

南バングラデシュにおける地下水流動と ヒ素の分布について

GROUNDWATER FLOW AND THE ARSENIC CONTAMINATION IN SOUTHERN BANGLADESH

梅木知裕¹・真野明²・石橋良信³

Tomohiro UMEKI, Akira MANO and Yoshinobu ISHIBASHI

¹学生会員 工修 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

²正会員 工博 東北大学大学院教授 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06)

³正会員 工博 東北学院大学教授 工学研究科 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1)

Arsenic contamination had been found all over Bangladesh in 1993, however, the groundwater flow and the mechanism of arsenic contamination have not been made clear yet. Because the arsenic contamination spreads through the groundwater, it is important to understand the groundwater flow. We performed the field measurement from December 23rd to 25th, 2003 and from May 19th to 21st, 2004. Then we performed the numerical analysis of groundwater flow using MODFLOW to grasp the field groundwater condition.

As a result of the field measurement, the underground condition of our study area is reductive, and we consider the arsenic elutes into groundwater through a reductive mechanism in a dry season. Besides, using MODFLOW, we could reproduce the groundwater flow properly.

Key Words : Arsenic, groundwater, MODFLOW

1. はじめに

1971年以降の手押しポンプ井戸の普及に伴い、約1億4,000万の人口を抱えるバングラデシュでは国民の95～97%が飲料用水として地下水を利用するようになった。しかし国土の70%で地下水のヒ素汚染が拡大し、世界保健機関（WHO）が飲料水中のヒ素濃度を0.01mg/lとするガイドラインを示しているのに対して、バングラデシュの飲料水基準は0.05mg/lと旧ガイドライン値が用いられている。それに関わらず、同国が定める飲料水基準を超える井戸は25%にものぼり、約3,500万人の人々が慢性的なヒ素中毒の危機にさらされている¹⁾。

バングラデシュでは、ヒ素を飲料水から除去する手法の開発²⁾や代替水源の確保³⁾、汚染の分布状況⁴⁾などについての研究は進められているが、南バングラデシュを対象とした地下水流動や近況の汚染状況の調査に関する研究例は見当たらない。また、ヒ素は地下水を通して輸送されているため、地下水の流れを把握することは今後汚染がどのように拡大していくかを予測し、ヒ素で汚染された地下水の使用を回避する上で重要となる。

そこで本研究では現地での水質観測と、そのデータを

基に、USGS作成の差分法を用いた地下水流動解析プログラムMODFLOW⁵⁾によって地下水流動について解析し、バングラデシュの対象領域におけるヒ素汚染の現状把握と地下におけるヒ素溶出のメカニズムの特定及び今後の汚染予測を行うことを目的としている。

2. 対象領域

対象領域は西側をGorai川で、東側をPadma川で、そして南側をBengal湾で囲まれた、領域面積がおおよそ17,000km²の地域である(図-1)。領域は、標高1～20m程の低平地で、下流域はPadma川の堆積物で構成されたGangesデルタとなっている(図-2)。

ヒ素汚染は主に深さ40m以内の比較的浅い井戸で著しく、一方で深さ150m以上の深井戸においてはほぼ確認されておらず、主要な水源となりつつある。また、ヒ素汚染はバングラデシュ南部・南東部において顕著であるが、北西部や標高の高い北部中央では顕在化していないという地域的な特徴を有している。しかしながらそのような北部のヒ素汚染が顕在化していない地域でも、局所的に高濃度のヒ素で汚染された井戸が確認されている。

