公益財団法人国土地理協会 第19回学術研究助成

バングラデシュ・Ganges-Brahmputra-Meghna(GBM)デルタ における地下水の塩水化・土壌の塩性化と古地理との関係

研究代表者 伊藤 有加 東京大学大学院新領域創成科学研究科 共同研究者 Rahman Masdur 東京大学大学院新領域創成科学研究科

1. はじめに

バングラデシュとインドのベンガル西部に位置する Ganges-Brahmaputra-Meghna (以下 GBM) デルタは、未固結の河川—デルタ堆積物から構成されており浅部帯水層(SGW:浅層地下水) (後期更新世~完新世)(地下水位150m以浅(mbgl))と深部帯水層(DGW:深層地下水)(鮮新 ~後期更新世)(地下水位150m以深)が分布する(Shamsudduha and Uddin、2007)(図1)。 バングラデシュにおいて地下水は、1960年代から1990年代にかけて飲料水、生活用水、灌漑 用水として使用されてきた (Burgess et al., 2002; Ravenscroft et al., 2005; Shamsudduha et al., 2011)。 しかし、1993年に浅層地下水においてヒ素が発見され、1990年代半ばには全国的にヒ素が検出 され汚染されたため、淡水の供給が難しくなっている (BGS/DPHE, 2001; Ravenscroft et al., 2005)。 バングラデシュの 64 地区のうち、53 地区の地下水はバングラデシュにおける飲料水に含まれ るヒ素の基準値(50μg/L)を上回り、60 地区では WHO のガイドライン値とされる 10μg/L を上 回っていた(BGS / DPHE, 2001)。さらに現在、デルタ沿岸域の約 84%以上の地域ではヒ素の 汚染が広がっていると同時に浅層地下水の塩濃度も上昇していることから、その地域の淡水供 給不足が深刻化している(Mainuddin et al., 2014; Worland et al, 2015; Naus et al., 2019)(図2) (図3)。また、今後気候変動による海面上昇によってさらに悪化することも予想されており、 飲料水の塩水化が懸念される(Khan et al., 2011; Majumder et al., 2019)。したがって、塩分濃度が 低く安全とされる飲料水として可能な水は、主に深部の地下水に残っており、少なくともデル タ南部域においては半透水層よって浅部帯水層と物理的に分かれている(DPHE-APSU-JICA, 2006; Mahmud et al., 2017; Lapworth et al., 2018)。深井戸の設置は、ヒ素や塩水化に対して緩和 させるためのオプションとして考えられてきた (Burgess et al., 2002; Ahmed et al., 2006; Ravenscroft et al., 2013; Johnston et al., 2014; Knappett et al., 2016; Shamsudduha et al., 2019), 2009 年まで塩水化などへの影響を考慮せず、約165,000の小容量の深井戸用手動ポンプが設置され てきた (Johnston et al., 2014)。さらに多量に汲み上げることが可能な深井戸が本研究の対象地で もあるクルナ市を含む主要な都市域で設置されている(LGED, 2005; Burgress et al., 2010; ADB, 2011; Shamsudduha and Burgess, 2019) (図 4)。現在、数十万の深井戸はヒ素および塩水化の影 響がある地域に設置されており(Ravenscroft et al., 2013)、深部帯水層中の淡水の約 80%が国民 に供給されている(Burgess et al., 2002; Taylor et al., 2014; Edmunds et al., 2015)。おそらく国内 の飲料水の大部分は、今後も深層地下水から供給されると考えられている(Burgress et al., 2010; Ravenscroft et al., 2013; Lapworth et al., 2018)。しかし、一部の地域においてはこの深部帯水層は 汽水または塩水であることも知られている(LGED, 2005; Halim et al., 2010; ADB, 2011; Rahman et al., 2011; Hoque and Burgress, 2012; BWDB, 2013; Zahid et al., 2016; Ravenscroft et al., 2018; Sarker et al., 2018;Islam et al., 2017; Islam et al., 2019)。バングラデシュのデルタ沿岸域においては、塩水 進入の実態の把握と方策が急務であるにも関わらずそれに関する研究例はまだ十分ではない。 また、当地域のデルタの形成過程(Umitsu, 1993; Goodbred and Kuehl, 2000; Allison et al, 2003)、 古環境の変遷(たとえば Shamsudduha and Uddi, 2007) など古地理に関する研究やヒ素汚染に関 する研究(Hoque et al., 2014; Ayers et al., 2016) については、それぞれ行われているが、地下水の

塩水進入プロセスと地層・地形発達(古地理)の関係について検討した研究例は少ない。浅層 地下水および深層地下水の塩水進入の把握、その起源と地層・地形との関係性などから統合し て検討することは、将来にわたって適切に飲料水の確保及び地下水管理をしていく上で重要で ある。そこで、本研究では、バングラデシュ沿岸域の南西部 GBM デルタにおいて水質分析お よび同位体分析、古地理および地層解析によって深層および浅層地下水の塩水化の起源および その進入の把握を地層・地形、人為的要因との関係などから検討する。



⊠ 1 a) Study area, b) Conceptual diagram (not in direction or horizontal scale), showing generalized groundwater systems in the southern Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta (GBM) of Bangladeshwith their prevailing issues.

2 Spatial distribution of groundwater arsenic in Bangladesh (BGS/DPHE, 2001).

⊠ 3 Shallow groundwater salinity in coastal Bangladesh (Mainuddin et al., 2014).

⊠ 4 Spatial distribution of chloride (Cl⁻) concentrations in DGW (n=25,966) from central to southern parts of Bangladesh. Data sources are written in the caption of Figure 1.5. Cl⁻ concentration ranges based on Stuyfzand (1989)'s classification (Fresh: \leq 150 mg/L, Fresh-brackish: 150-300 mg/L, Brackish: 300-1,000 mg/L, Brackish-salt: 1,000-10,000 mg/L, and Salt: 10,000-21,000 mg/L).

2. 研究対象地域

バングラデシュとインドのベンガル西部に位置する Ganges-Brahmaputra-Meghna (GBM) デル タは、Ganges 川、Brahmaputra 川、Meghna 川よって主に形成された (Shamsudduha and Uddi, 2007) (図 5)。本地域は、高温多湿の夏と乾燥した冬となる熱帯モンスーン気候に属し、季節によっ て河川の流量は変化し年間流出量の約 80%は、モンスーンの時期に流出する (Shamsudduha et al., 2007)。これはモンスーン時に、毎秒約 300 万立方フィートの水量がデルタを流れて河川卓 越型デルタとして機能している。一方、河川の流速が毎秒 250,000~300,000 立方フィートまで 下がる冬季は、潮汐が卓越するいわゆる潮汐卓越型デルタとなる (Bhuiyan and Dutta, 2012; Rahman et al., 2000; Zaman et al., 2017)。

☑ 5 Location of the study area in the Ganges-Brahmaputra-Meghna (GBM) delta of Bangladesh. Digital elevation model (DEM) of the GBM delta from NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, & U.S./Japan ASTER Science Team (2009). It also includes locations of three Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) stations (IAEA/WMO, 2020), Mawmluh Cave, Meghalaya, India (Dutt et al., 2015; Berkelhammer et al., 2012), Khulna climate station of Bangladesh Meteorological Department, and river/surface water station (SW241) of Bangladesh Water Development Board. Paleo-coastline from Grall et al. (2018).

