

平成 23～27 年度科学研究費補助金
基盤研究（B）23401006
研 究 成 果 報 告

ネパール・テライ低地における ヒ素汚染の実態とその対策に関する研究

**Current Status of Arsenic Contamination and its
Countermeasures in Terai Lowland, Nepal**

研究成果報告書

2015 年 12 月

研究代表者 中 村 圭 三

（敬愛大学国際学部教授）



ヒ素濃度の最高値を記録したコカプルワの井戸 2009年9月



「水質を調べてください」と家から水を持ってくる人々 2007年9月



村の憩いの場、大木の下の子と共同井戸（ゴバリヤ）2008年3月



井戸（地下水）調査に集まってきた住民と 2009年9月



ヒ素被害者の手の甲 2012年3月



ヒ素被害者の手 2007年9月



バルプリ小学校での井戸掘 2012年3月



井戸掘ボーリングサンプル 2012年8月



気象ステーション設置 (バルプリー小学校校庭) 2012年3月



聞き取りアンケート調査 2014年3月



コカプルワの学校における説明会 2009年9月



カトマンズでの地元協力者を招いてのレセプション 2012年3月



現地での説明会（マナリの集会場）. 2012年3月



現地での説明会（マナリの集会場）. 2014年8月



カトマンズでの報告会 2014年8月



コカプルワの学校の先生方と 2014年8月

はしがき

平成 23 (2011) 年度から平成 27 (2015) 年度までの 5 年間にわたり、「ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染の実態とその対策に関する研究」の研究課題で、文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (B) の交付を受け、ネパール・テライ低地中央部のナワルパラシ Nawalparasi 郡パラシ Parasi において、地下水ヒ素汚染に関する現地調査を実施した。本書は、その研究成果をまとめたものである。

ネパールのテライ低地では、1999 年にヒ素汚染が明らかになり、その実態および健康被害に関する調査が進んだ。著者らは、2007 年から当地域における調査を開始した。当地域では高濃度のヒ素が極めて局所的に検出され、乾季には雨季の 3 倍の濃度にも達した。また、井戸の深さ 13m から 23m 前後までの層では特に強い還元状態にあり、還元状態が強まるほど高濃度のヒ素が検出されることなどの事実が明らかになった。

平成 23 (2011) 年度からの基盤研究 (B) による調査においては、下記に示すような、ヒ素汚染の実態から対策までを、一連の流れとして研究した。

- (1) 調査地域におけるヒ素汚染の実態およびその原因に関する調査
- (2) ヒ素汚染された地下水を利用している住民についての実態調査
- (3) 上記の(1), (2)の調査結果に基づいたヒ素汚染対策

ヒ素汚染の実態と原因に関しては、気象・気候、水文・水質、地質構造、人間生活 等の面から総合的なアプローチを試みた。気象・気候調査では、当地で初めての総合気象観測を実施し、亜熱帯モンスーン気候の実態把握に努めた。水文調査では、調査地域内の 25 ワード (集落) につき、ヒ素汚染濃度の水平的、鉛直的分布と地下水流動を明らかにした。また、地質構造に関しては、地元井戸屋によるボーリング調査を行い、地質構造とヒ素の濃集メカニズムの解明に努めた。さらに、現地で実施可能なヒ素対策として、地下水からのヒ素の除去方法、安全な井戸を作井するための方法などについて検討した。

ネパールは多民族国家であり、言語も多様である。そこで、地域住民の生活実態についての聞き取り調査に当たっては、現地語を話す調査員にも協力を仰いだ。

現地調査の結果については、最終調査の折に現地の集会所に住民を集め、「現地調査報告会」を開催した。モンスーン季の雨天であったにもかかわらず、多数の住民が参加し、活発な意見交換が行われた。

この会場で、ヒ素を含まない安全な飲み水を求める住民たちの叫びを聞いた！！

この調査の成果が、現地住民の要望に応え、役立てられることを願ってやまない。

2015 年 12 月

中村 圭三

目 次

カラー口絵

はしがき

1. まえがき	1
1.1 先行研究	1
1.2 研究目的	1
1.3 研究地域	2
2. 気象・気候学的研究	4
2.1 テライ低地の気候環境	4
2.2 テライ低地における全天日射量と蒸発量	14
2.3 テライ低地における室内気候環境	20
3. ヒ素に関する水文学的研究	30
3.1 地下水の動態と水質に関する研究	30
3.2 地下水ヒ素濃度に関する研究	37
3.3 水収支に関する研究	42
4. ヒ素に関する地形・地質学的研究	45
4.1 地形形成・地形分類に関する研究	45
4.2 研究地域及び上流域における地質環境	47
4.3 地質構造（環境）に関する研究	56
4.4 地下水のヒ素濃度と地質に関する研究	69
5. 住民と生活に関する実態研究	78
5.1 住民に関する研究（谷地）	78
5.2 飲料水・生活用水等に関する研究	82
5.3 井戸の利用と形態に関する研究	89
5.4 ヒ素被害の実態に関する研究（松尾）	92
6. ヒ素汚染対策に関する研究	95
6.1 雨水利用に関する研究	95
6.2 地下水汚染の評価	97
6.3 鉄共沈法試験結果	102
6.4 今後の対策	106
7. ま と め	112

資料編	115
あとがき	127
研究課題・研究組織	129
執筆者一覧	130
現地調査の概要	131
研究成果の発表	134

1. まえがき

1.1 先行研究

ネパール南部に広がるテライ低地においては、現在人口の約 47%に当たる 1100 万人が生活する。この地域で 1999 年に地下水ヒ素汚染が明らかになり、以後その実態等に関する調査研究が進められてきた。

テライの約 90%の住民は、飲料水を地下水に頼っている (Roshan, R.S.,2003)。飲料水に含有されるヒ素基準は、世界保健機構 (WHO) では 10ppb、ネパールの基準では WHO の 5 倍の 50ppb とされている。737009 サンプルについての調査結果によると、ヒ素濃度 10～50ppb が 7.9%、50ppb 超が 2.3%あり、数 100ppb を超える例も報告されている (Ishwar, C.Y. et al.,2012, Thakur, J.K. et al., 2011)。

それに伴う健康被害も深刻で、50ppb を超える飲料水を日常的に飲んでいる住民からは、慢性ヒ素中毒患者が出現している (Pokhrel,D. et al., 2009)。ヒ素中毒にかかると皮膚にメラニン色素が沈着し、角化の現象が現れ、毛髪や爪へのヒ素蓄積も報告されている。ヒ素中毒は栄養状態とも関係し、貧しい住民ほど発症率が高い。また性別では男性の方が女性の 2 倍高い事実も明らかになってきた (Ahmad, SA. et al., 2004, Maharjan M. et al., 2005, 2006a,b, 2007, Ishwar C.Y. et al., など)。

このヒ素を除去するための各種のフィルターが開発され、中でも「カンチャンフィルター-Kanchan Arsenic Filter (KAF)」は、85～95%のヒ素、90～95%の鉄、80～95%の汚濁物質、85～99%の大腸菌を除去するとの評価を得た (Ngai, T.K.K. et al.2006, 2007, Pokhrel, D. et al.2009)。

ヒ素を含んだ水は、灌漑用水として耕作地に供給される。その調査結果によると、灌漑用水中では 5～1014ppb、土壌中では 6.1～16.7mg/kg のヒ素が検出された (Dahal,B.M. et al. 2008a,b)。

著者らはこれまでに、テライ低地のナワルパラシ郡パラシの東西約 6km、南北約 10 k m の地域において、2007 年 9 月以降、調査を継続してきた (Nakamura k. et al., 2007,中村ほか, 2008a,b, 2010)。その結果、極めて高濃度のヒ素が局所的に検出され、乾季には雨季の最大 3 倍の濃度に達することが明らかになった。また、井戸の深さ 13mから 23m前後までの層では特に強い還元状態にあり、その状態が強まるほど高濃度のヒ素が検出されることなどの事実が明らかになってきた。これは地下の帯水層の深さ・地質(粘土・砂・礫)構造などが複雑に入り組んでいるためと推測されるが、その分析には、帯水層の地質状況の調査が重要である (Tamrakar et al., 2002, 2007)。特に造山運動による褶曲や衝上断層による間接的な影響や地下に存在する河川蛇行跡などが帯水層のメカニズムを複雑化している。さらに、ヒ素の地下水への溶出と帯水層中の移動に関して、ヒ素の広域汚染源、ヒ素含有岩石・碎屑物、海成堆積物、河川と風化の影響、地下水中の化学物質(特に鉄化合物や硫化物など)、pH、酸化還元電位なども大きく関与すると考えられる (Mirecki, 2005)。

