ネパール・カトマンズ盆地での水辺空間における元素分布と地盤環境特性

愛媛大学　正会員　○中島 淳子
京都大学　正会員　西村 文武
愛媛大学　フェロー　矢田部 龍一
愛媛大学　正会員　ネトラ P. バンダリ

１．はじめに

アルプス=ヒマラヤ造山帯に位置するネパールでは，脆弱な地盤に起因する地すべりなどの災害が多発することから，その対策が急務となっている．とりわけ首都カトマンズは，同国の中央－東部に位置する標高約 1,300m の構造盆地に開けた都市であり，周辺の都市を含む同盆地内での人口は 150 万人を超えており，また近年周辺地域からの人口流入も著しいことから，今後ますます災害対策の重要性が高まってくる地域である．カトマンズ盆地もその形成の経緯ならびに周辺地盤特性により[1,2]，絶えず地すべりや土石災害流の危険に晒されているとともに，地震発生時の地盤液状化の危険性も指摘されている．災害から社会資本を保護するためには，災害に強い構造物とすることはもちろんであるが，一方でその地域の地盤特性をはじめとする自然環境特性を把握しておくことも，望ましい社会資本整備には必要となってくる．ネパールにおける地盤環境調査はこれまでに数多くなされてきており[3]，その解析やそれに基づく対策がとられている．一方，地すべり地の特性を地下水質から判定しようという試みが従来からなされている[4]．岩石の風化の度合いや流動形態により地下水や周辺水域の水質は変化するため[5,6]，水質から周辺環境特性やその変化を推し量ることも不可能ではない．水質項目の中には簡便で迅速に測定できるものもあり，連続計測など監視体制の方法によっては，洪水や土石流のモニタリング手法としうることも考えられる．さらに都市創造の観点からも今後高層建築構造物や地下利用の可能性も出てくると考えられることから，地下水に関する水量，水流，水質の調査も必要となってくると考えられる[7]．しかし，そのためには，当該地域の水辺環境の調査を重ね水質特性を把握しておく必要がある．また，水質調査を行うことで人間活動の環境への影響についての情報も得られることから，防災のみならず環境保全の観点からも水質データ蓄積を含む環境調査が希求されるところであるが，諸般の事情で必ずしも十分なデータ収集がなされてきているわけではない．そこで，2006 年には乾季におけるカトマンズ盆地での水辺空間における水質分布，元素濃度分布を調査したが[8]，2007 年には雨期に同様の調査を行い，この地域における現状の水環境・地盤環境特性を把握するとともに，乾季と雨季での類似点，相違点を整理することとした．

２．調査概要

2007 年 9 月 27 日と28 日にわたり，カトマンズ盆地内の河川水と湧水をあわせて 25 カ所選定し，現場での水環境調査を行うとともに採水を行った．図 1 に調査地点位置を示す．カトマンズは例年 9 月から翌年の 5 月までが乾季であるが，2007 年は，9 月まで雨期が継続しており調査前日まで 4 日間程度の降雨が継続していた．調査期間中には降雨はほとんど休止していたが，昨年の調査時と比較すると河川流量は多く，ほとんどの調査地点で感じられた臭気は本年の調査では確認されなかった．採水は Dhobikhola 川から 6 地点(図 1 中の D1～D6)，Bagmati 川から 6 地点(同 G1～G6)，Bishnumati 川から 3 地点(同 B1～B3)，Manahara 川およびそこへ流入している都市河川から 3 地点(同M1～M3)，そして M1 付近の丘陵部からわき出ている湧水地点(同 S1)，および Patan Durbar Square 内の湧水 3 地点(同 S2～S4)，Bhaktapur の湧水 3 地点(同 S5～S7)計 25 地点である．現場では HORIBA 社製マルチ水質モニタリングシステム W-23XD を用いて溶存酸素(DO)，pH，電気伝導度，酸化還元電位(ORP)，水温を測定すると共に，100mL を採水し機器分析用に採水した．機器分析では，有機炭素(TOC: 燃焼触媒酸化－非分散型赤外線式ガス分析(NDIR)TOC 自動計測法，島津製作所製 TOC-5000A)，無機イオン(陽イオン: NH_4^+, Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}，陰イオン: Cl^-, NO_2^-, NO_3^-, SO_4^{2-}，イオンクロマトグラフ法，島津製作所製 LC-10A，分離カラム 陰イオン: Shim-packIC-A3，陽イオン: Shim-packIC-C3，移動相 陰イオン: 3.2mM Bis-Tris，8.0mM p-ヒドロキシ安息香酸 混合液，陽イオン: 3.0mM シュウ酸水溶液)，元素類(Al, As, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mg, Mn, Mo, Na, Ni P, Pb, Sb, Se, Si, V, Zn，誘導結合プラズマ発光分析装置 ICP-AES(パーキンエルマー製 Optima3000，愛媛大学総合科学研究支援センター)を測定した．