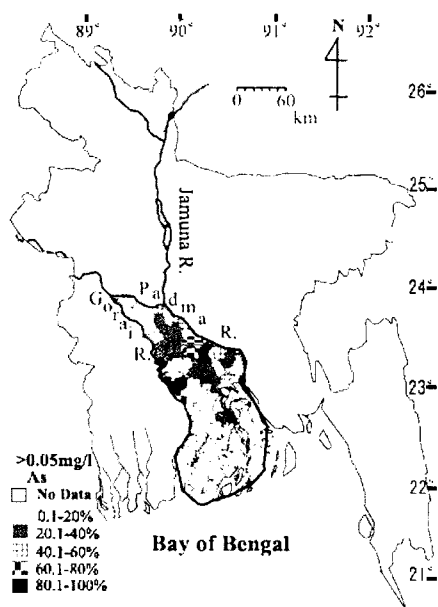


図-1 対象領域の概要

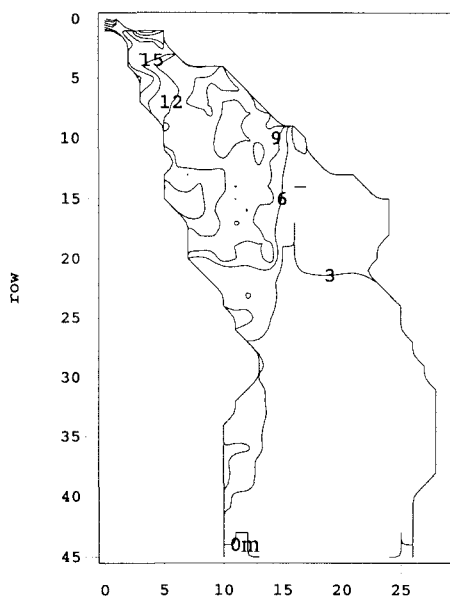


図-2 領域の標高

さらに、今から1万年前までの完新世の沖積層やGangesデルタの堆積物が特にヒ素の影響を受けており、それに対してバングラデシュ北西部で近年堆積した沖積層や北部中央の更新世の土壌は通常、ヒ素の影響が小さいという知見が得られている¹⁾。

バングラデシュのヒ素は天然由来のもので、あるメカニズムによって地下に堆積したヒ素が地下水へ溶出していくものと考えられており、現在までのところそのメカニズムについては主流となっている2つの見解がある。ひとつは、先に河川を輸送される間にヒ素を吸着して堆積した鉄の酸化物が、還元状態下においてヒ素を溶出する還元説である。もうひとつは、井戸の普及と多量の地下水の揚水に伴って地下が還元状態から酸化状態と変化

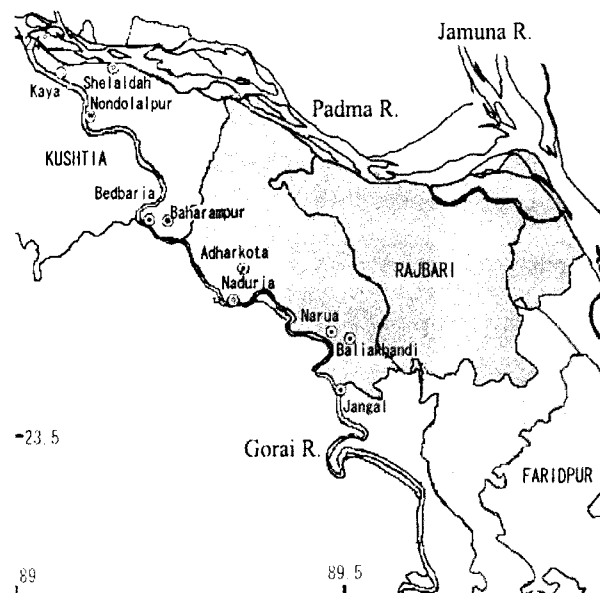


図-3 観測地点の概要

し、地下に堆積した黄鉄鉱が酸化されることによってヒ素が溶出する酸化説である¹⁾。しかしながらヒ素の溶出は地域の地質に起因するところが大きく、未だ統一的な見解は得られていないため、本研究ではこの領域を対象とした。

当該地域は図-1で示されるように各行政区に分けられており、上中流域では地下水のヒ素汚染が著しく、ある区域では全井戸の80%以上でバングラデシュの飲料水基準、0.05mg/lを超えるヒ素が検出されている。

3. 解析手法

(1) 現地観測

乾期(11月～5月頃)にあたる2003年12月23～25日と雨期(5月頃～11月)が始まる直前の2004年5月19～21日に、図-3に示すKayaからJangalまでの10観測点、計33本の飲料用・灌漑用井戸で現地観測および汚染された井戸の聞き取り調査を行った。観測地域はGorai川とPadma川の分流部付近であるKushitia及びRajbari地方であり、Rajbariの北東部にPadma川と北側を流れるJamuna川が合流している。観測項目は、地下水位・ヒ素濃度・水温・DO・pH・電気伝導度・酸化還元電位である。現地の井戸のほぼ全てで各自自治体によって簡易的にヒ素濃度が測定され、バングラデシュの飲料水基準を超えるヒ素濃度が観測された井戸は使用するのには不適と見なされ赤いペンキで、それ以外の安全だと思われる井戸は緑色のペンキで塗り分けられている。1つの村において3箇所の異なる深さの井戸で観測を行ってサンプルを採取した。採取したサンプルはスウェーデンのKTH laboratory及びBangladesh University of Engineering and Technology (BUET) に分析を依頼した。