1.2 研究目的

本研究では、上記の先行研究の成果を踏まえ、ヒ素汚染地域における地下水動態とその利用の実態を把握するとともに、ボーリング調査を行い、ヒ素の濃集メカニズムを明らかにすることを目的として現地調査を実施した。

その具体的内容は、次の通りである。

1.2.1 調査地域における気象・気候とヒ素汚染の実態およびその原因に関する調査

(1) 気象・気候に関する調査

観測データがほとんどない亜熱帯モンスーン気候下の調査地域において、気温・降水量を中心に、相対湿度・風向・風速・日射などの基本的気象要素を総合的に観測する。

(2) 地下水動態，水質調査および地質構造に関する調査

ボーリング調査，地下水の水質，水位の変動などから，調査地域におけるヒ素汚染の実態を水平的・鉛直的に把握するとともに，その汚染原因等について，水文学的，地質学的に明らかにする。

(3) ヒ素汚染された地下水を利用している住民についての実態調査

ヒ素汚染された地下水を利用している調査地域の住民について，属性，調査項目別に解析し，水に対する意識構造と井戸水利用の実態を明らかにする。

(4) ヒ素汚染対策

ヒ素汚染されない最も安全な飲料水を確保するための，適切な対策を確立する。

1.3 研究地域

調査地域は，ネパール・テライ低地中央部のナワルパラシ Nawalparasi 郡パラシ Parasi の東方約 7km に位置する。この地域は一面水田地帯となり(写真 1.1)，北側約 10km には，標高約 150m～1500m のシュワリク丘陵が迫っている。30 の集落（以下ワードと称する）を含む東西約 6km，南北約 10 km の範囲を調査地域と定め（図 1.1），すべてのワードを対象として，水質調査，生活実態調査を調査した。気候・気象に関する総合的観測については，ピパラ Pipara のバルプリ小学校（N27°31'03"，E83°44'06"）の校庭で実施した。



写真 1.1 上空から見た調査地域

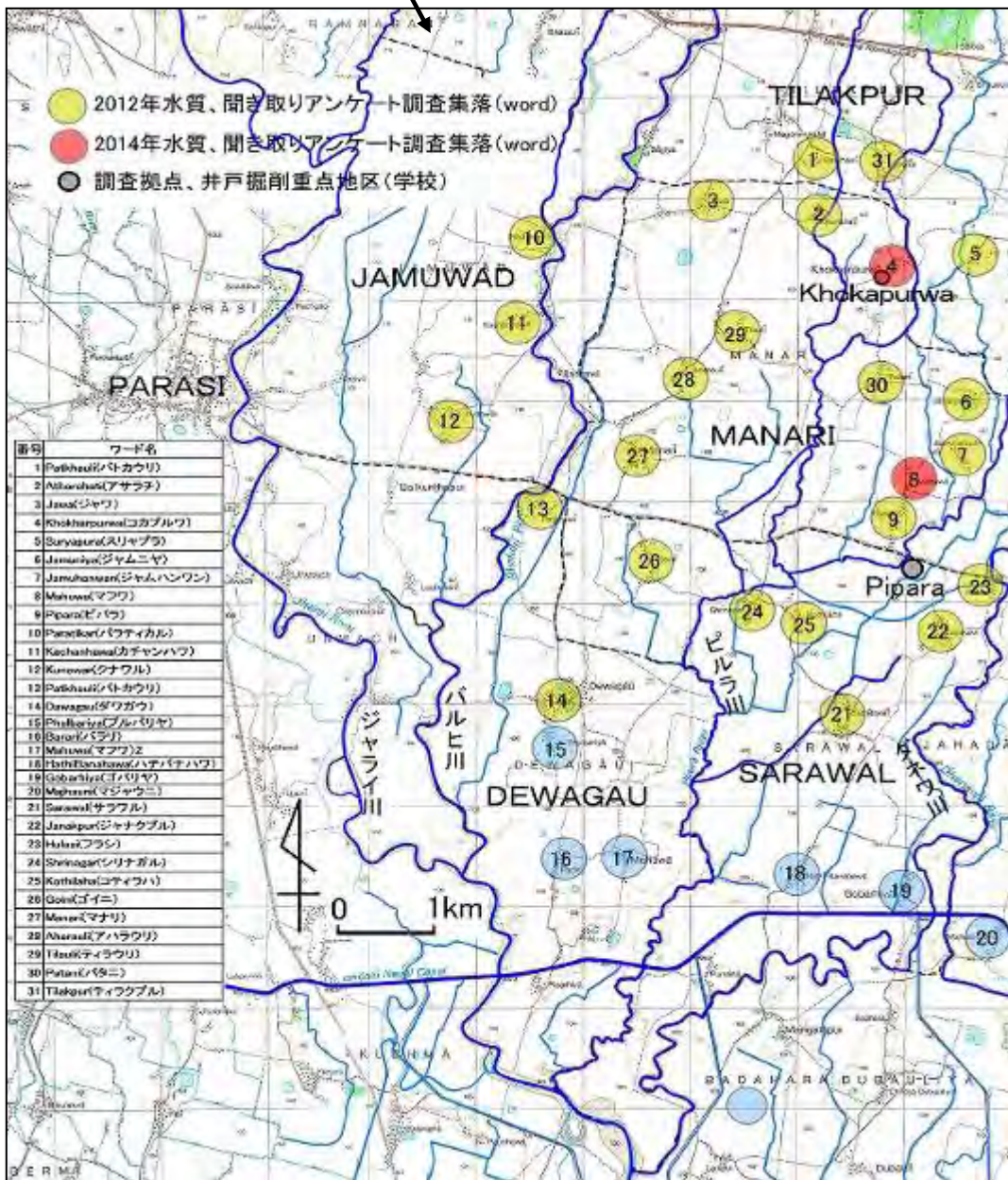


図 1.1 調査地域

2. 気象・気候学的研究

2.1 テライ低地の気候環境

2.1.1 はじめに

ネパール南部のテライ低地における本研究の推進に当たり、調査地域内における気候環境・水収支等を明らかにすることは、非常に重要である。当地域周辺には、気温・降水量の観測所は存在するが、その他の気象要素に関しては、約 50km 西に位置するバイラワ空港で風の観測をしているのみである。

そこで、本研究では調査地域内に気象ステーションを設置し、2012年3月より2014年8月までの期間に、総合的な気象観測を実施した。

2.1.2 観測地域・方法

観測地域は、テライ低地中央部のナワルパラシ郡パラシ Parasi の東方約 7km に位置し、観測地点はバルプリー（ピパラ）小学校 (N27°31'03", E83°44'06") の校庭である (図 2.1.1)。この地域は一面水田地帯となっているが、北側約 10km には、標高約 150m~1500m のシェワリク山地が迫っている。

バルプリー小学校は、周囲をコンクリートの塀で囲まれ、正門は夜間施錠するため、安全が確保される構造になっている。校内の南側にレンガ造り平屋建ての校舎が2棟建設されており、校庭の北西部に気象ステーションを設置した (写真 2.1.1)。この部分は草地となっているが、その草は夏季には人丈ほどに成長する。気象ステーションは、Onset 社製で、気圧、全天日射量、風向、風速、気温、相対湿度、降水量を15分ごとに観測した。