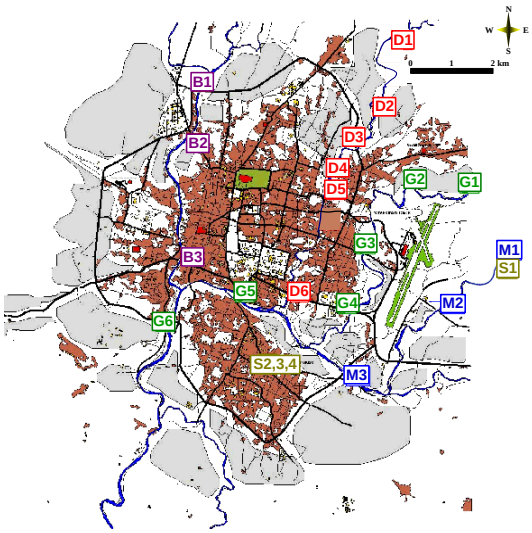

図 1　調査地点位置

３．調査結果および考察

各元素の測定結果を基に，サンプリング地点間の水質データより地点間の類似性について検討した．クラスター分析をした結果を，図 2 に示す.河川水データ群間や地下水データ群間では水質に類似性があるが，河川データ群と，地下水データ群との間には類似性が小さいことが示されている．河川データ群内では，同じ支川データ内での類似性が，他の支川間での類似性よりも大きいことが分かる．図 3 にサンプリング地点 D1, B1, G1, M1, S1 地点での元素等の濃度分布を，また図 4 に各採水地点での DO, ORP, NH_4^+-N, NO_3^--N,P, Mn, Fe の濃度分布を示す．Dhobikhola 川の 6 地点(D1～D6)，Bishnumati 川の 3 地点(B1～B3)，Bagmati 川の 6 地点(G1～G6)，Manahara 川およびそこへ流入している都市河川から 3 地点(M1～M3)

キーワード　ネパール，カトマンズ盆地，元素分布，地盤環境，水環境
連絡先　〒790-8577　愛媛県松山市文京町三番　愛媛大学工学部環境建設工学科　中島淳子　TEL075-927-9817

について，各々の支川においては，河川が市街地を経て流下するにつれて，溶存酸素濃度が低下する傾向にあった．しかし昨年調査した乾季のデータと比較すると溶存酸素の絶対値は高く，また酸化還元電位の流下方向に対する明確な低下傾向は見られなかった．これは乾季においては河川水流量が小さく，滞留時間が長くなり酸素消費反応を同一区間で長い時間受けられるのに対して，雨季にはその影響が小さくなること，また都市域からの汚濁水が希釈されることなどの効果が反映されたものと考えられた．Cd や Cr, Pb の有害な元素は上流部においてもほとんど検出されなかった．B, Ba, Ca, Mg, Na, Si はどの地点でも検出されたが，これらはアジア地域で一般に観察される濃度範囲であった．昨年の調査でも同様の傾向が見られたが Cu や Sr が高い濃度で検出されており，また Hg については飲用水とするには不適切な濃度で検出される地点もあった．これらが天然由来のものであるか再度精査する必要はあるが，この地域を特徴づけるものとして取り扱える可能性が今回の調査においても示された．地表水では，流下方向にアンモニア性窒素が増加する傾向があり，溶存酸素の低下と併せて，都市域からの汚水，とりわけ生活廃水による汚濁が強く示唆された．また嫌気状態で溶出が促進される Fe, Mn, P などの物質濃度も流下方向に行くにつれて濃度上昇の傾向が観察された．乾季と比較して雨季の場合は，水質(濃度)のみから判断すると汚染の程度は小さくなるものと考えられるが，総量的には水質変化ほどは差がなく都市域から汚濁物が排出されていることが考えられる．雨季乾季を通じて，カトマンズ周辺では，人為的汚染による水辺空間の汚染が顕著であることが分かった．

一方で地下水では，どの地点においてもアンモニア性窒素は検出されなかったものの，逆に河川水で検出されたアンモニア性窒素と同程度の硝酸性窒素が検出されている．都市域での地下水は，生活廃水由来と考えられる窒素分による硝酸性窒素汚染がどの地域でも進行しているものと考えられた．環境保全のための社会資本整備も現在のカトマンズには急務となっているが，それを推進する際に必要となる適切な水質モニタリングにより，生活環境や自然環境の回復を図るとともに，加えて，本来そこにある環境を知りさらにそれを防災等，他の目的にも役立てるなど種々の活用が期待される．

4．おわりに

カトマンズ盆地内の水辺空間における元素分布特性から，この地域を特徴づける元素群として昨年の乾季での調査と同様に Cu や Sr が考えられた．また，カトマンズの水質汚濁は雨季乾季を通じて著しく，早急な対策が必要であることがあらためて明らかになった．

