect and remedy 6-8 Fed 1995
- 25) N. D. Guha Mazumder, J. Das Gupta, A. Santra, A. Pal, Alope Ghose, N, ChattD. chakrahorti, Chronic arsenicosis in west bengal: A Study on Health hazard. International Conference on arsenic in ground waters:cause, Effect and remedy 27 1995
- 26) D. Das, et al., Arsenic contamination in ground water in six Distriets of West Bengal, India: the Biggest Arsenic calamity in the world Analyst 119, 168N-170N (1994).
- 27) Balaram Bose, water resonrces in West Bengal: An Overview scenario International Conference on arsenic in ground waters:cause, Effect and remedy 6-8 Feb. 1995.