ここでは、気圧、風向、風速、気温、相対湿度について報告し、全天日射量、降水量については、次節で詳しく取り上げることにする。

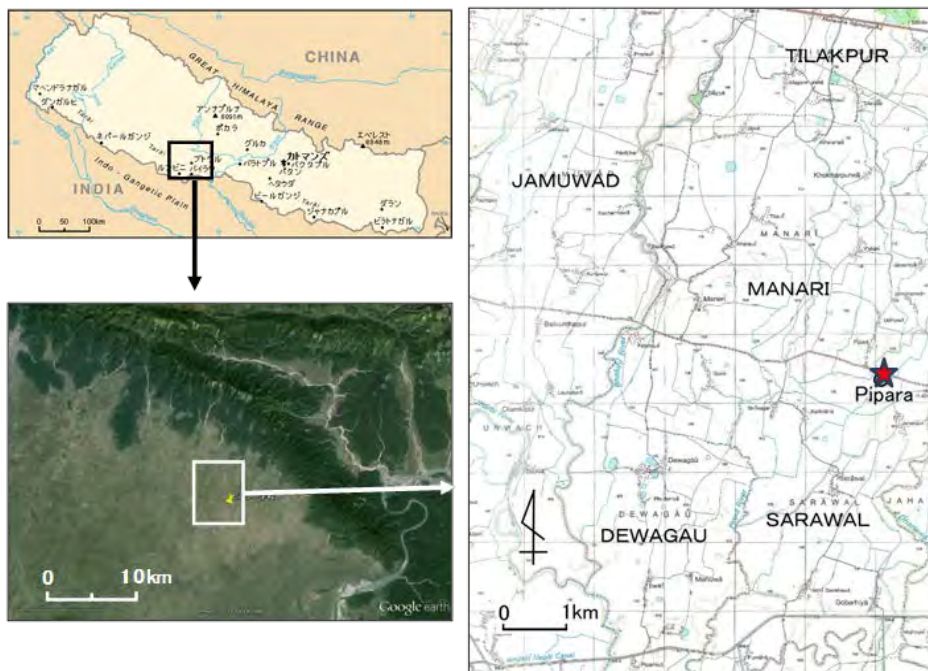


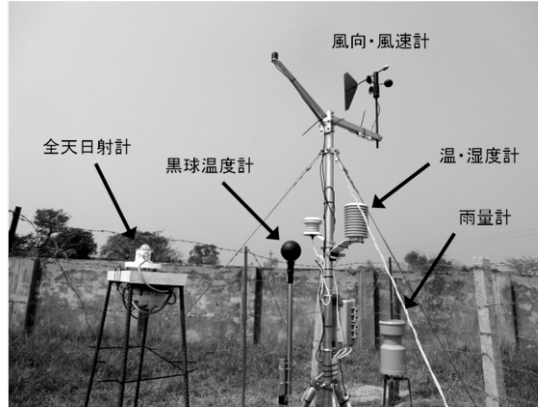
図 2.1.1 ネパールの調査地域
★ バルプリー（ピパラ）小学校



バルプリ小学校



気象ステーション全景



気象観測機器

写真 2.1.1 バルプリ小学校に設置した気象ステーション

2.1.3 観測結果

(1) 気圧

2012年3月から2013年2月までの日平均気圧について、その年変化を図2.1.2に示す。ネパールでは、冬季にはユーラシア大陸中央部に発達するシベリア高気圧からの寒気が吹きつける。一方、夏季には、西アジアに形成される低気圧に向かう季節風が吹く。

この気圧配置に対応して、当地の気圧はモンスーン季に低く、冬季に高い年変動を示し、6月26日に最低値980.3hPa、1月22日に最高値1007.5hPaを記録した。

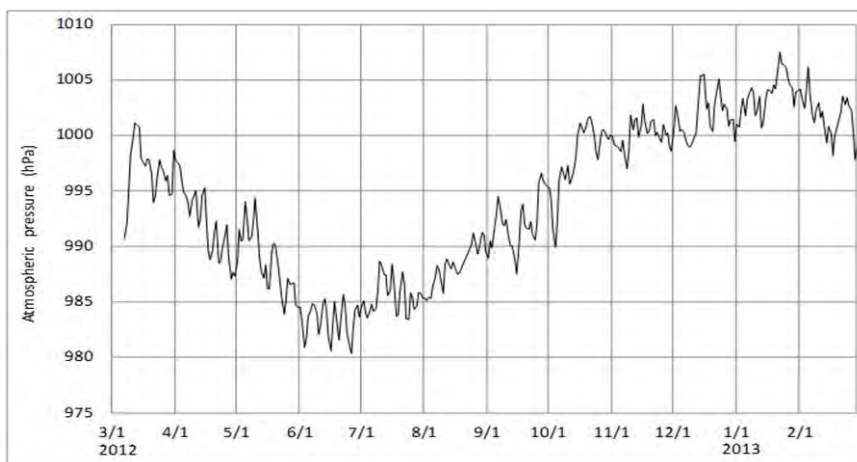


図 2.1.2 バルプリ小学校における日平均気圧の年変化
(2012年3月1日～2013年2月28日)

(2) 風向・風速

2012年3月から2013年2月までの1年間における日平均の風速と1日の最多風向を、図2.1.3に示す。この図によると、9月半ばを境にして風速と風向に大きな差異が認められる。ここでは、この時期を境にしてそれよりも前を前期、後を後期と呼ぶことにする。前期においては、風速は1~2m/s程度の範囲で変動しているが、後期になるとほぼ0.5m/s以下に弱まっている。また、日最多風向は、前期から後期に急に風向を変え、それまでのENE~SEの風向からSE~Nへと、西寄りに変化した。

これらをさらに詳細にみていくと、前期の風向は3月におおむねSE~Nの範囲で変動していたが、4月から5月にかけてはE~WSW、6月はENE~SEへと東寄りに推移し、7月から9月上旬まではENEが卓越した。後期には、9月18日までのENEから、19日W、20日SWへと風向は、大きく西寄りに変化した。以後、主にSWからNの範囲で変動した。

前期の風速は、3月にほぼ1m/s以内であったが、4月からは2m/s程度まで増加し、以後9月まで1~2m/sで推移した。後期に入り9月19日から風速は急激に弱まり、10月から11月は0.25m/s程度であった。12月から2月中旬まではやや強まり0.5m/s程度であったが、2月中旬以降は1m/sまで増加した。

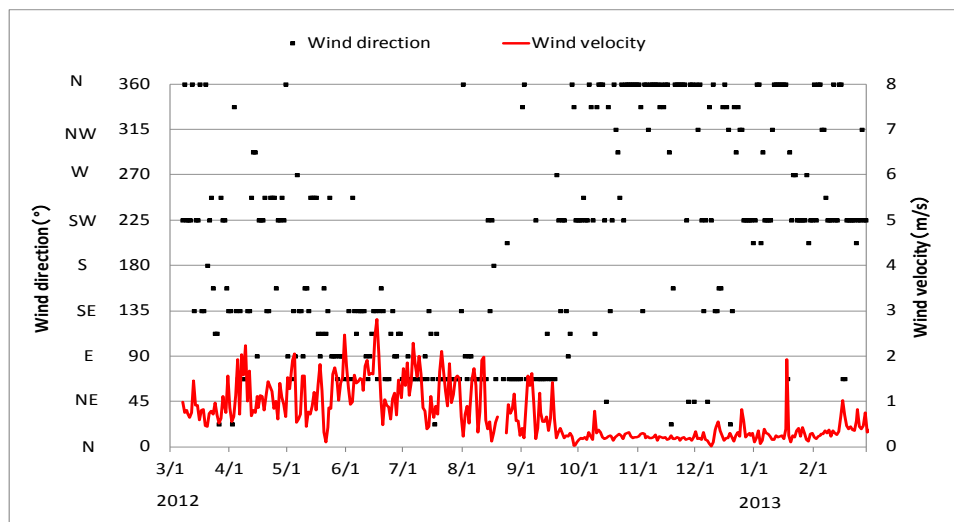


図 2.1.3 バルプリー小学校における日最多風向・日平均風速の年変化
(2012年3月1日~2013年2月28日)

(3) 気温

2012年3月から2013年2月までの日最高気温、日平均気温、日最低気温の年変化を、図2.1.4に示す。気温は、3月以降上昇を続け、4月後半からの日最高気温は、連日のように40℃を超えた。しかし、6月17日の日最高気温は32.6℃まで下がり、以後40℃を超える日はなくなった。その後9月末までは、日最高気温35℃、日平均気温30℃、日最低気温25℃前後で推移した。

しかし、10月2日から気温は、振幅の少ない状態で12月半ばまで降下を続けた。12月12日の日最高気温は、前日の27.0℃から一気に18.0℃まで急降下した。気温は1月初旬に最も下がり、1月6日には観測期間中で最も低い日最低気温2.3℃を記録した。その後気温は次第に上昇し、2月末には日最高気温が30℃を超えた。