本地域には、最終氷期の海面低下期にかつての河川により形成された2つの埋没谷が分布する (BGS/DPHE, 2001;Hoque et al., 2012、2014)(図 1a)。その後、海水面上昇により約7000年前に 現在の海岸線から約 150km 内陸まで海が侵入していたと推定されている (Allison et al. (2003);Shamsudduha and Uddin, 2007; Grall et al., 2018)(図 1a)。

北西部に約 15~20m の更新世に形成された台地が分布し,南部には標高約 1~2m の低地が 広域に分布している(図 1a)。またこの地域では、年間約 2~4mm で地盤沈下している(Goodbred and Kuehl, 2000; BGS/DPHE, 2001; Shamsudduha et al., 2009; Haque et al., 2011, 2014)。GBM デルタ の水理地質は、未固結の河川-デルタ堆積物から構成される浅部帯水層(後期更新世〜完新世) (地下水位 150m 以浅(mbgl))と深部帯水層(鮮新〜後期更新世)(地下水位 150m 以深)が分 布する (Shamsudduha and Uddin, 2007) (図 1b)。

3. 研究方法

本研究では、現地調査と地球化学的分析(溶存成分分析、同位体分析)、統計分析、およびボ ーリングデータを用いた地質解析をおこなった。

3.1 現地調査

ベンガル西部に位置する GBM デルタ上にあるクルナ市 (図1) にて 2019 年 10 月までに採水 および水質測定をおこなった (図6) なお、2020 年は社会情勢により再渡航ができず、追加の 土壌・水サンプル採取などの現地調査を実施することができなかった。現地では、pH/導電率計

(D-54、Horiba)を用いて pH および電気伝導率(EC)を測定した後、計 247 井戸(深部帯水層 (n=166) 浅部帯水層 (n=81))の地下水を採取した(図 7)。井戸のスクリーン深度は、深部で地表面から約 155~476m(bgl)、浅部で約 15~146 m (bgl)である。深井戸は、主に生産井と 手動式ポンプ、浅井戸は主に手動式ポンプである。

溶存成分(SiO₂, Cl⁻, and Br⁻) および安定同位体(δ^{18} O and δ^{2} H)の分析のために、各井戸から 水サンプルを 30~50 ml のポリエチレンボトルに収集した。さらに、クルナ市では 6 か所の深 部(284-296 m bgl)および浅部帯水層(32~64 m bgl)の井戸から合計 36 サンプルを採取し、炭 素安定同位体(δ^{13} C)および放射性同位体(³H and ¹⁴C)の分析用として 250 ml および 1000 ml のポリエチレンボトルに収集した。放射性同位体のサンプルを除くすべてのサンプルは、シリ ンジとフィルターでろ過後に収集した。

約 10~15 分間井戸水から不純物を取り除いた後、水質測定およびサンプリングをおこなった。溶解無機炭素が二酸化炭素として脱ガスするのを防ぐために水酸化ナトリウム (NaOH) で 保存された δ¹³C および ¹⁴C サンプルを除いて、すべてのサンプルは保存料なしで保管した。

 $\boxtimes 6$: Water quality testing (a) and water sampling (b) in the field.

 \square 7: Maps showing the study area with paleogeographic settings (Hoque et al., 2014), water sampling spots, geochemical transect zones, and the paleo-coastline at the time of the last marine incursion (Grall et al., 2018).

3.2 室内分析

現地にて採水した地下水のサンプルは、以下の機関にて分析および分析依頼をおこなった。 溶存成分分析:東京大学地圏環境システム研究室(HCO₃⁻, SiO₂, Cl⁻, and Br⁻)

東京大学 環境科学センター (Cl-)

安定同位体:東京大学地圏環境システム研究室、

筑波大学アイソトープ環境動態研究センター

炭素安定同位体(δ¹³C)および放射性同位体(³H):(株)地球科学研究所

放射性同位体(¹⁴C): Beta Analytic 社(米国)

アルカリ度は酸度滴定法によって測定し、HCO₃-濃度に変換した(Clark and Fritz, 1997; Kusano et al., 2014)。 SiO₂は、色彩計を用いたケイモリブデン酸法(APHA、2017)により測定をおこ なった。 CF と Br は、Dionex Integrion HPIC(Thermo Scientific、USA)を備えた IonPacTMAS18 カラム及び Dionex DX-120(Thermo Scientific、USA)を備えた AS12A カラムを使用してイオン クロマトグラフにより分析した(Clark and Fritz, 1997; Khalil et al.、2015)。 δ^{18} O および δ^{2} H は、 調整可能な波長スキャンキャビティリングダウン分光法(WS-CRDS, L2130-*i* and L1102-*i*, Picarro Inc., Santa Clara, CA, U.S.A.)によって測定された。 δ^{13} C 濃度は、サンプル中の DIC とリン酸と の反応によって生成された CO₂を分析することにより、同位体比質量分析計を使用して測定した(Kusano et al., 2014)。水サンプルからの ³H 濃度は、電解濃縮(Clark and Fritz, 1997; Kusano et al., 2014)した後に液体シンチレーションカウンタ(LSC; LB5、Aloka)によって測定され、

結果は約0.3 トリチウムの検出制限とともにトリチウム単位(TU)で報告した。放射性炭素(¹⁴C) のサンプルは、タンデム型加速器質量分析装置(AMS)によってグラファイトターゲットで測 定した(Kusano et al., 2014; Lee et al., 2016)。これらの結果の単位は、パーセントモダンカーボ ン(pMC)として表した。

3.3 多変量解析

得られたデータは、Minitab 19 統計を使用してサンプルの解釈のために階層クラスター分析 (HCA)、主成分分析 (PCA)、および因子分析 (FA) により統計分析を行い、水サンプルを分 類した。分析には7つの変数 (pH, EC, Cl-, HCO3-, SiO2, δ18O, and δ2H) が解析に用いられた。 EC 及び塩化物濃度の値は、影響を最小限に抑え、外れ値の影響を減らすために対数変換した

(Qian et al., 2007; Templ et al., 2008)。クラスター分析には、階層クラスターのWard 法を用いて、類似度の間隔尺度としてマンハッタン距離を適用した(Strauss and Maltitz, 2017)。因子分析には、抽出およびバリマックス回転の主成分法が適用された(Suk and Lee, 1999; Güler et al., 2012)。因子数は、固有値1より大きいカイザー基準に基づいて選択した(Liu et al., 2003; Dragon, 2006)。

3.4 地質解析

本地域の水理地質構造の断面図を多数のボーリングデータを用いて作成した。本地域では、 公開されている利用可能な 3,946 のボーリングデータを取得し、それらを地質解析ソフトウェ アである Rockworks に入力してボーリングデータベースを構築した。このデータベースを用い て複数の断面図を作成した。

4 結果と考察

4.1.地下水組成の特徴

以下に、深層地下水および浅層地下水の組成の特徴についてそれぞれ表1に示す。

4.1.1 深層地下水 (DGW) の特徴

深層地下水の pH 値は 6.8 から 8.5 で、ほぼ中性からアルカリ性を示した。EC および塩化物 イオン濃度が大きいスペクトルが記録されており、それぞれ 536~8,900 μ S/cm および 2~2,532 mg/L の範囲で変化した。HCO₃. および SiO₂ は、それぞれ 250 mg/L~1,305mg/L、15~54 mg/L で変化した。Br 濃度は 0.03~8.1 mg/L の範囲にある(表 1)。Cl-/Br モル比は、海水の値に近い 地下水で大部分が 1,000 未満であることがわかった(655±4, Alcalá and Custodio, 2008) (表 1)。安 定同位体の値は、かなり広い範囲を示した(δ 18O:-6.7~-2.7‰および δ 2H:-45.2~-14.5‰)。炭素 安定同位体 (δ ¹³C)の濃度は、比較的狭い範囲(-8.4~-6.7%)に分布し、放射性炭素濃度(¹⁴C) は 7.9 から 17.5 pMC で変化した。また ³H の変動は検出限界(<0.3 TU)を下回るように測定した。