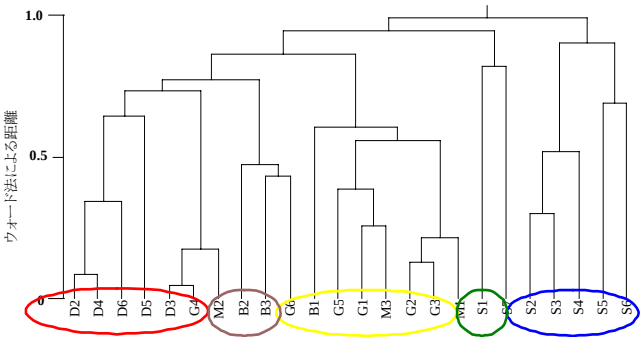

図 2 調査地点間での類似性(クラスター分析結果)

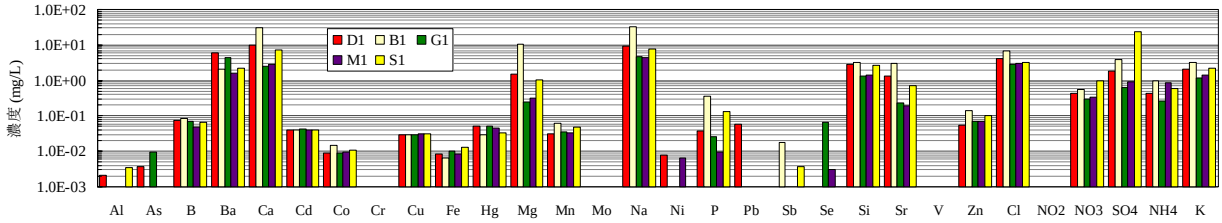

図 3 サンプリング地点 D1, B1, G1, M1, S1 地点での元素等の濃度

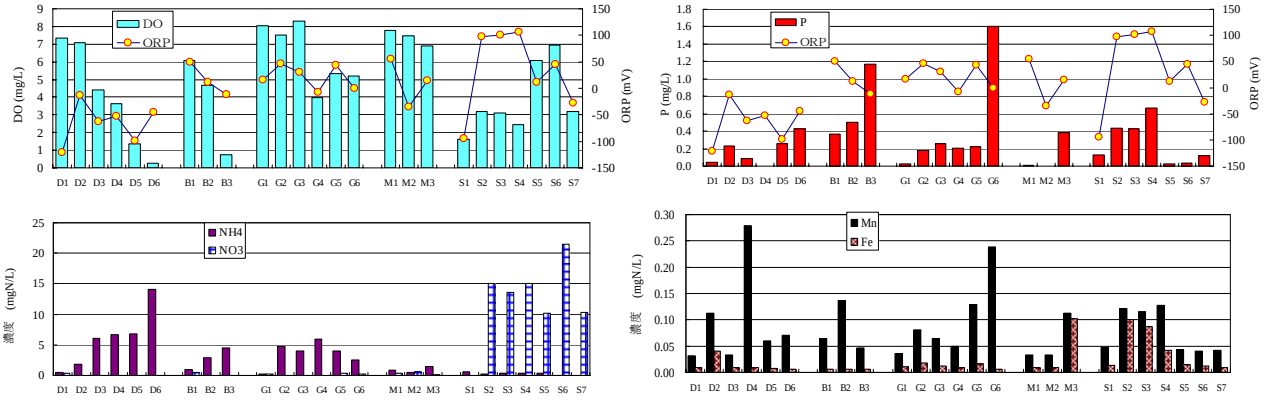

図 4 各採水地点での DO, ORP, NH_4^+-N, NO_3^--N,P, Mn, Fe の濃度分布

引用・参考文献

1) 酒井治孝: ヒマラヤ山脈の上昇テクトニクス，地学雑誌, Vol.114, No.1, pp.113-117, 2005.
2) 矢田部龍一，岡村未対，ネトラ・バンダリー，カトマンズ盆地の砂地盤の液状化特性，地盤工学会四国支部平成 19 年度技術研究発表会講演概要集, pp.77-78, 2007.
3) R. Yatabe, N. Bhandary & D. Bhattarai：Landslide hazard mapping along major highways of Nepal, Ehime Univ. & Nepal Eng. College, 2005.
4) X. Huilong, Y. OKI, O. SATO and H. WATANABE: Geochemistry of Groundwaters in the Utsunomata Landslide Area, Maki Village, Higashikubiki District, Niigata Prefecture, 地すべり，第 34 巻，第 2 号, pp.25-34, 1997.
5) F.Nishimura, R.Yatabe, N.Yagi, K.Yokota & T.Shibata: Characteristics of groundwater quality in fracture zone landslides at Shikoku area, Proc. of the international symposium on slope stability engineering, Slope Stability Engineering, pp. 1159-1163, 1999.
6) 関陽児: 土壌・風化帯の形成と水質変化，地質調査所月報，第 49 巻，第 12 号, pp.639-667, 1998.
7) 坪田 邦治，西垣 誠: 地下水流動保全における横断方向流下模型実験とその解析，第 41 回地盤工学研究発表会, pp.1135-1136, 2006.7.
8) J. NAKAJIMA, F. NISHIMURA, R. YATABE & N. P. Bhandary: Current Conditions of Water Environment and Element Distribution at Katmandu, Nepal, Proc. Of International Conference on Disasters and Development Bridging the gap between theory and practice (ICoDAD 2008), 2008.11.