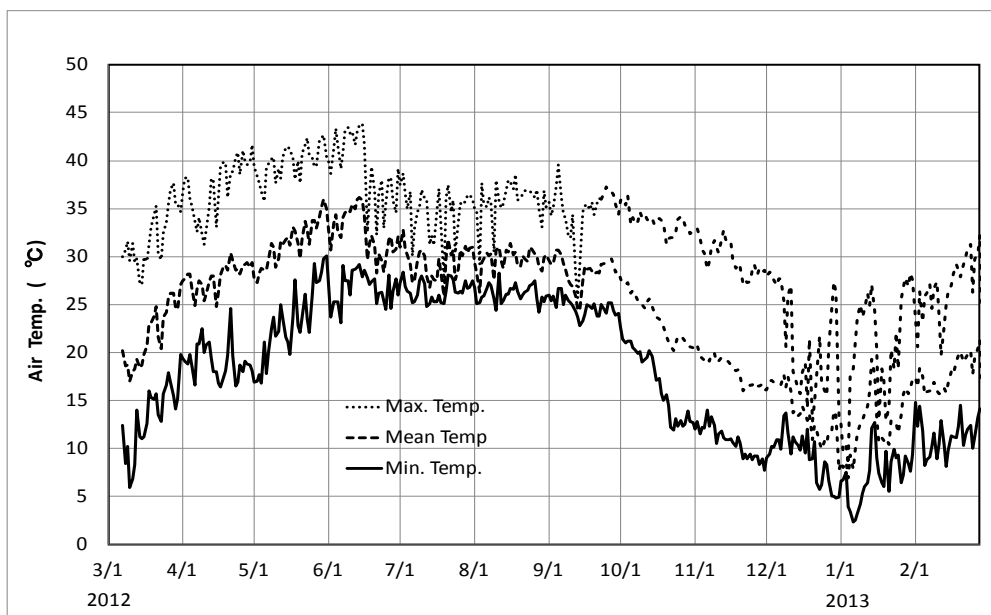


図 2.1.4 バルプリ小学校における日最高気温・日平均気温・
日最低気温の年変化
(2012年3月1日～2013年2月28日)

(4) 相対湿度

図 2.1.5 は、2013 年の日平均相対湿度（以下、相対湿度と称す）の年変化を示す。この図によると、相対湿度は、3月の70%程度から次第に減少し、4月末の30日には37.3%まで減少した。その後6月中旬まではほぼ40～65%の範囲にあったが、6月17日に一気に71.9%に上昇し、7月以降2月まで、ほぼ80～100%の範囲で推移した。

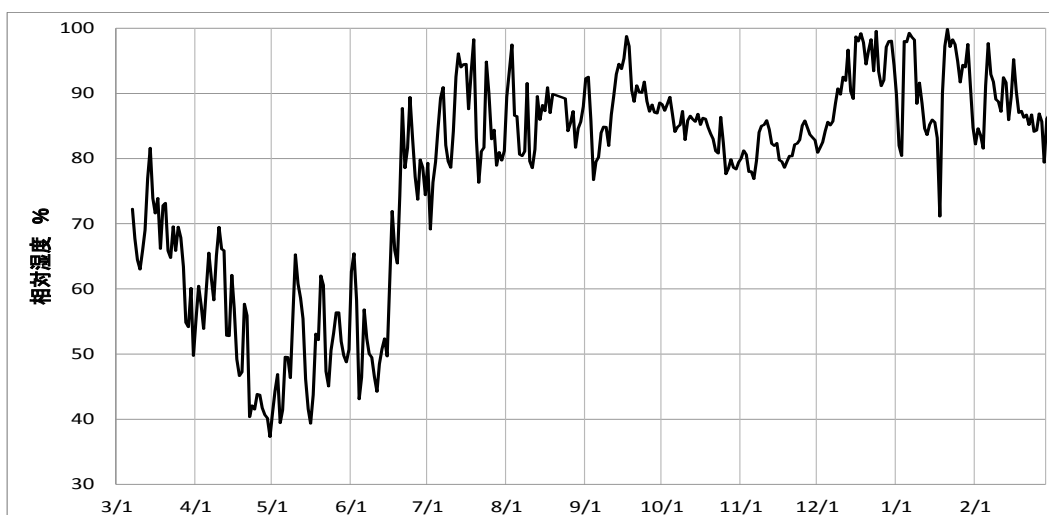


図 2.1.5 バルプリ小学校における日平均相対湿度の年変化
(2012年3月1日～2013年2月28日)

2.1.4 考察

(1) 季節区分

前章では、各種気象要素の年変化の特長について述べてきたが、そこにはいくつかの特徴的な変化が見られた。

風向風速は、4月から6月にかけて、おおむね0.5~2m/sで、緩やかに東寄りに変化した。しかし、9月18日のENEから19日にWに大きく変化し、これ以降風速は非常に弱まった。全天日射量は、6月16日の $20.7 \text{ MJ} \cdot \text{m}^2/\text{day}$ から翌日6月17日の $5.9 \text{ MJ} \cdot \text{m}^2/\text{day}$ へと急激に減少し、以後大きな変化を繰り返したが、9月18日に $4.8 \text{ MJ} \cdot \text{m}^2/\text{day}$ を記録したのを最後に、その大きな変化は終息した。気温は、6月16日まで連日のように最高気温が 40°C を超える猛暑が続いたが、6月16日の 41.7°C から17日には 32.6°C へと急激に下がった。また、相対湿度は6月15日の49.6%から17日には71.9%に急増した。8月23日までの降水量は欠測であるが、その後のデータによると9月18日に47mmを記録した後、ほとんど降水は見られなくなった。

以上のことから、2012年の夏季モンスーンは、6月17日から始まり、9月18日に終了したと判断される。雨季の開始は急激に始まり、雨季の終了は総じて穏やかである(川村, 2007)と言われるが、2012年については、Nayava(1980)によるカトマンズの平均とされるモンスーンの開始日6月12日、モンスーンの終了日9月21日ともほぼ一致する。

9月19日からは、安定した好天の続くポストモンスーンに移行し、全天日射量は小さな振幅を保ちながら緩やかに減少傾向を示したが、12月16日には前日の $10.9 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ から $4.1 \text{ MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ に急減し、以後数日このように低い値が続いた後、大きな振幅を伴いながら増加に転じた。また、ポストモンスーンに移行してから、日最高気温は緩やかな下降線を描いていたが、12月15日の最高気温 27.0°C から翌16日には 18.0°C に急低下し、以後 $10\sim 30^\circ\text{C}$ で推移した。これらのことから、ここがポストモンスーン季と冬季の境目と判断した。

以上のことを総合し、2012年度の当地における季節は、下記のように分類された。

- ・プレモンスーン季 ~ 6月16日
- ・モンスーン季 6月17日~ 9月18日
- ・ポストモンスーン季 9月19日~12月15日
- ・冬季 12月16日~

(2) 季節別風向頻度

前節における季節区分に基づき、2012年度に15分毎に観測されたデータ(2013年3月5日まで)から、季節ごとの風向頻度を求め図2.1.6に示した。

プレモンスーン季はENEからSSEの風が卓越し、最多風向はSEであった。モンスーン季はENEの風が卓越し、全風向の30%以上を占めている。ポストモンスーン季と冬季の風向はNとSWが多く二峰性を示し、最多風向は、ポストモンスーン季がN、冬季がSWであった。

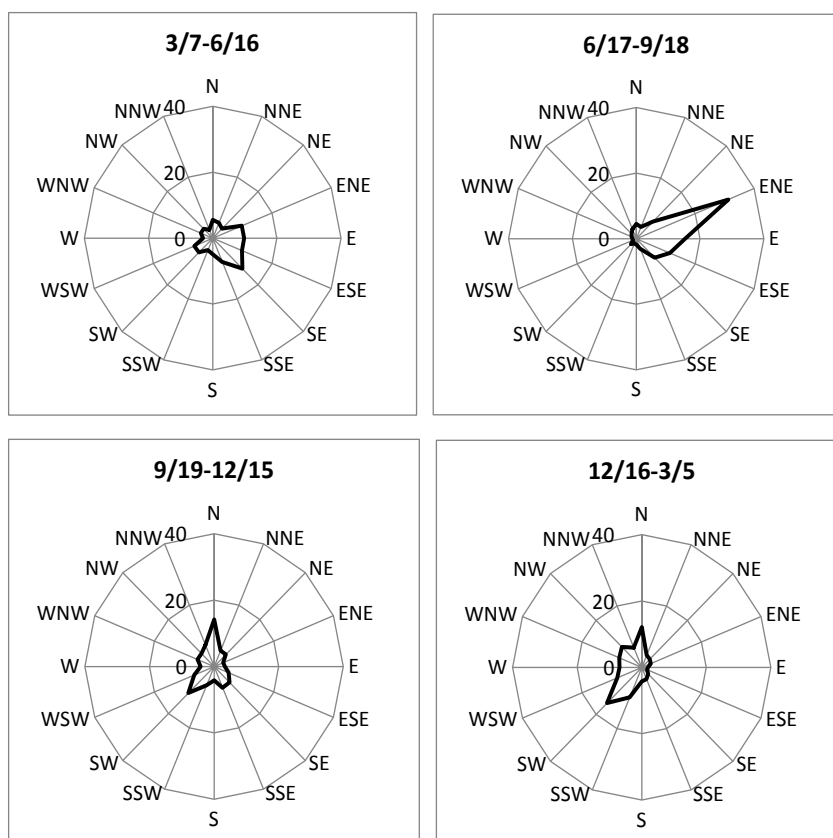


図 2.1.6 2012 年度の各季節における風向頻度
 上左：プレモンスーン季 上右：モンスーン季 下左：ポストモンスーン季 下右：冬季

(3) 風の日変化

ネパールの地形は主に、南部のインド平原に続くテライ平原，中間の山間部，北部の山岳部（ヒマラヤ）に分けられる（前野ほか，2004）．テライ低地の中央部に位置する観測地点においては，北側 10km のところまで中間の山間部であるシュワリク山地の斜面が迫っている．そこで，このような環境下における風の特徴を調べるために，季節別に，3 時間ごとの風向頻度図（図 2.1.7）を作成した．この図によると，季節ごとの風向頻度の日変化には，次のような特色が認められる．