表-1 2003年12月23～25日の現地観測結果 (bdlはbelow detectable level, 測定可能レベル以下だったことを表す)

Village name	Depth (m)	As III (mg/l)	As V (mg/l)	As T (mg/l)	DO (mg/l)	pH	Eh (mV)	Remarks
Kaya	36	<0.01	<0.01	bdl	0.04	6.66	40	As Free
	21	<0.01	<0.01	bdl	0.20	6.67	25	As Free
	27	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.65	75	As Free
Shelaldah	27	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.85	50	As Free
	36	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.72	30	
Nondolalpur	33	0.02	0.02	0.05	0.00	6.60	<-100	As Free
	14	0.06	0.06	0.11	0.00	6.66	<-100	contaminated
	36	0.14	0.11	0.24	0.10	6.55	<-100	contaminated
Bedbaria	30	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.81	25	
	48	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.56	<-100	irrigation
	39	0.01	0.03	0.05	0.00	6.67	<-100	contaminated
Baharampur	36	<0.01	<0.01	bdl	1.00	6.67	35	As Free
	45	0.01	0.03	0.04	0.00	6.47	<-100	irrigation
	39	0.01	<0.01	0.01	0.00	6.68	<-100	contaminated
Naduria	39	0.32	0.34	0.66	0.00	6.80	<-100	contaminated
	47	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.50	<-100	sulfated
	48	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.60	25	
Adharkota	45	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.64	15	
	47	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.73	<-100	H ₂ S smell
	135	0.01	0.01	0.02	0.00	6.54	<-100	
Narua	42	0.11	0.01	0.12	0.00	6.47	<-100	
	48	0.10	0.00	0.10	0.00	6.38	<-100	
	36	0.01	0.01	0.02	0.00	6.35	<-100	
Baliakhandi	48	<0.01	<0.01	bdl	0.00	7.32	60	
	51	<0.01	<0.01	bdl	0.00	7.38	30	
	48	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.86	25	
Jangal	50	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.48	50	
	38	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.48	30	
	48	<0.01	<0.01	bdl	0.00	6.52	30	

分析では初めに全ヒ素濃度を測定し、3価のヒ素を吸着せずに5価のヒ素を選択的に吸着する樹脂を用いて、3価のヒ素だけの濃度を測定した。5価のヒ素濃度については全ヒ素濃度から3価のヒ素濃度を差し引くことで算出した。

(2) 数値解析

地下水流動の解析にはUSGS作成による地下水流動解析プログラムMODFLOWを用いる。このプログラムは、飽和浸透やダルシー則、質量保存則を適用し、入力値として初期地下水位、透水係数、貯留係数、降雨量、河川水位、揚水量、蒸発散量等を与えることにより地下水位と水収支を出力する。

地下水流動の基礎式はダルシーの式と連続の式より、次式のように与えられる。

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + r - q \quad (1)$$

ここで h は水頭、 S は貯留係数、 $K_{x,y,z}$ は x, y, z 方向の透水係数、 r は単位面積・単位時間あたりの河川と降雨からの涵養量であり、 q は単位面積・単位時間あたりの揚水量・蒸発散量となっている。また境界条件として、

Padma, Gorai両河川の河川水位と海水位(0m)を与え、初期条件として、実測値を基とした地下水位を与えた。

数値解析で用いた各メッシュの標高データはUSGS・GTOPO30の空間分解能30秒のデータを用い、その他の降雨量、蒸発散量、河川水位、地下水位の各種入力データは全て、雨量計や蒸発計、水位計等を用いて測定された実測値をInstitute of Water Modellingより入手し、降雨量、蒸発散量、河川水位は月毎に月平均値を与えている。

揚水量については具体的に測定された値がないため、文献⁹⁾等のデータを基に井戸1本当たり100/dayと仮定し、領域全域に井戸を分布させて1年を通して一定の値を与えている。