Indices	Units	Deep groundwater (DGW) ^a				Shallow groundwater (SGW) ^b			
		Min.	Max.	Avg.	Stdev.	Min.	Max.	Avg.	Stdev.
pН	-	6.8	8.5	7.7	0.4	6.6	8.0	7.1	0.3
EC	μS/cm	536	8900	2034	1489	812	9260	3126	2269
Cl	mg/L	2.0	2532.3	495.6	492.1	3.8	3110.6	797.3	853.5
HCO3 ⁻	mg/L	250.0	1304.9	415.8	105.9	280.5	1243.9	588.1	184.2
SiO ₂	mg/L	15.0	53.5	29.9	7.1	23.0	65.5	40.6	8.6
$\delta^{18}O$	‰	-6.7	-2.7	-3.7	0.7	-7.7	-3.2	-5.0	1.0
$\delta^2 H$	‰	-45.2	-14.5	-21.4	5.5	-52.7	-17.8	-32.8	7.1
Br	mg/L	0.03	8.14	2.13	1.76	0.03	8.87	2.20	2.33
Cl ⁻ /Br ⁻	molar	557	912	733	54	647	2853	827	310
$\delta^{13}C$	‰	-8.4	-6.7	-7.6	0.7	-15.6	2.3	-7.1	8.1
¹⁴ C	рМС	7.9	17.5	13.1	3.3	35.7	82.4	52.3	19.0
³ H	TU	Below detection limit (<0.3)				Below detection limit (<0.3)			

表 1 Descriptive statistics of groundwater compositions in the study

深層地下水のサンプルは、古流路と古河間地域(interfluves)で水質および安定同位体組成に 明確な違いがあることがわかった(図 8 および図 9)。古流路地域における深層地下水は古河間 地域に比べて塩化物イオン(Cl)および二酸化ケイ素(SiO₂)が高く、pH および HCO₃.は低く 、また安定同位体(δ^{18} O and δ^{2} H)は、より軽いということが明らかとなった。

⊠ 8: Box and whisker plots showing variations of paleo-channel and paleo-interfluve groundwater compositions. DGW:deep groundwater, SGW:shallow groundwater, pi:paleo-interfluve, pc:paleo-channel.

9: Variations of deep groundwater (DGW) compositions in the paleo-interfluve and the paleo-channel areas along the west-east traverse. See location of transect zone in Figure 7.

4.1.2.浅層地下水 (SGW) の特徴

浅層地下水の pH 値は 6.6~8.0 で変化し、これはほぼ中性からアルカリ性であることを示し ている(表1)。また浅層地下水では、激減した安定同位体($\delta^{18}O$ および $\delta^{2}H$)とともに、塩分 濃度(EC および Cl-)、HCO₃・と SiO₂ともに上昇傾向を示した。EC および Cl-濃度は、812~ 9,260 µS / cm および 4~3,111 mg / L で変化し、HCO₃⁻ and SiO₂ は 280~1,244 および 23~66 mg / L である。また、Br-濃度は 0.03 から 8.87mg / L まで変化した(表 1)。ほとんどの浅層地下水の サンプルは、1,000 未満(647~983)の Cl⁻/Brモル比を示し、1,000 を超えるモル比(1,054~2,853) を示す給水井戸はほぼないことがわかった。安定同位体は、それぞれ-7.7~-3.2‰($\delta^{18}O$)およ び-52.7~-17.8‰(δ^{2} H)の範囲であった。³H 濃度も検出限界(<0.3 TU)未満で測定した(表 1)。 ただし、浅層地下水には、 δ^{13} C(-15.6~+2.3‰)および¹⁴C(35.7~82.4 pMC)の濃度が高い範 囲が含まれていた(表 1)。浅層地下水のサンプルでは、深層地下水のような古流路と古河間地

で明確な違いは認められなかった(図8および図10)。

10: Variations of shallow groundwater (SGW) compositions in the paleo-interfluve and the paleochannel areas along the west-east traverse. See location of the transect zone in Figure 7.

4.2. 多変量解析

4.2.1. 階層クラスター解析

階層クラスタリング分析では、合計 7 つのクラスター(図 11)に分類され、C-1、C-2、C-3、C-4 が主に深層地下水(DWG)サンプル(それぞれ 98%、98%、94%、84%)であったのに対し、C-7 は主に浅層地下水(SGW)サンプル(94%)である。深層および浅層地下水混合サンプルは、C-5(SGW:68%、DGW:32%)および C-6 (SGW: 64%, DGW: 36%)に分類された。

11: Dendrogram with an imaginary line showing seven clusters.

クラスター間における水質組成(地球化学分析結果)と安定同位体の変動を図12に示す。深 層地下水が優勢なクラスター(C-1~C-4)は、C-6およびC-7よりも塩分濃度(ECとCI)およ びSiO²は低く、高いpHおよび重い安定同位体(δ^{18} O and δ^{2} H)が含まれていた。ほぼ同様の HCO³濃度がC-1~C-6で認められ、これはC-7の濃度よりも低い。深層地下水が優勢なクラス ターでは、C-1は比較的低濃度のEC、Cl-、Br-、およびSiO₂を示し、その後C-2、C-3、およ びC-4となる。その逆配列は、これらのクラスター間のpHおよび安定同位体組成でみられた 。HCO³濃度は、これら4つのクラスター間で少なくとも類似することがわかった。また、深 層地下水が優勢なクラスターは、それぞれ異なった空間パターンを示した(図13~14)。C-1お よびC-2は、主に古河間地域に分布する(図13)。C-1は、古河間地の中心部に分布しているの に対して、C-2の大部分はその東側に分布するといった特徴がみられる。C-3およびC-4は、 主に古流路内および古河間地域の境界付近に分布している(図14)。またC-3の大部分は、C-4 と比較して南部に分布していることがわかる。C-5~C-7については、明瞭なパターンは認めら れなかった(図15)。

12: Variations of geochemistry and stable isotopes in seven clusters.

☑ 13: Spatial distributions of deep groundwater (DGW) dominated clusters a: C-1 and b: C-2.

☑ 14: Spatial distributions of deep groundwater (DGW) dominated clusters c: C-3 and d: C-4.

☑ 15: Spatial distributions of mixed and shallow groundwater (SGW) dominated clusters e: C-5 and C-6, and f: C-7.

4.2.2. 因子分析

因子分析がおこなわれ、2 つの主因子が抽出された(表 2)。第一因子では、分散の約 45%を 説明し、SiO₂ と HCO₃ の正の因子負荷、安定同位体と pH の負の因子負荷に関連した。第二因 子は分散の約 33%を占め、EC と CI⁻は強い負の負荷を有し、pH と安定同位体は弱い正の負荷 を示した。2 つの主因子間のクロスプロットを図 16 に示す。深層地下水(DGW)が優勢なクラ スター(C-1、C-2、C-3、および C-4)は主に第一因子の負にプロットされたが、浅層地下水(SGW) が優勢なクラスター(C-7) および混合地下水クラスター(C-6) は正の側にプロットさ れた。C-5 の混合地下水サンプルは、DGW と SGW が優勢なクラスターの間にプロットさ れた。 キた、第二因子の軸に沿って、3 つのクラスター(C-1、C-2、および C-5)が主に正側にプロッ トされ、C-3、C-4、および C-6 が負側にプロットされた。C-7 のサンプルは正側と負側の両方 にプロットされた。

Variable	Factor1	Factor2	Communality	
pH	-0.717	0.431	0.699	
EC^*	0.278	-0.926	0.934	
Cl-*	0.060	-0.956	0.917	
HCO ₃ -	0.710	0.084	0.512	
SiO ₂	0.829	-0.108	0.699	
$\delta^{18}O$	-0.814	0.411	0.832	
$\delta^2 H$	-0.834	0.422	0.874	
Variance	3.1454	2.3218	5.4672	
% of variance	0.449	0.332	0.781	

表2: Loadings of Principal Factors and Communalities

*Data in logarithmic forms.