1) プレモンスーン季

0 時では，N～ENE の北寄りの頻度が 10% を超えるが，南寄りの頻度は低い．その後，頻度のピークは 3 時に E，6 時に ENE～E，9 時に ENE となり，この間の卓越風向は ENE～E の

範囲にある．12 時になると，頻度分布の中心は

ESE～SE に移り，15 時には鋭いピーク（25%）

が SSE に現れる．18 時になると最多風向は SW～WSW に移るが，日中の風向は南寄りである．さらに 21 時になると再び北寄りの頻度が高くなる．

2) モンスーン季

0 時から 9 時までの風向頻度は，ENE が約 40% を占め安定している．12 時になると，10% 以上の風向頻度は ENE～SE と東寄りに移行し，そのピークは E（23.7%）となる．15 時も

10%以上の風向頻度は ENE～SE の範囲にあるが、18 時以降 ENE の頻度が高まり、21 時には約 45%に達する。

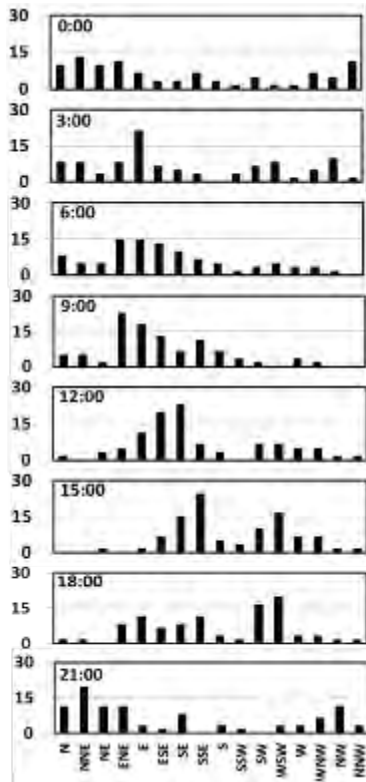
3) ポストモンスーン季

0時から6時、および21時の夜間の風向頻度は、Nが20%以上を占め、特に21時には40%に達する。一方、日中になると10%以上の風向頻度は、9時にはSSEおよびSSW～SW、12時には、ESE～SSEおよびSSW～WSW、15時にはSSW～WSW、18時にはSW～WSW、WNWおよびNを示し、南寄りの風向頻度が高くなる。

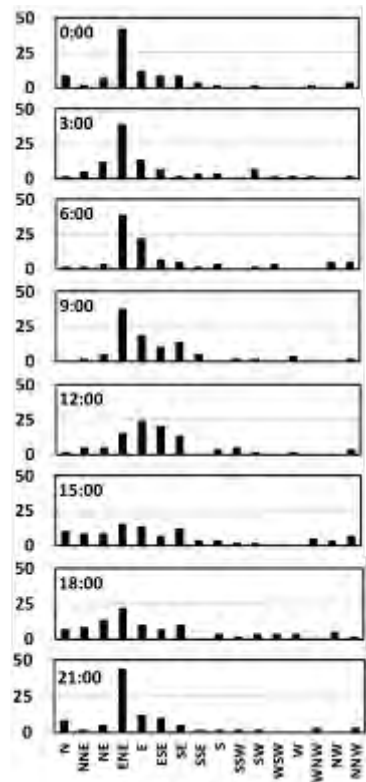
4) 冬季

0時から6時ではNの風向頻度が高くなっている。その後卓越風向は南寄りに変化して、9時から12時にはSSWの頻度が高まり、12時には30%に達する。15時以降はSWの風向頻度が25%以上を示し、特に15時には40%近くに達する。

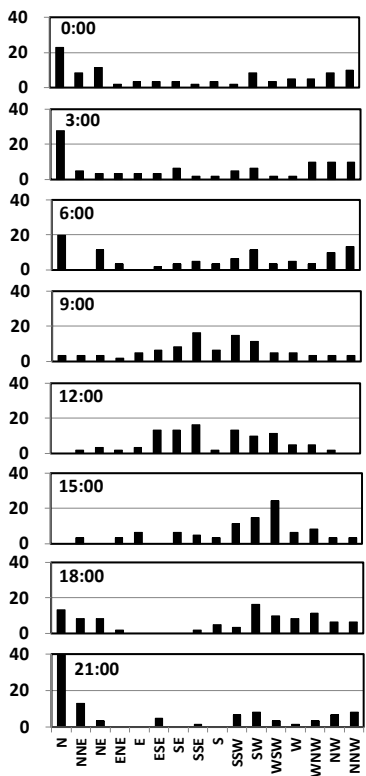
以上のことから、プレモンスーン季とポストモンスーン季では、山谷風の存在が推察される。すなわち、晴天の環境下において夜間には、山の斜面を下降する北寄りの風、日中に山の斜面を上昇する谷風としての南寄りの風が卓越することが確認出来た。ネパールのヒマラヤ高地のハージョンにおける観測結果からも、プレモンスーン季とポストモンスーン季には、夜間に山風が発達するが、モンスーン季には発達しないことが報告されている(安成・藤井, 1983)。モンスーン季に ENE の風向頻度が高いのは、この季節のマクロスケールの気流の影響であるが、日中にやや風向頻度が東寄りに傾くことについては、晴天日に発達する谷風の影響が示唆される。また、冬季に SSW～SW の風向が卓越するのは、この地域の局地的特性であると考え、今後の課題としたい。



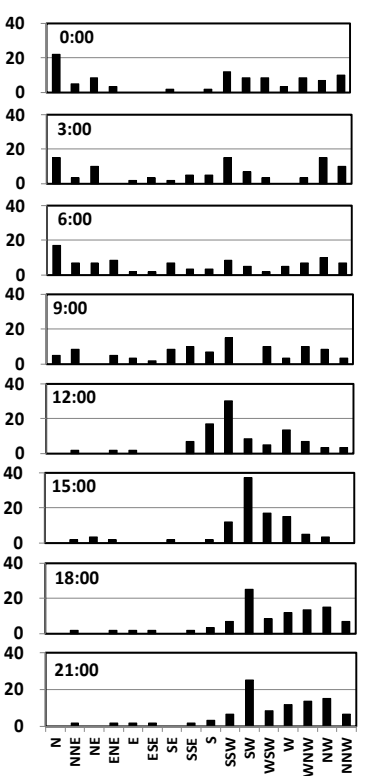
① プレモンスーン季



② モンスーン季



③ ポストモンスーン季



④ 冬季

図 2.1.7 季節別の 3 時間毎風向頻度
縦軸は、頻度 (%) を示す。

(4) 相対湿度と水蒸気圧

相対湿度と日平均水蒸気圧（以下、水蒸気圧と称する）との関係を、図 2.1.8 に示す。なお、水蒸気圧 (E) は以下の式により算出した。

$$E=10^{-2} \cdot RH \cdot E_s$$

$$E_s=6.1078 \cdot 10^{\{7.5t/(t+237.3)\}}$$

t : 気温 (°C), RH : 相対湿度 (%), E : 気温 (t) における水蒸気圧 (hPa), E_s : 気温 (t) における飽和水蒸気圧 (hPa), 相対湿度はモンスーン季に入った6月中旬から急上昇し、2月まで80~100%の範囲で推移する。この間の水蒸気圧は、モンスーンの期間は35hPa前後で推移するが、ポストモンスーンに入った10月には急激に減少し始め、10月下旬には20hPa程度となる。以後さらに減少を続け、1月上旬には10hPaに達し、以後上昇を始める。