透水係数及び貯留係数に関しては、バングラデシュ東部に位置するシャムタ村で宮崎大学によって行われた野外実験⁹⁾を基にしている。

なお、この解析ではモデルの地層を1層のみで地中の層の境界を地表と平行とし、地下水は不圧地下水を仮定している。

4. 結果と考察

(1) 現地観測

表-1に現地での観測結果を示した。表中のDepthは井戸の深さ、AsIIIは3価のヒ素濃度、AsVは5価のヒ素濃度、

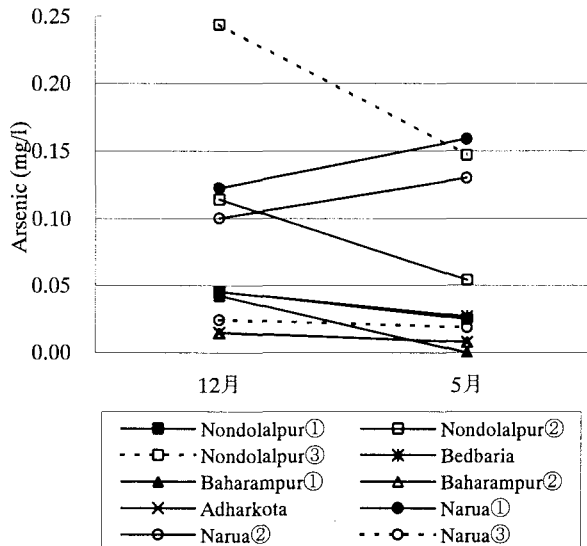


図-4 12月と5月の全ヒ素濃度

DOは溶存酸素、Ehは酸化還元電位を表している。また表中のRemarksにおいて、As Freeは各自治体によって測定された際のヒ素濃度が飲料水基準以下だったことを、contaminatedは飲料水基準以上だったことを表している。バングラデシュではより安全な地下水を供給する深井戸が普及しつつあるが、観測地域においては浅井戸が主水源となっているのが現状である。現地観測および聞き取り調査を行った上流側のKayaやShelakdahでは汚染が顕在化している井戸は少なく、ヒ素濃度も測定可能なレベルよりも低い濃度となっている。一方、そこからやや下流に位置するNondolalpurやさらに下った中流域では、飲料水基準値を超える濃度のヒ素が観測され、赤いペンキで塗り分けられた井戸も多く見受けられた。また、その汚染状況も飲料水基準を2～10倍程も上回るものとなり汚染の深刻さが伺える。Rajbariの南側に位置するBaliakhandiや、Faridpurとの県境付近のJangalでも上流側の地点と同じく汚染は顕在化していない。

土壌は概ね中性に近い値を示し、pHの値の差異によるヒ素の溶出傾向は確認できなかった。また、酸化還元電位を表すEhとDOの観測値より一般的に観測地域の地層は還元状態であるが、特にNondolalpurやNaruaなどのヒ素汚染が進行している地点で、より還元状態が進んでいることが分かった。それとは対照的に電位が比較的高い値を示した井戸からは、基準値を超える程のヒ素は観測されなかった。この結果より特に観測地域においては、乾期に主に還元的なメカニズムによってヒ素が溶出していると推察された。

さらに採取したサンプルを数日放置したところ、鉄分の沈殿が確認され、この地域ではヒ素が鉄と共沈して堆積した可能性があることが示された。一方で硫化水素臭が確認された観測地もあり、堆積物中の硫化物がヒ素の溶出に影響を与えている地点があることも考えられる。