🗵 16: Distributions of clusters in 2-D cross plot between first and second factors. Note: black solid lines

indicate the loadings of variables (pH, EC, Cl⁻, HCO₃⁻, SiO₂, δ^{18} O, and δ^{2} H). DGW: deep groundwater, SGW: shallow groundwater.

4.3. 水理地質解析

本地域の地下には、低海水準期(~117-18 ka BP)の海水準低下期に風化と侵食作用により形成された古河間地域と古流路(開析谷)(BGS/DPHE, 2001; Hoque et al., 2012; 2014)が存在していることが知られている(図1)。また最高海面期の約7ka BPには、前述したように現在の海岸線から約150km、内陸まで海が浸入していたことが推定されている(Shamsudduha and Uddin, 2007; Grall et al., 2018)。下記に断面図の解析からこの地域の地質と帯水層の特徴について述べる。

4.3.1 堆積環境の特徴

本研究では、多数のボーリングデータから北西および南東方向の地質断面図を作成した。ここでは、代表的な3つの地質断面図を示す(図17)。3つの断面は古河間地域の縦断面図(図17a)および、古流路の沿った断面図(図17b)、南西から北東までの約7kaBPの海岸線に平行する断面図(図17c)である。

本地域の完新世の地質の特徴は、北から南すなわち内陸から海側に向かって厚くなる砂質の デルタを主に形成しており、その表層には氾濫原などの堆積物と考えられる粘土/シルト層がこ の地域全体に偏在している(図 17a~c)。北部は砂質堆積物が優勢であるのに対し、南部には粘 土/シルトが砂層中に挟在しており、それらの厚さは数 m~100m 以上となっている(DPHE-APSU-JICA, 2006; Shamsudduha and Uddin, 2007; Mahmud et al., 2017)。また、古河間地域の地表 面は LGM 期に長期間露出していたため、風化し酸化した後、酸化した茶色の砂上に赤い粘土 の古土壌 (McArthur et al., 2008; Hoque et al., 2014)が-50 m~-75m 付近にみとめられた (図 17a およびc)。古河間地域は、鮮新世ー更新世堆積物上に分布し、後氷期(完新世)の堆積物に覆 われている。下位の鮮新世ー更新世の砂質堆積物と上部更新世の砂質堆積物の間に粘土/シルト 層がくさび状に分布する特徴をもつ。これらは、既存研究でも指摘されてきた(BGS and DPHE, 2001; Shamsudduha and Uddin, 2007; Hoque et al., 2014)。この粘土/シルト層の分布は、南側に向か って厚くなり、北側ではその厚さが薄くなるまたは、存在していない場所もある。古流路に沿 った断面図(図 17b)では、古河川の谷上に砂礫堆積物が分布している。LGM 期に、本地域で は海水準が約-135m 低く、海水準が下がるときに古流路が形成された(Acharyya et al., 2000; Rashid et al., 2011; Hoque et al., 2014; Grall et al., 2018; Ravenscroft et al., 2018)。その後、河川の堆 積物と考えられる砂礫堆積物が堆積し、海水準の上昇とともにエスチュアリーなどの海進期堆 積物(Umitsu, 1985, 1987, 1993; Islam and Tooley, 1999; Acharyya et al., 2000; Goodbred and Kuehl, 2000; Shamsudduha and Uddin, 2007; Grall et al., 2018) に覆われたと考えられる(図 17b)。

4.3.2 帯水層の特徴

鮮新世-更新世および完新世の砂層は、本地域の主な帯水層である。北側の帯水層は主に粗 粒の単層から二層レイヤーとなっており、これらは南側に向かうほど細粒な多層システムレイ ヤーに変化している(Ravenscroft et al., 2018)(図 17a、b)。深部の帯水層は鮮新世―更新世の砂 層、浅部の帯水層は更新世〜完新世の砂層中に形成されている。浅部帯水層と深部帯水層の分 離は、水平方向に連続した粘土/シルト帯水層の存在により南側で明瞭となっている(DPHE-APSU-JICA, 2006; ADB, 2011; Mahmud et al., 2017)(図 17a、b)。また、-150m までの地層ユニ ットは、古河間地域で厚く、古流路の地域では比較的薄いことも特徴である(図 17c)。古河間 地域に沿う古土壌を境に浅い帯水層を上部と下部の浅部帯水層に分かれている(図 17a、c)。本 地域の地下水は、基本的に北西から南東方向に流れ、動水勾配は 0.01m/km と小さく(BGS and DPHE, 2001; Shamsudduha and Uddin, 2007; ADB, 2011; Majumder et al., 2019)、すなわちゆっく りとした流れである。

a

☑ 17: NW-SE schematic cross-sections along paleo-interfluve (a) and paleo-channel (b), and SW-NE schematic cross-section (c).

4.4.地下水の塩水化の起源

地下水の塩水化の起源について分析結果から検討する。 δ^{18} O and δ^{2} H 間のクロスプロット (図 18)では、すべてのクラスターがおおむね local meteoric water lines (LMWLs)の下に分布するか、 もしくはそれと非常に近いところに分布しており、これは、深層地下水と浅層地下水の両方と も基本的には局所的な降雨に由来することを示していると考えられる。またこれらの結果は本 地域における既存研究の結果とも一致している(e.g., Aggarwal et al., 2000; Dowling et al., 2003; Zheng et al., 2005; Stute et al., 2007; Mukherjee et al., 2007; Hoque and Burgress, 2012; Worland et al., 2015; Mihajlov et al., 2016; Ravenscroft et al., 2018; Majumder et al., 2019)。 しかし、現在の降水は、 検出限界(0.3TU)未満の³H 活動から認識されるような地下水源はない(表 1)。すなわち、少 なくとも 1950 年代以前に涵養が起こっていたことが示唆される。同様の調査結果は、既存研究 でも報告されている(e.g., Aggarwal et al., 2000; Dowling et al., 2003; Zheng et al., 2005; Worland et al., 2015; Mihajlov et al., 2016; Majumder et al., 2009; Dowling et al., 2003; Zheng et al., 2005; Worland et al., 2015; Mihajlov et al., 2016; Majumder et al., 2019)。図 18 では、深層地下水が優勢なクラスター (C-1, C-2, C-3, and C-4)が重い部分にプロットされ、浅層地下水が優勢なクラスター(C-7) は 軽い部分にプロットされている。これらの対照的な分布パターンは、深層地下水(7.9 to 17.5 pMC) と浅層地下水(35.7 to 82.4 pMC)の放射性炭素濃度(¹⁴C)活動が異なることが関係しており(表 1)、すなわち深部と浅部の地下水の涵養時期および塩水化した時期が異なることを示している。 CI 濃度と CI/Br モル比のクロスプロット(図 19) では、ほとんどすべてのクラスターが海水 (655±4)(Alcalá and Custodio, 2008)を示すラインに沿って分布しており、これは海水または沿岸 域の降水の可能性が考えられる。すなわちどちらも地下水の塩水化の起源となり得ることを示 唆している。

 \boxtimes 18: Cross-plots between δ^{18} O and δ^{2} H of different groundwater clusters. Note: Local meteoric water lines (LMWLs) were drawn based on the nearby three Global Network of Isotopes in Precipitation (GNIP) stations, of which locations are shown in Figure 2.1. The relative positions among the clusters can be seen in Figures 12 (g) and (h).