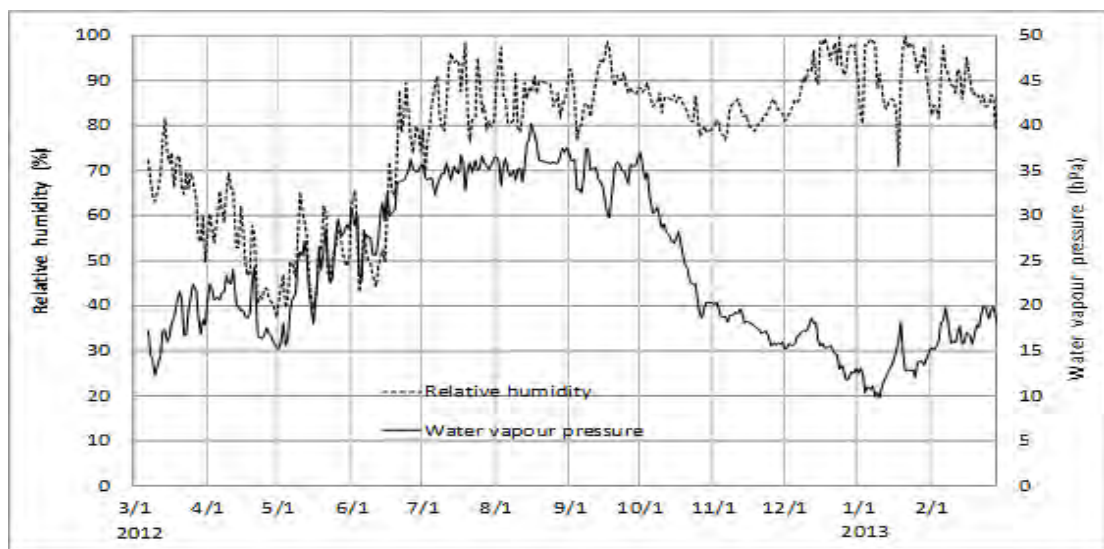


図 2.1.8 バルプuri小学校における相対湿度，水蒸気圧の年変化
(2012年3月1日～2013年2月28日)

このように、水蒸気圧は、モンスーン季に高く、冬季に低い年変動を示すが、相対湿度は、モンスーン季から冬季までの期間、80~100%で推移している。10月以降における両者の差が大きくなる要因としては、ポストモンスーン季に入ってから気温の降下と大気中の水蒸気量が減少したことが考えられる。

2.1.5 まとめ

本研究では、ネパール南部テライ低地中央部のナワルパラシ郡ピパラにおいて、2012年3月から気圧，全天日射量，風向，風速，気温，相対湿度，降水量について15分ごとの観測を開始し、2013年2月までの1年間のデータを解析した。

その結果得られた主な知見は、次の通りである。

- (1) 気圧はモンスーン季に低く、冬季に高い年変動を示す。
- (2) 4月後半から6月中旬までの日最高気温は、連日のように40°Cを超える。
- (3) 2012年のモンスーン季は6月17日～9月18日，ポストモンスーンは9月19日～12月15日と判断される。

- (4) モンスーン季にはENEの風が卓越し、全風向の50%以上を占める.
- (5) プレモンスーン季およびポストモンスーン季には、夜間に山の斜面を下降する北寄りの山風、日中に山の斜面を上昇する南寄りの谷風が卓越する.
- (6) 全天日射量と日最高気温との間には、プレモンスーン季を除き、高い相関が認められた (モンスーン季 $r=0.93$, 冬季 $r=0.85$, ポストモンスーン季 $r=0.82$).
- (7) 水蒸気圧は、モンスーン季に高く、冬季に低い年変動を示すが、相対湿度は、モンスーン季から冬季までの期間、80~100%で推移する.

参考文献

- 川村隆一 2007 : モンスーン循環の形成とその変動プロセス —大気海洋相互作用と大気陸面相互作用から謎を解く—. 天気, Vol.54, 199-202.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008a : ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査. 環境情報研究, No.16, 13-23.
- 中村圭三・大岡健三・Bhanu Bhakta Kandel 2008b : ネパールのタライ低地の井戸水利用に関する実態調査. 環境情報研究, No.16, 25-33.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2010 : ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査とその対策. 環境情報研究, No.17, 1-13.
- 前野ほか 2004 : ネパールにおけるモンスーン季の降水の地域特性. 地学雑誌, 113, 512-523.
- 安成哲三・藤井理行 1983 : 気象学のプロムナード 15 ヒマラヤの気候と氷河—大気圏と雪氷圏の相互作用—. 東京堂出版, 254 p.
- Nakamura, K., K. Ooka and T. Komai, 2007 : The Drinking Water Quality in Four Physiographic Regions of Nepal and Arsenic Contaminated Groundwater in Terai, Lowland Nepal. Journal of Environmental Studies, No.15, 53-70.
- Nayaba, J.L., 1980 : Rainfall in Nepal. The himarayan review Nepal geographical Society, No.12, 1-18.

2.2 テライ低地における全天日射量と蒸発量

2.2.1 はじめに

調査地域は、シュワリク山地の南側の扇状地に連なる平坦地に位置する。当地域における地下水ヒ素汚染の原因を究明する上で、当地域の水収支を把握することは非常に重要である。そのためには全天日射量、降水量、蒸発量の観測が必要であり、観測の精度を上げるために、気象ステーションによる観測とは別に、高精度の測定器で観測した。また、蒸発量については、現地の実状に合わせ、自作の蒸発計を使用して観測した。その結果については、Penman の推定式(1948)で算出した結果と比較し、その観測値の妥当性について検討した。

2.2.2 観測地域・観測方法

等地域の水収支を把握するうえで、全天日射量、降水量、蒸発量を観測することは非常に重要である。全天日射量および降水量については、バルプリー小学校において、それぞれ英弘精機社製精密全天日射計（MS-801 および大田計器製転倒ます型雨量計（OW-34-BP）で観測した。蒸発量については、この地点から北に約 2km のパタニ Patani において（図 2.2.1）、地上 1m に設置した自作の蒸発計（直径 20cm）により、現地スタッフが毎日 8 時に観測した（写真 2.2.1）。



図 2.2.1 観測地点



写真 2.2.1 パタニに設置した蒸発計

2.2.3. 観測結果

(1) 全天日射量

2012年3月6日から2014年3月3日までの2年間、全天日射量の観測を実施した。ここでは1月1日から12月31日までの1年間の観測値が揃う、2013年を研究対象とする。2013年の大気外日射量と全天日射量との関係について、日別の年変化を図2.2.2に示す。

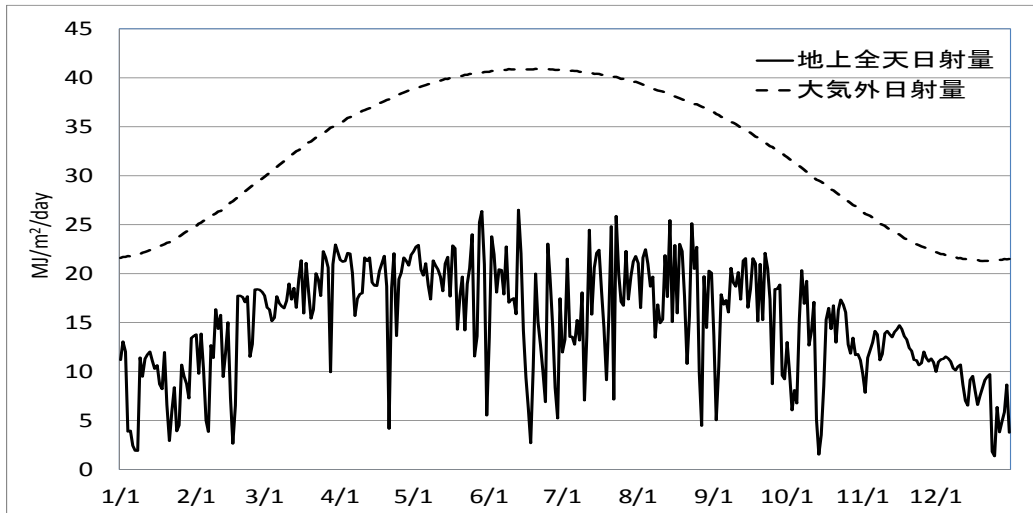


図 2.2.2 バルプリー小学校における日別日射量の年変化 (2013 年)