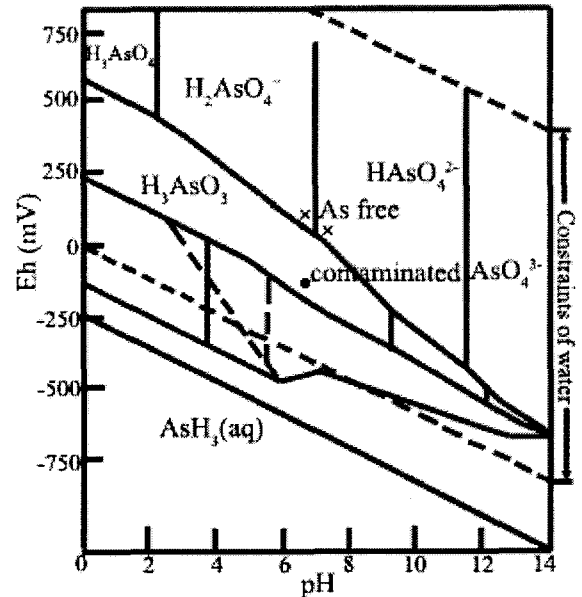


図-5 ヒ素に対するEh-pHダイアグラム⁹⁾

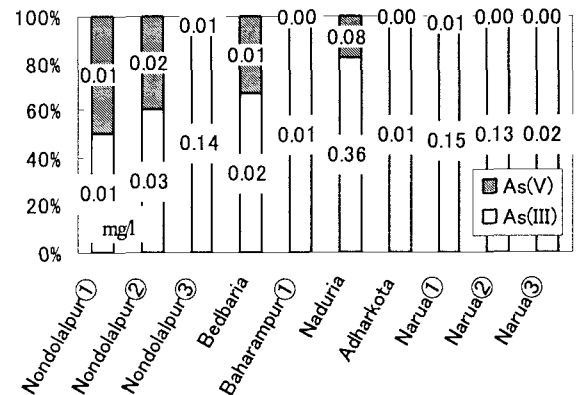


図-6 As (III) とAs (V) の割合

各自治体によってヒ素濃度が測定され、飲料水基準以下と判定された NondolalpurとBaharampurの井戸では、ヒ素汚染が飲料水基準値近くまで進行していることが確認された。それとは反対に、同じくBaharampurの飲料水基準以上とされていた井戸では、基準値を下回るヒ素が確認され汚染が緩和していることが伺える。

雨期直前の2004年5月の観測では、上中流域の酸化還元電位が100mV程減少して還元状態が進行したが、下流側のBaliakhandiやJangalの一部では50mV程増加した井戸も見られた。その他、DOやpHの値には12月と5月で大きな差異は見られなかった。

図-4には12月と5月の全ヒ素濃度を示した。Narua以外では12月から5月にかけて全ヒ素濃度が減少してヒ素汚染の緩和が見られるが、短期的な濃度の増減が何を原因としているのかは分らなかった。

水溶液中の酸化還元電位とpHの2つパラメータによってヒ素がどのような形態をとるかがMontgomery⁹⁾によって示されたものが図-5である。さらに図には、観測を行った各井戸の酸化還元電位とpHの実測値を基にプロッ