4.5. 深層地下水の塩水化の形成プロセス

深層地下水の塩水化がどのように形成されてきたかを検討するため、Cl and δ^{18} O 間のクロス プロットを作成した(図 20)。図 20 では、Cl の増加に伴い δ^{18} O は全体的に減少傾向を示して いるが、これは単純な淡水と塩水の混合傾向とはいえないと考えられる。すなわちかなり軽い δ^{18} O と高い濃度の Cl 端成分の存在の可能性を示唆している。また、C-1~C-3 は混合線内に分 布しており、C-4 はより軽い安定同位体に向かってわずかにオフセットして分布している(図 20)。これらの結果と深層地下水が優勢なクラスター(C-1~C-4)の空間分布図(図 13~14)か ら、淡水および汽水の深層地下水の形成は古地理と過去~近年のフロープロセスが関連してい るものと考えられる。

ここでは、深層地下水の塩水化の形成過程について上記の結果と地層解析の結果から次のように考える。まず海水準が最も下がった時期(LGM: Last Glacial Maximum)に、地下水は主に 北/北西から南/南東に流れ、古流路と古河間地の両地域の地下に淡水の地下水(すなわち、C-1) を形成したと考えられる(図 21)。その後、海水準は約 15,000 年前まで急速に上昇を開始し、 後氷期の海進期には、古河川の谷に堆積物が堆積し、埋没谷となり、その後エスチュアリーが 形成された(図 22)。海進期に C-3 および C-4 は、重力により引き起こされる垂直浸透によっ ておそらく汽水と淡水の混合した地下水で、本地域に形成されたものと考えられる(図 22)。

20: Cross plots between Cl⁻ and δ^{18} O of DGW dominated clusters.

この海進期のステージにおいて、河川流出と同様に過去の降雨を示す δ¹⁸O の値は、LGM 時 期に形成された値と比較しておそらく軽かったことが示唆されている (Dutt et al., 2015)。また C-4 は調査地の北側(図 14)かつ浅い場所(図 23)に位置することから、C-3 は海進期に C-4 よりも早く形成されたと考えられる。C-2 における塩分濃度の変化は、C-1 と C-3/C-4 間の混合 (図 24)に関連しており、これは人為的な揚水効果と自然プロセスによって起こったと考えら れる。

 \boxtimes 21: Conceptual diagrams showing the estimated water movement at the time of LGM along the paleointerfluve (a) and the paleo-channel (b). The positions of the cross sections are supposed to be the same as those in Figures 17a and b.

 \boxtimes 22: Conceptual diagrams showing the hydrological condition at the time of postglacial transgression along the paleo-interfluve (a) and the paleo-channel (b). The positions of the cross sections are supposed to be the same as those in Figures 17a and b.

☑ 23: Depth variations of deep groundwater wells in C-1, C-2, C-3, and C-4.

☑ 24: Map showing the deep groundwater level contours (BWDB, 2013) and possible direction of groundwater flow. The locations of C-2 samples are also shown.

4.6. 浅層地下水の塩水化プロセス

δ¹⁸O とδ²H 間におけるクロスプロットの結果 (図 18)では、LMWLs に沿うようにまたはやや 下の部分で混合地下水が優勢なクラスター (C-6) と塩分濃度が高い浅層地下水が優勢なクラス ター(C-7)がプロットされている。塩分濃度は低いが濃縮された安定同位体を含む C-5 のサンプ ルは、深層地下水が優勢なクラスターと重なるようにプロットされている。C-6 に割り振られ たサンプルは、狭い範囲にプロットされているが C-7 のサンプルは広い範囲にプロットされて いる。CF とδ¹⁸O 間のクロスプロットにおいて (図 25)、60%以上が浅層地下水で構成される C-5~C-7 のクラスターは、海水に関連する傾向は特に示していないが、わずかに減少する傾向が みられる。

 \boxtimes 25: Cross-plots between Cl⁻ and δ^{18} O of mixed (C-5 and C-6) and shallow groundwater (C-7) dominated clusters.

図 19 では、海水または沿岸の降雨、あるいはその両方の可能性が浅層地下水の塩水化の発生 源であることを示している。しかしながら、浅層地下水の塩水化のプロセスはかなり複雑と考 えられ現時点の結果のみからは、明確にすることは難しいと考えられた。現段階で考えられる 浅層地下水の塩水化プロセスについては以下が挙げられる。

仮説 1:

近年の海水の侵入は、浅層地下水サンプル中の³H 濃度が検出限界以下であるため、浅層地下水の塩水化には当てはまらないと考えられる。しかし、現在のベンガル湾の表水は³H 濃度の上昇を示している(図 26)。また、ガンジス川の河川水も高い³H 濃度(6.7TU、Majumder et al., 2019)が含まれている。したがって、感潮河川を介して塩水化した浅層地下水は検出可能な³H が存在する可能性があると推定される。

☑ 26: Vertical profiles of 3H in the Indian Ocean (Rao et al., 1994).

仮説 2:

浅層地下水の塩水化は、少なくとも 1950 年代よりかなり前から古汽水から塩水に変わった 可能性が次の 2 つの理由から考えられる。ひとつは Cl⁻ and δ¹⁸O 間のクロスプロットにおいて 、δ¹⁸O 値が Cl⁻濃度の上昇とともに減少するといった傾向を示している(図 25)。これは、単純 に淡水と海水の混合傾向を示しているとは考えにくい。次に、浅層地下水中の放射性炭素(¹⁴C) の濃度が 35.7pMC から 82.4pMC に変化していることである。

仮説3

浅層地下水でみられた塩分濃度の上昇は、完新世初期から中期にかけての淡水と海水イベントの両方が強かった期間に、デルタの形成プロセス中の堆積物とともに残存した古汽水/海水の可能性が以下の理由から考えられる。浅層地下水の塩分濃度の上昇は、主に深度約20~60m(図27)の堆積物中に存在することがわかった。これらの堆積物は、後氷期の海進期~高水準期に堆積したものと推定される(図28)。さらに、図29は、塩濃度(Cl·)の上昇がクルナ市の南東部にある4つの浅層地下水のサンプルである44~37pMCの放射性炭素(¹⁴C)濃度活動の減少に対応していることを示しているからである(図30)。

図 27: Distribution of shallow groundwater salinity (Cl-) with depth

🗵 28: Radiocarbon ages of sediments with depths (legends are refernces).

☑ 29: Cross plot between Cl- concentrations and 14C activities of shallow groundwater (SGW) in the Khulna city

図 30: Distribution of 14C activities of SGW within the Khulna city.