この図によると、大気外日射量は、夏至の頃に極大値 40.9 MJ/m^2 、冬至の頃に極小値 21.3 MJ/m^2 となる年周期を示す。1月から3月末ころまでの全天日射量は、大気外日射量と並行して増加傾向にあるが、4月から9月までは横ばいに転じる。6月から9月にその振幅が増加するのは、この時期がモンスーン季に当たり、雨天・曇天日が増加することによる。10月からのポストモンスーン季以降は、再び大気外日射量と並行した変化を示す。

大気外日射量と全天日射量との関係を、より把握しやすくするために、月別総日射量の年変化を図2.2.3に示す。この図で、6月の大気外日射量が5月、7月よりも小さくなっ

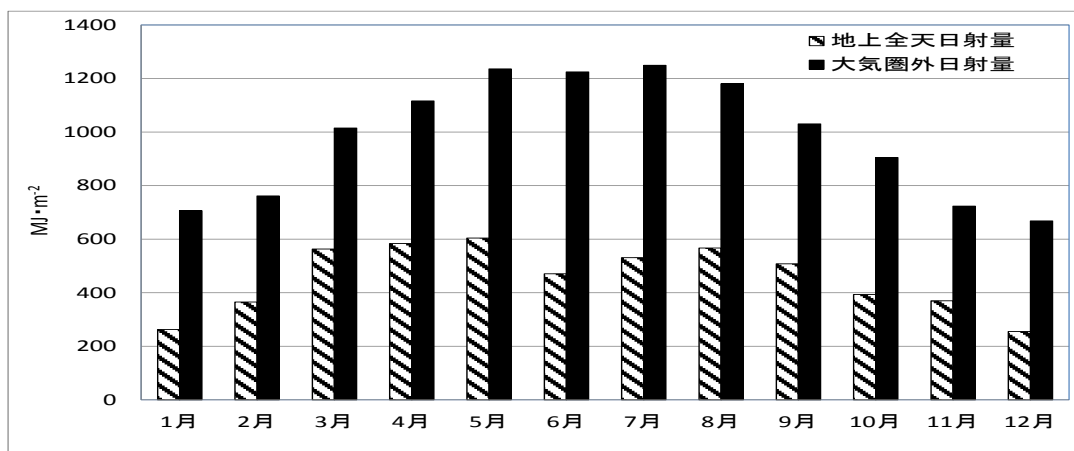


図 2.2.3 バルプリー小学校における月別総日射量の年変化 (2013 年)

ているのは、6月の月日数が1日少ないためである。6月の全天日射量が、5月のそれに比べて大きく減少しているのは、モンスーン季に入って、雨天・曇天日が急増したことにより、7月の全天日射量も少なくなっている。

(2) 降水量と蒸発量

2013年の年降水量と年蒸発量は、それぞれ1451mm、1115mmである。月降水量と月蒸発量の年変化を、図2.2.4に示す。この図によると、おもな降水は4月から9月までの6ヵ月間にあり、特にモンスーン季に当たる6月から9月までの4ヵ月間の降水量は、1173mmで年間降水量の80.8%を占める。一方、蒸発量は、プレモンスーン季の3月から5月に高い値を示す。この期間は、図2.2.3の年間で最も全天日射量の多い期間と一致し、日最高気温は40℃にもおよぶ(図2.1.4)。またこの期間には、気温の上昇に伴い水蒸気圧が上昇するが、逆に相対湿度は40%付近まで減少し、年間で最も乾燥する(図2.1.8)。

モンスーン季に入ると全天日射量が減少し、水蒸気圧と相対湿度が高い値を維持するために、蒸発量は減少する。10月以降のポストモンスーン季には降水はないが、全天日射量の減少と気温の低下のため、プレモンスーン季と比べて蒸発量は減少する。

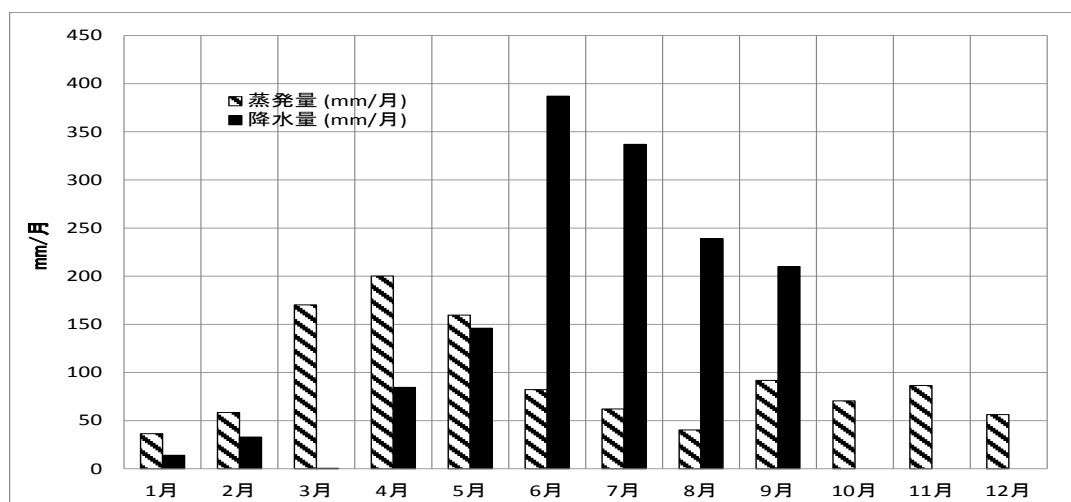


図 2.2.4 バルブプリ小学校における月降水量と月蒸発量の年変化 (2013 年)

(3) 蒸発量の実測値と計算値との比較

観測地域は亜熱帯気候帯に属し、周囲には水田が広がる。この地域において蒸発量の実測値と計算値との比較を試みた。

蒸発量の実測は、パタニ Patani の水田地帯に位置する農家で、母屋の南側の庭先において、地上 1m 高度に設置した直径 20 cm の自作のステンレス製蒸発計により観測した。蒸発計内の水位については、(株)安藤計器製工所製の直径 20 cm 蒸発計専用シリンダーで、毎日 8 時に観測した。

蒸発量の計算方法としては、経験的手法によるソーンスウエイト法(Thornthwaite, 1948)や、理論式と経験式を組み合わせたペンマン法(Penman, 1948, 1963)などが良く知られている。低緯度地域(シンガポール、マレーシアのクアラルンプール、コタバル)や、石垣島、鹿児島島の蒸発量について、Pan で測定した実測値と、Thornthwaite, Penman(1948), Fitzpatrick and Stern(1965), Swinbank(1963)のそれぞれの推定式による計算値とを比較し

た結果から、Penman (1948)の推定式による計算結果が、最も実測値に近い値を示したことが報告されている（榎根・小林(1973)）。

そこで、当地域における蒸発量（ E_0 ）を、下記のPenman (1948) の式から計算し、得られた結果と実測値のそれぞれの日別値について、その年変化を図 2.2.5 に示した。

$$E_0 = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] R_0 + \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right] E_a$$

$E_a = 0.26(1 + 0.537u)(e_{Ta} - e_a)$, E_0 : 蒸発量(mm/day), R_0 : 放射を表す項, E_a : 空気力学的な効果による蒸発を表す項, u : 風速(m/s), T : 気温 (°C), e_{Ta} : 気温 T °Cの飽和水蒸気圧 (hPa), e_a : 大気中の水蒸気圧(hPa), $\Delta = de/dT$: 温度に対する飽和水蒸気圧の変化率 (hPa/°C), γ : 乾湿計定数 ($C_p P / 0.622 L$), C_p : 空気の定圧比熱 (1005 J/kg/K), P : 大気圧, L : 蒸発の潜熱