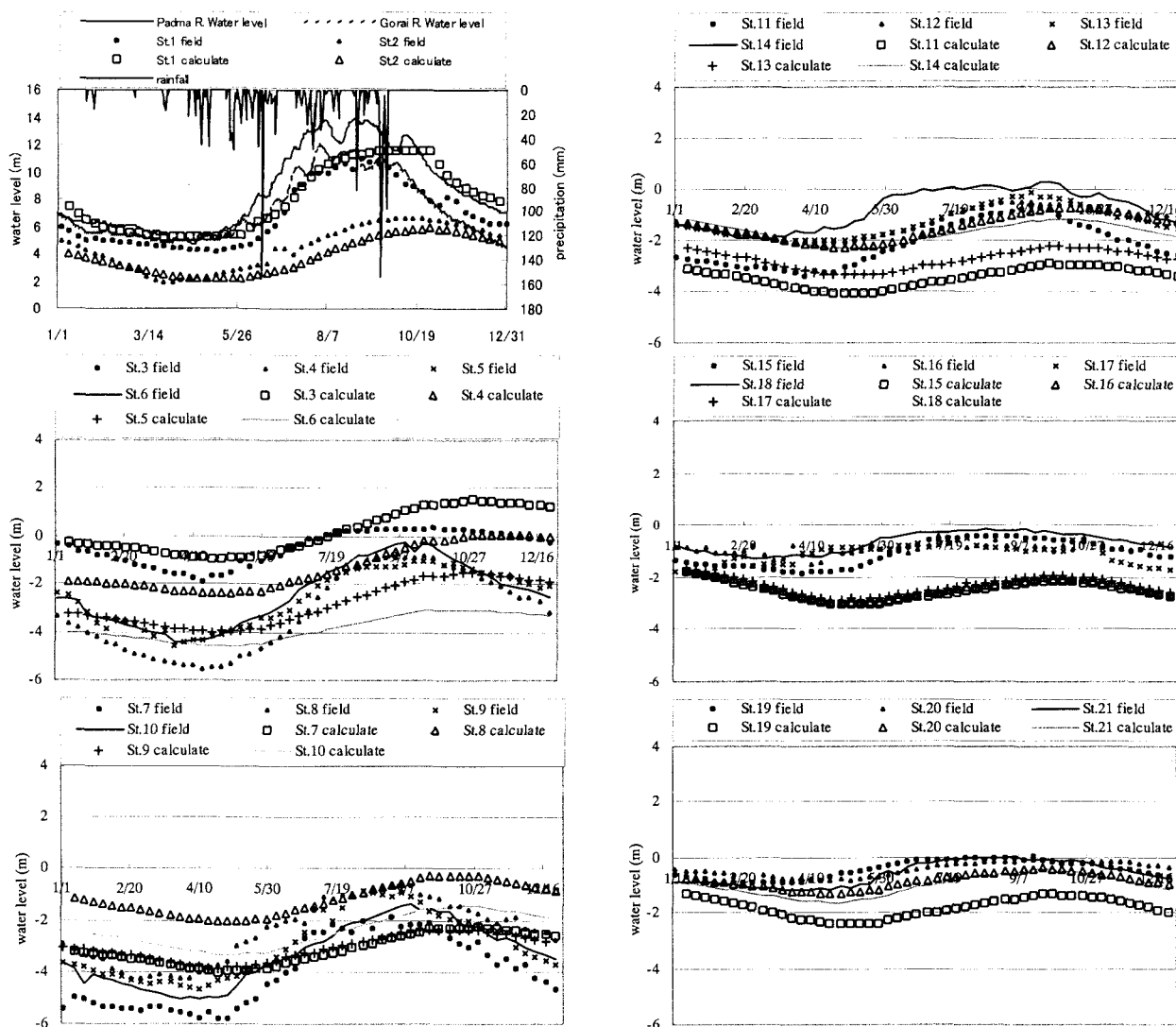
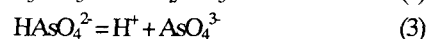
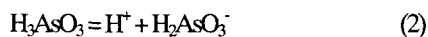


図-7 地下水位の実測値と計算値の比較

トした。各井戸の酸化還元電位とpHに大きな差異はないため、概ね3つのプロットで区別される。そして各プロットはさらに、それぞれの井戸のヒ素濃度が飲料水基準値以下か基準値以上かの違いによって、As freeかcontaminatedかを区別した。ここで式(2)、(3)は水溶液中のヒ素の形態を示し、(2)式は3価のヒ素を、(3)式は5価のヒ素を表している。



そしてこの結果より、ヒ素汚染が顕在化している井戸のサンプル中では通常ヒ素の形態が3価で、一方で低いヒ素濃度が観測された井戸では主に5価の形態をとると判断される。

図-6は5月にサンプリングされた井戸水の、3価と5価のヒ素濃度の割合を示したものである。結果は概ね、全ヒ素濃度中で3価のヒ素が占める割合が高い。また、特にNaduriaやNarua等の各井戸は全ヒ素濃度も高く、汚染が深刻なものとなっている。

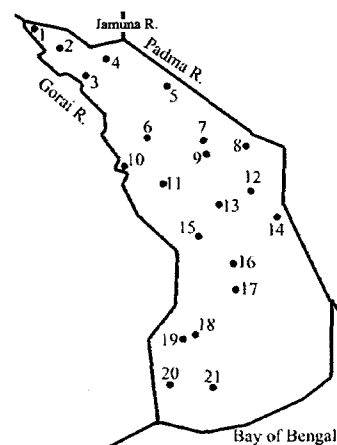


図-8 地下水位の観測地点

(2) 数値解析

図-7には、図-8に示す21観測における地下水位の実測値と、解析によって得られた計算値を比較した図、および一番左上の図にはPadma川とGorai川の水位と降水量を示し、地下水位と河川水位は左側の軸に、降水量は右