仮説 4:

図 29~図 30 の結果から、汽水/淡水が取り込まれた後、天水または河川水とともに涵養された地下水流は、クルナ市内の北西から南東への¹⁴C 活動の減少傾向から推測されるように、浅い帯水層を淡水の地下水にした可能性が考えられる。

仮説 5:

図 19 で海水ラインの上部に比較的高い Cl-/Brモル比(>1000)を含む 5 つの浅層地下水サンプ ル(深度 70m bgl 未満)は、下水・排水またはわずかに溶解した岩塩のいずれかによる影響の可 能性が考えられる。しかし、これらの浅層地下水サンプルには NO3 および/PO4³⁻は含まれてい なかったため、下水・排水からの影響は考えにくい。また岩塩溶解による影響は、より高いモ ル比の可能性が指摘されている(Alcal and Custodio、2008)。現在、岩塩は、図 31 のように長期 間の乾期に形成され、その後モンスーンの時期になると溶解することは有名である。バングラ デッシュでは溶解した岩塩は、潮汐低地のような場所で水平方向にも垂直方向にも移動する。 このようなプロセスは、湿地、エスチュアリーな環境の下、相対的海水準変動イベントに伴っ てデルタが形成された最近の地質時代に形成されたものと考えられる。しかし、より高い Cl-/Br モル比が現在の水文気象学的プロセスまたは過去のプロセスに関連しているかどうかは不 明である。

31: A layer of salt developed in dried up surface in southern coastal region of Bangladesh (https://www.thedailystar.net/news/saline-creeping-into-croplands)

仮説6

浅層地下水の塩分濃度と安定同位体の範囲が広い要因としては、1) 完新世のデルタ形成過 程におけるデルタ堆積物とそれと同時に残存した淡水および汽水/海水の可能性、2)さらに混合 によりもともとの浅層地下水組成を変えるようなローカルな地下水流動プロセスによって説明 できる可能性が考えられる。

5. 結論・課題

本研究では、バングラデシュ南西の GBM デルタ沿岸域において地下水塩水化の起源とその プロセスを検討するために深層地下水および浅層地下水の地球化学的分析と地層分析をおこな った結果、以下のようなことがわかってきた。

1) 深層地下水サンプルの水質および安定同位体組成の分析結果は、古流路地域と古河間地の 地域で明確に異なっていた。古流路エリアにおける深層地下水は、古河間地域に比べて EC、塩 化物イオンおよび SiO₂,は高い値を示し、pH と HCO₃の値は低くかつ安定同位体 (δ¹⁸O および δ²H)は軽いことがわかった。一方で浅層地下水については古流路および古河間地域で上記の分 析結果に明瞭な違いは認められなかった。

2) 深部および浅層地下水サンプルに対して、多変量解析をおこなった結果、7 つのクラスター に分類された。深層地下水が優勢なクラスターは、主に浅層地下水であるクラスターよりも低 濃度の EC および Cl-および SiO₂ を示し一方で pH は高く、重い安定同位体をもつといった特徴 がある。また深層地下水が優勢なクラスターは、異なる空間パターンも示した。

3) 深部および浅層地下水は基本的に、 δ^{18} O and δ^{2} H のクロスプロット結果からローカルな降水が由来である可能性が本研究により示唆された。一方で現在の天水は、³H 活動の検出限界(0.3 TU)を下回っていることから、これが地下水源ではないと考えられる。

4) Cl/Br・モル比の結果から海水または沿岸域の降水が深部および浅層地下水の塩水化の要因の可能性が推測された。

5) 深部・浅層地下水の塩水化のプロセスは、塩化物イオンの増加に伴って δ¹⁸O が全体的に減 少する傾向がみられるため、現代の海水由来とは考えにくく、過去の地形形成と関連すること が推定された。深層地下水の塩水化のプロセスは、最終氷期の最盛期以降の海進期のエスチュ アリーにおける古汽水が要因と推測された。古流路地域で形成されたエスチュアリーの汽水は 密度比のために淡水の深層地下水に浸入したと考えられる。その後、古流路地域の汽水地下水 は、都市の揚水と自然プロセスの両方により水平方向に流れ、古河間地域の淡水性の地下水と 混ざり、現在もわずかに深部に汽水性の地下水を形成したと考えられる。

浅層地下水の塩水化プロセスについては、現段階の結果からは現在の海水が進入したことが 要因という可能性は少なく、少なくとも 1950 年代よりも前から古汽水から塩水に変化したもの と推定された。浅層地下水の塩分濃度の上昇は、完新世初期から中期にかけての海水準イベン トにおけるデルタの形成過程の堆積物とともに残存した古汽水/海水であると推測された。しか し、浅層地下水の塩水化プロセスは、単純ではなく岩塩溶解、もともとの浅層地下水組成を変 えるようなローカルな地下水流動なども関係している可能性が推定されるため、今後土壌分析 も含めてさらに検討していく。

謝辞

本研究は、公益財団法人国土地理協会第19回学術研究助成を受けておこなわれた。記して謝 意を表します。

文献

- Acharyya, S. K., Lahiri, S., Raymahashay, B. C., & Bhowmik, A. (2000). Arsenic toxicity of groundwater in parts of the Bengal basin in India and Bangladesh: The role of Quaternary stratigraphy and Holocene sea-level fluctuation. *Environmental Geology*, 39(10), 1127–1137. https://doi.org/10.1007/s002540000107
- ADB. (2011). TA 7385-BAN: Preparing the Khulna water supply project. Dhaka: Asian Development Bank, 122p.
- Aggarwal, P.K., Basu, A.R., Poreda, R.J., Kulkarni, K.M., Froehlich, K., Tarafder, S.A., Ali, M., Ahmed, N., Hossain, A., Rahman, M., Ahmed, S.R.(2000). A report on isotope hydrology of groundwater in Bangladesh: implications for characterization and mitigation of arsenic in groundwater. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 65p.
- Ahmed, M. F., Ahuja, S., Alauddin, M., Hug, S. J., Lloyd, J. R., Pfaff, A., et al. (2006). Ensuring Safe Drinking Water in Bangladesh. *Science*, *314*, 1687-1688.
- Alcalá, F. J., & Custodio, E. (2008). Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology*, 359(1–2), 189–207. <u>https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.028</u>
- Allison.M.A., Khan, S.R., Goodbred Jr, S.L., Kuehl, S.A. (2003). Stratigraphic evolution of the late Holocene Ganges–Brahmaputra lower delta plain. Sedimentary Geology, 155, 317-342.
- APHA. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd edition). Washington, DC: American Public Health Association. www.standardmethods.org.
- Ayers, J. C., Goodbred, S., George, G., Fry, D., Benneyworth, L., Hornberger, G., et al. (2016). Sources of salinity and arsenic in groundwater in southwest Bangladesh. *Geochemical Transactions*, 17(1), 1– 22. https://doi.org/10.1186/s12932-016-0036-6
- Berkelhammer, M., Sinha, A., Stott, L., Cheng, H., Pausata, F. S. R., & Yoshimura, K. (2012). An abrupt shift in the Indian monsoon 4000 years ago. *Geophysical Monograph Series*, 198, 75–87. <u>https://doi.org/10.1029/2012GM001207</u>
- BGS/DPHE (2001). Arsenic contamination of groundwater in Bangladesh. BGS Technical Report WC/00/19, edited by D. G. Kinniburgh and P. L. Smedley, Keyworth, U. K., 289p.
- Bhuiyan, M. J. A. N., & Dutta, D. (2012). Assessing impacts of sea level rise on river salinity in the Gorai river network, Bangladesh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 96(1), 219–227. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.11.005
- Burgess, W. G., Burren, M., Perrin, J., & Ahmed, K. M. (2002). Constraints on sustainable development of arsenic-bearing aquifers in southern Bangladesh. Part 1: A conceptual model of arsenic in the

aquifer. Geological Society, London, Special Publications, 193(1), 145–163. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.193.01.12

- BWDB. (2013). Hydrogeological study and mathematical modelling to identify sites for installation of observation well nests, selection of model boundary, supervision of pumping test, slug test, assessment of different hydro-geological parameters collection and conduct chemical analysis of surface water and groundwater (Package-3). Dhaka: Bangladesh Water Development Board, Final Report 212p.
- Dowling, C. B., Poreda, R. J., & Basu, A. R. (2003). The groundwater geochemistry of the Bengal Basin: Weathering, chemsorption, and trace metal flux to the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(12), 2117–2136. <u>https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01306-6</u>
- DPHE-APSU-JICA. (2006). Final report on development of deep aquifer database and preliminary deep aquifer map (first phase). Dhaka: Department of Public Health Engineering, 173p.
- Dragon, K. (2006). Application of factor analysis to study contamination of a semi-confined aquifer (Wielkopolska Buried Valley aquifer, Poland). *Journal of Hydrology*, 331(1–2), 272–279. <u>https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.032</u>
- Dutt, S., Gupta, A. K., Clemens, S. C., Cheng, H., Singh, R. K., Kathayat, G., & Edwards, R. L. (2015). Abrupt changes in Indian Summer Monsoon strength during 33,800 to 5,500 yr BP. *Geophysical Research Letters*, 42, 5526–5532. https://doi.org/10.1002/2015GL064015
- Edmunds, W. M., Ahmed, K. M., & Whitehead, P. G. (2015). A review of arsenic and its impacts in groundwater of the Ganges-Brahmaputra-Meghna delta, Bangladesh. *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, 17(6), 1032–1046. https://doi.org/10.1039/c4em00673a
- Goodbred, S. L., & Kuehl, S. A. (2000). The significance of large sediment supply, active tectonism, and eustasy on margin sequence development: Late Quaternary stratigraphy and evolution of the Ganges-Brahmaputra delta. *Sedimentary Geology*, 133(3–4), 227–248. <u>https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00041-5</u>
- Grall, C., Steckler, M. S., Pickering, J. L., Goodbred, S., Sincavage, R., Paola, C., et al. (2018). A base-level stratigraphic approach to determining Holocene subsidence of the Ganges–Meghna– Brahmaputra Delta plain. *Earth and Planetary Science Letters*, 499, 23–36. <u>https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.07.008</u>
- Güler, C., Kurt, M. A., Alpaslan, M., & Akbulut, C. (2012). Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Journal of Hydrology*, 414–415, 435–451. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.021
- Halim, M. A., Majumder, R. K., Nessa, S. A., Hiroshiro, Y., Sasaki, K., Saha, B. B., et al. (2010).

Evaluation of processes controlling the geochemical constituents in deep groundwater in Bangladesh: Spatial variability on arsenic and boron enrichment. *Journal of Hazardous Materials*, *180*(1–3), 50–62. <u>https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.008</u>

- Hoque, M. A., & Burgess, W. G. (2012). ¹⁴C dating of deep groundwater in the Bengal Aquifer System, Bangladesh: Implications for aquifer anisotropy, recharge sources and sustainability. *Journal of Hydrology*, 444–445, 209–220. <u>https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.022</u>
- Hoque, M. A., McArthur, J. M., & Sikdar, P. K. (2012). The palaeosol model of arsenic pollution of groundwater tested along a 32km traverse across West Bengal, India. *Science of the Total Environment*, 431, 157–165. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.038
- Hoque, M. A., McArthur, J. M., & Sikdar, P. K. (2014). Sources of low-arsenic groundwater in the Bengal Basin: Investigating the influence of the last glacial maximum palaeosol using a 115-km traverse across Bangladesh. *Hydrogeology Journal*, 22(7), 1535–1547. <u>https://doi.org/10.1007/s10040-014-1139-8</u>
- IAEA/WMO (2020). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: https://www.iaea.org/services/networks/gnip.
- Islam, M. M., Marandi, A., Fatema, S., Zahid, A., & Schüth, C. (2019). The evolution of the groundwater quality in the alluvial aquifers of the south-western part of Bengal Basin, Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 78(24), 1–20. <u>https://doi.org/10.1007/s12665-019-8714-1</u>
- Islam, M. S., & Tooley, M. J. (1999). Coastal and sea-level changes during the Holocene in Bangladesh. *Quaternary International*, 55(1), 61–75. <u>https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)00025-1</u>
- Islam, S. M. D.-U., Bhuiyan, M. A. H., Rume, T., & Azam, G. (2017). Hydrogeochemical investigation of groundwater in shallow coastal aquifer of Khulna District, Bangladesh. *Applied Water Science*, 7(8), 4219–4236. https://doi.org/10.1007/s13201-017-0533-5
- Johnston, R., Hug, S. J., Inauen, J., Khan, N. I., Mosler, H. J., & Yang, H. (2014). Enhancing arsenic mitigation in Bangladesh: Findings from institutional, psychological, and technical investigations. *Science of the Total Environment*, 488–489(1), 477–483. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.143
- Khan, A. E., Ireson, A., Kovats, S., Mojumder, S. K., Khusru, A., Rahman, A., & Vineis, P. (2011). Drinking water salinity and maternal health in coastal Bangladesh: Implications of climate change. *Environmental Health Perspectives*, 119(9), 1328–1332. <u>https://doi.org/10.1289/ehp.1002804</u>
- Knappett, P. S. K., Mailloux, B. J., Choudhury, I., Khan, M. R., Michael, H. A., Barua, S., et al., (2016). Vulnerability of low-arsenic aquifers to municipal pumping in Bangladesh. *Journal of Hydrology*, 539, 674–686. <u>https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.035</u>

Lapworth, D. J., Zahid, A., Taylor, R. G., Burgess, W. G., Shamsudduha, M., Ahmed, K. M., et al. (2018).

Security of deep groundwater in the Coastal Bengal Basin revealed by tracers. *Geophysical Research Letters*, 45(16), 8241–8252. <u>https://doi.org/10.1029/2018GL078640</u>

- LGED. (2005). Groundwater resources and hydro-geological investigations in and around Khulna city. Khulna: Local Government Engineering Department, Bangladesh, draft final report, Annex-VIII-Groundwater modeling, Municipal Service Project, 37p.
- Liu, C. W., Lin, K. H., & Kuo, Y. M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 313(1– 3), 77–89. <u>https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6</u>
- Mahmud, M. I., Sultana, S., Hasan, M. A., & Ahmed, K. M. (2017). Variations in hydrostratigraphy and groundwater quality between major geomorphic units of the Western Ganges Delta plain, SW Bangladesh. *Applied Water Science*, 7(6), 2919-2932. https://doi.org/10.1007/s13201-017-0581-x
- Mainuddin, M., Rawson, H. M., Poulton, P. L., Ali, R., Roth, C., Islam, K. M. N., et al. (2014). Scoping study to assess constraints and opportunities for future research into intensification of cropping systems in southern Bangladesh. Australia: Australian Centre for International Agricultural Research, Final report FR2014-02, 220p.
- Majumder, R. K., Halim, M. A., Shimada, J., Saha, B. B., Kariya, K., & Sasaki, K. (2019). Groundwater salinization in southwestern coastal aquifers of Bangladesh revealed by hydrochemistry and isotopic studies, 5(2), 281–293. Retrieved from www.premierpublishers.org.
- McArthur, J. M., Ravenscroft, P., Banerjee, D. M., Milsom, J., Hudson-Edwards, K. A., Sengupta, S., et al. (2008). How paleosols influence groundwater flow and arsenic pollution: A model from the Bengal Basin and its worldwide implication. *Water Resources Research*, 44(11), 1–30. <u>https://doi.org/10.1029/2007WR006552</u>
- Mihajlov, I., Stute, M., Schlosser, P., Mailloux, B. J., Zheng, Y., Choudhury, I., et al. (2016). Recharge of low-arsenic aquifers tapped by community wells in Araihazar, Bangladesh, inferred from environmental isotopes. *Water Resources Research*, 52, 3324–3349, https://doi.org/10.1002/2015WR018224
- Mukherjee, A., Fryar, A. E., & Rowe, H. D. (2007). Regional-scale stable isotopic signatures of recharge and deep groundwater in the arsenic affected areas of West Bengal, India. *Journal of Hydrology*, 334, 151–161. <u>https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.004</u>
- NASA/METI/AIST/Japan Spacesystems, & U.S./Japan ASTER Science Team (2009). ASTER Global Digital Elevation Model [030476856571776, 030476858281111, 030476874776661]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Accessed 2019-04-07 from https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.002