表-2 領域平均流出入量

	単位(mm/month)				
	流出		流入		貯留
	揚水	蒸発散	河川	降雨	
乾期(11~4月)	116.8	119.7	45.3	32.2	-158.9
雨期(5~10月)	116.8	130.2	83.6	282.6	119.1

側の軸に対応している。なお、地下水位の現地観測が行われている地点は図-8に示す通りである。全体的に計算値は乾期・雨期の両期間終盤に、水位が最も低下・増加した際の地下水位を的確に表現出来なかったが、1年を通して実測値と計算値には大きな差異は見られず比較的良く再現できている。地点1, 2は良く一致しており、地点1はPadma川, Gorai川両河川の分流部近くであるため、雨期に河川水位が増加するのに伴って地下水位も大幅に増加している様子が再現できている。一方、領域の内陸に位置する地点13, 16, 17や下流側の低平地にある地点18~21は河川からの涵養の影響が小さく、1年を通して地下水位に大きな変動がないことが再現されており、上流側に比べて地下水の循環サイクルが非常に緩やかな速度であることが伺える。

続いてMODFLOWを用いて求められた水収支を基に、対象領域の流出入量を表したものを表-2に示した。ここでは、流入量は河川と降雨からの涵養によって構成され、流出量は蒸発散と井戸からの揚水によって構成されている。そして流入量と流出量の差が地下水位の増減に反映される。表-2の結果、乾期、雨期ともに井戸からの揚水が流出量中に占める割合は約50%程で、乾期には地下水の流出量が流入量を上回り、井戸からの揚水が蒸発散と同程度の割合で地下水位の減少に寄与していることが分かる。また、雨期には降雨による涵養が地下水への流入量の80%弱を占め、地下水の流入量が流出量を上回るこの時期には地下水が貯留され、水位が増加している。

ここで将来的に深井戸が普及し、深井戸でも同様に地下水の流出量の50%程の揚水があると考え、深い帯水層の水量の減少に伴い、ヒ素で汚染されている浅い帯水層の地下水が汚染の顕在化していない深い帯水層へ浸透し、最終的に深い帯水層でもヒ素汚染が拡大することが考えられる。しかしながらこの場合、先に水平方向の地下水流動を把握しておき、後に数値解析において深い帯水層の位置と深井戸の揚水量を設定することで、浅い帯水層から深い帯水層への鉛直方向の地下水の流れを再現し、深い帯水層へ流入する汚染された地下水のフラックスを算出することが可能だと考えられる。そしてまた、

浅い帯水層のヒ素濃度を基にして、深い帯水層がどのくらいの期間で汚染され始めるかを求めることも可能であろう。

5. おわりに

2003年12月と2004年5月に行った南バングラデシュにおける現地観測より、一般的に対象領域において、ヒ素で汚染されている地域は地下が還元状態となっており、そのような地下の還元状態は汚染が顕著な地域で特に進んでいることが分かった。その結果として対象領域では特に乾期において、地下に堆積したヒ素が還元的なメカニズムを通して地下水へ溶出しているものと考えられる。また、MODFLOWを用いた数値解析により対象領域の地下水流動を再現した。算出された地下水の水収支の結果からは、対象領域では井戸からの揚水が地下水位に影響していることが分かった。なお、更なる観測および解析によって、将来起こることが予想される深い帯水層のヒ素汚染の予測が可能である。

参考文献

- 1) Kinniburgh, D.G. and Smedley, P.L.: *Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh Vol 1 Summary*, pp.1-14, 2001.
- 2) Ahmed, M.F., Ali, M. F. and Adcel, Z.: *Technologies for Arsenic Removal from Drinking Water*, Bangladesh University of Engineering & Technology and The United Nations University, 2001
- 3) 谷 正和: シャムタ村における砒素被害に関する社会科学的村落調査のまとめ, 第6回アジア地下水ヒ素汚染フォーラム, pp111-116, 2001.
- 4) McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W.: *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 1988.
- 5) Hamambe, K, Yokota, H, Jimno, K. and Nakagawa, K.: Pumping tests of Deep and Shallow Tube wells and Numerical Analysis of Groundwater Flow in Samta Village, Bangladesh. *Arsenic Contamination of Groundwater*, pp.23-32, 2001.
- 6) Montgomery, J.M.: *Water Treatment Principles and Design*, A Wiley-Interscience Publication, p.333 1985

(2004. 9. 30 受付)