Naus, F. L., Schot, P., Groen, K., Ahmed, K. M., & Griffioen, J. (2019). Groundwater salinity variation in

Upazila Assasuni (southwestern Bangladesh), as steered by surface clay layer thickness, relative elevation and present-day land use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(3), 1431–1451. https://doi.org/10.5194/hess-23-1431-2019

- Qian, Y., Migliaccio, K. W., Wan, Y., & Li, Y. (2007). Surface water quality evaluation using multivariate methods and a new water quality index in the Indian River Lagoon, Florida. *Water Resources Research*, 43(8), 1–10. <u>https://doi.org/10.1029/2006WR005716</u>
- Rahman, M. A. T. M. T., Majumder, R. K., Rahman, S. H., & Halim, M. A. (2011). Sources of deep groundwater salinity in the southwestern zone of Bangladesh. *Environmental Earth Sciences*, 63(2), 363–373. <u>https://doi.org/10.1007/s12665-010-0707-z</u>
- Rahman, M. M., Hassan, M. Q., Islam, M. S., & Shamsad, S. Z. K. M. (2000). Environmental impact assessment on water quality deterioration caused by the decreased Ganges outflow and saline water intrusion in south-western Bangladesh. *Environmental Geology*, 40(1–2), 31–40. https://doi.org/10.1007/s002540000152
- Rao, C. K., Naqvi, S. W. A., Kumar, M. D., Varaprasad, S. J. D., Jayakumar, D. A., George, M. D., & Singbal, S. Y. S. (1994). Hydrochemistry of the Bay of Bengal: possible reasons for a different watercolumn cycling of carbon and nitrogen from the Arabian Sea. *Marine Chemistry*, 47(3–4), 279–290. https://doi.org/10.1016/0304-4203(94)90026-4
- Rashid, H., England, E., Thompson, L., & Polyak, L. (2011). Late glacial to Holocene Indian Summer Monsoon variability based upon sediment records taken from the Bay of Bengal. *Terrestrial, Atmospheric* and *Oceanic* Sciences, 22(2), 215–228. <u>https://doi.org/10.3319/TAO.2010.09.17.02(TibXS)</u>
- Ravenscroft, P., Burgess, W. G., Ahmed, K. M., Burren, M., & Perrin, J. (2005). Arsenic in groundwater of the Bengal Basin, Bangladesh: Distribution, field relations, and hydrogeological setting. *Hydrogeology Journal*, 13(5–6), 727–751. <u>https://doi.org/10.1007/s10040-003-0314-0</u>
- Ravenscroft, P., McArthur, J. M., & Hoque, M. A. (2013). Stable groundwater quality in deep aquifers of Southern Bangladesh: The case against sustainable abstraction. *Science of the Total Environment*, 454–455, 627–638. <u>https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.071</u>
- Ravenscroft, P., McArthur, J. M., & Rahman, M. S. (2018). Identifying multiple deep aquifers in the Bengal Basin: Implications for resource management. *Hydrological Processes*, 32(24), 3615–3632. <u>https://doi.org/10.1002/hyp.13267</u>
- Sarker, M. M. R., Van Camp, M., Islam, M., Ahmed, N., & Walraevens, K. (2018). Hydrochemistry in coastal aquifer of southwest Bangladesh: origin of salinity. *Environmental Earth Sciences*, 77(2), 1– 20. https://doi.org/10.1007/s12665-017-7196-2
- Shamsudduha, M., & Uddin, A. (2007). Quaternary shoreline shifting and hydrogeologic influence on the

distribution of groundwater arsenic in aquifers of the Bengal Basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(2), 177–194. <u>https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2007.07.001</u>

- Shamsudduha, M., Taylor, R. G., Ahmed, K. M. and Zahid, A. (2011). The impact of intensive groundwater abstraction on recharge to a shallow regional aquifer system: evidence from Bangladesh. Hydrogeology Journal, 19:901-916.
- Shamsudduha, M., Zahid, A., & Burgess, W. G. (2019). Security of deep groundwater against arsenic contamination in the Bengal Aquifer System: a numerical modeling study in southeast Bangladesh. *Sustainable Water Resources Management*, 5(3), 1073–1087. <u>https://doi.org/10.1007/s40899-018-0275-z</u>
- Strauss, Trudie, and Michael Johan Von Maltitz. (2017). "Generalising Ward's Method for Use with Manhattan Distances." *PLoS ONE* 12 (1): 1–21. <u>https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168288</u>.
- Stute, M., Zheng, Y., Schlosser, P. Horneman, A., Dhar, R.K., Datta, S., Hoque, M.A., Seddique, A.A., Shamsudduha, M., Ahmed, K.M. and van Geen, A. (2007). Hydrological control of As concentrations in Bangladesh Groundwater. Water Resources Research, 43: 1-11.
- Suk, H., & Lee, K. (1999). Chraterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into groundwater zones. *Groundwater*, *37* (3): 358-366.
- Taylor, R.G., Burgess, W.G., Shamsudduha, M., Zahid, A., Lapworth, D.J., Ahmed, K., Mukherjee, A. and Nowreen, S. (2014). Deep groundwater in the Bengal Mega-Delta: new evidence of aquifer hydraulics and the influence of intensive abstraction. British Geological Survey open report, OR/14/070. 24p.
- Templ, M., Filzmoser, P., & Reimann, C. (2008). Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23(8), 2198–2213. <u>https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.03.004</u>
- Umitsu, M. (1985). Natural levees and landform evolutions in the Bengal Lowland. *Geographical Review of Japan, Series B. 58*(2): 149-164.
- Umitsu, M. (1987). Late Quaternary sedimentary environment and landform evolution in the Bengal lowland. *Geographical Review of Japan, Series B.*, 60(2), 164–178. <u>https://doi.org/10.4157/grj1984b.60.164</u>
- Umitsu, M. (1993). Late quaternary sedimentary environments and landforms in the Ganges Delta. Sedimentary Geology, 83(3–4), 177–186. <u>https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90011-S</u>
- Worland, S. C., Hornberger, G. M., & Goodbred, S. L. (2015). Source, transport, and evolution of saline groundwater in a shallow Holocene aquifer on the tidal deltaplain of southwest Bangladesh. *Water Resources Research*, 51, 5791–5805. <u>https://doi.org/10.1002/2014WR016262</u>

- Zahid, A., Rahman, A., Hassan, M. R., & Ali, M. H. (2016). Determining sources of groundwater salinity in the multi-layered aquifer system of the Bengal Delta, Bangladesh. *BRAC University Journal, XI* (2), 37-51
- Zaman, A. M., Molla, M. K., Pervin, I. A., Rahman, S. M. M., Haider, A. S., Ludwig, F., & Franssen, W. (2017). Impacts on river systems under 2 °C warming: Bangladesh Case Study. *Climate Services*, 7, 96–114. <u>https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.10.002</u>
- Zheng, Y., Vangeen, A., Stute, M., Dhar, R., Mo, Z., Cheng, Z., Horneman, A., Gavrieli, I., Simpson, H.J., Versteeg, R., Steckler, M., Grazioli-Venier, A., Goodbred, S., Shahnewaz, M., Shamsudduha, M., Hoque, M.A., and Ahmed, K.M. (2005). Geochemical and hydrogeological contrasts between shallow and deeper aquifers in two villages of Araihazar, Bangladesh: Implications for deeper aquifers as drinking water sources. Geochimica et Cosmochimica Acta, 69: 5203-5218.