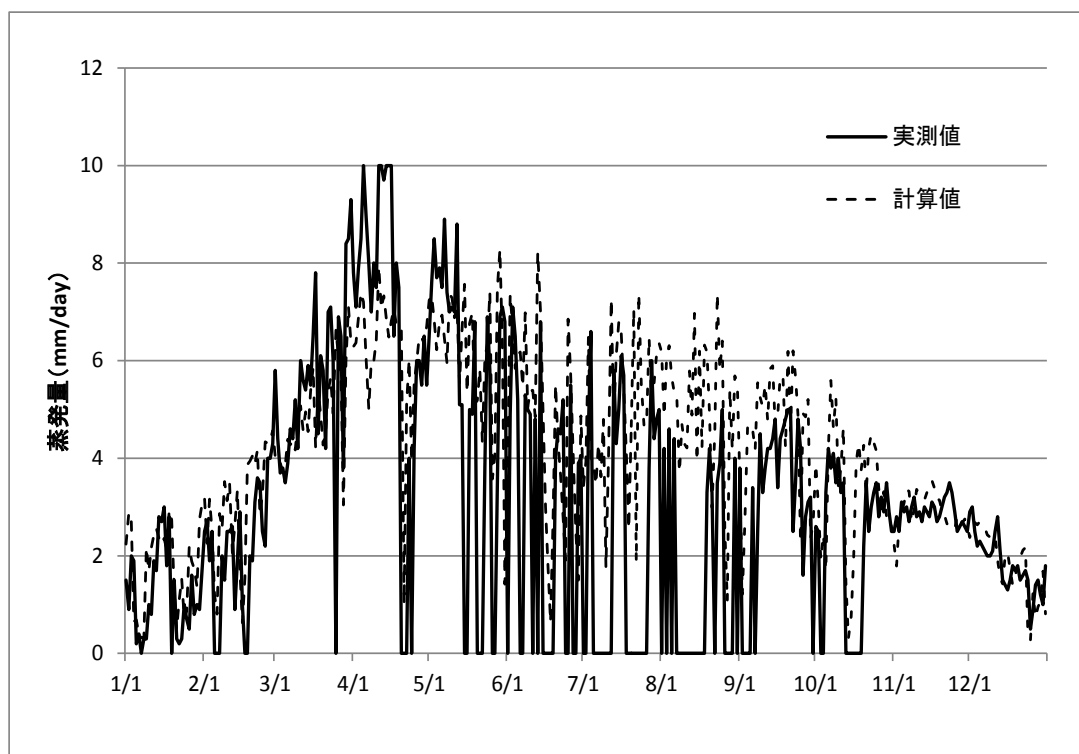


図 2.2.5 バルプリ小学校における蒸発量の日別実測値と計算値との比較 (2013 年)

この図によると、5月中旬から9月上旬までのモンスーン季を除く期間については、実測値と計算値にはかなり良い相関が見られる。そこで、両者の関係をさらに詳細に調べてみると、モンスーン季以外では、両者間に高い相関($r=0.87$)が認められる(図 2.2.6)。一方モンスーン季には、両者間の相関は、ほとんど認められなかった($r=0.04$)。

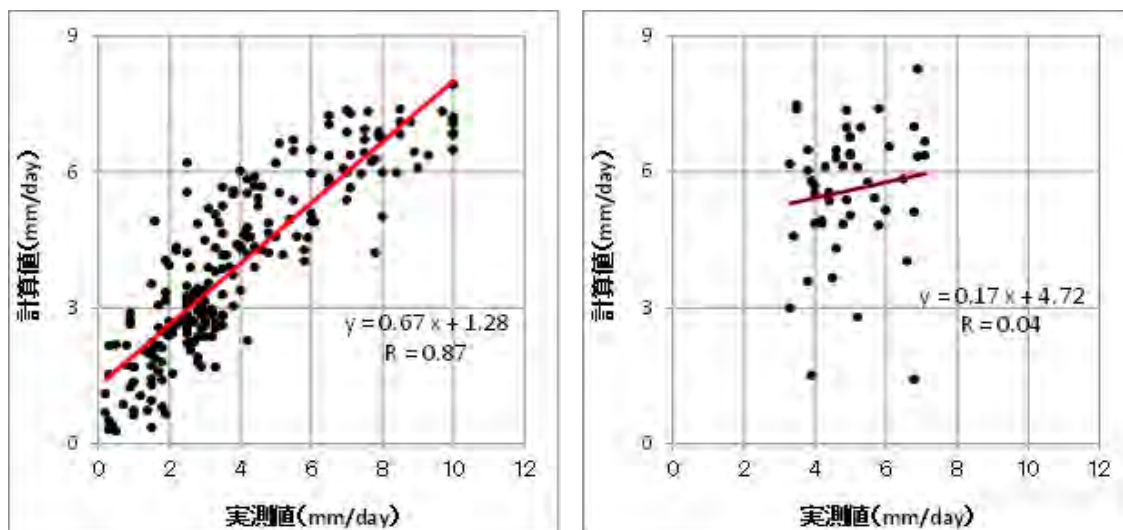


図 2.2.6 蒸発量の実測値と計算値との比較

左： モンスーン季以外 右：モンスーン季

2.2.4 考察

蒸発量は、日射量、気温、水蒸気圧、相対湿度などによって決まる。日射量は冬至のころに最少となるが、その後次第に夏至に向かって増加していく。気温は日射量よりも1か月ほど遅れて上昇し始める。大気中の水蒸気圧も日射量の増加と気温の上昇に伴い増加していくが、相対湿度は逆に急減し乾燥化が進む。このような条件が揃い、蒸発量は3月以降増加する。6月にモンスーン季に入ると雨天・曇天日が多くなり、日射量の減少・気温の低下・相対湿度の上昇により、蒸発量は急減する。10月以降のポストモンスーン季には晴天が続き水蒸気圧は低下するが、相対湿度の高い値の持続、日射量の減少・気温の降下のため、蒸発量はプレモンスーン季の1/2以下である。蒸発量は、このようにして年変化する。

本研究における蒸発量は、地上1mに設置した直径20cmの自作のステンレス製蒸発計によって観測されたものである。この観測値の妥当性を検証するために、低緯度地域における蒸発量の推定式として最も適切と考えられるPenman (1948)の推定式による計算結果との相関を検討した。その結果、降水の有無により蒸発量の変動が激しいモンスーン季を除く期間においては、蒸発量の実測値と計算値との間に高い相関($r=0.76$)が認められ、本研究で実施した蒸発量の観測は、妥当のものであったと判断された。

2.2.5 まとめ

本研究では、ネパール・テライ低地中央部のナワルパラシにおける、2013年の1年間にわたる全天日射量・降水量・蒸発量に関する観測結果について検討した。

その結果、得られた主な知見は、下記の通りである。

- (1) モンスーン季を除く期間の全天日射量は、大気外日射量と並行して推移する。
- (2) 3月から5月のプレモンスーン季に、蒸発量は高い値を示す。

この高い値は、全天日射量の増加、気温の上昇、相対湿度の低下によってもたらされる。

- (3) Penman (1948) の式より得られた値と、実測値との間には、モンスーン季以外では、高い相関($r=0.87$) が認められる。
このことから、本研究における蒸発量観測の妥当性が確認された。

参考文献

- 梶根勇・小林守 1973：モンスーンアジアの蒸発散量 —とくにその気候学的推定法について—。吉野正敏編著『モンスーンアジアの水資源』所収，55-70，古今書院，259p.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008a：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査。環境情報研究，No.16，13-23.
- 中村 圭三・大岡 健三・Bhanu Bhakta Kandel 2008b：ネパールのテライ低地の井戸水利利用に関する実態調査。環境情報研究，No.16，25-33.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2010：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査とその対策。環境情報研究，No.17，1-13.
- 中村 圭三・松本 太・濱田 浩美・駒井 武・大岡 健三・谷地 隆・松尾 宏・谷口 智雅・戸田 真夏 2014：ネパール・テライ低地における気候環境調査。法政地理，No.46，17-24.
- Fitzpatrick, E.A. and W.R. Stern, 1965 : Components of radiation balance of irrigated plots in a day monsoonal environment. J. Appl. Meteor. Vol.4, 649-660.
- Nakamura, K., K. Ooka and T. Komai, 2007 : The Drinking Water Quality in Four Physiographic Regions of Nepal and Arsenic Contaminated Groundwater in Terai, Lowland Nepal. Journal of Environmental Studies, No.15, 53-70.
- Penman, H.L., 1948 : Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc., London, A193, 120-145.
- Penman, H. L., 1963 : Vegetation and hydrology. Tec. Comm, No.53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, 124p.
- Swinbank, W.C., 1963 : Long-wave radiation from clear skies. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., Vol.89, 339-348.
- Thornthwaite, C.W., 1948 : An approach toward rational classification of climate. Geogr. Rev., Vol.38, 55-94.

2.3 テライ低地における室内温熱環境

2.3.1 はじめに

本研究グループでは、気候調査の一環として、住居内の温熱環境を調査している。その成果は、生活実態の評価とともに、気候風土に適応した住まい方や環境デザインの基礎資料として有効となりうる。当該地域は、低緯度に位置し海拔高度が低く、亜熱帯性の気候である。春から夏にかけては、太陽高度が高いため日射量が多く、気温が 40°C を超える日もまれではない（中村ほか、2014）。また、モンスーン季には湿度が高く、体感的に厳しい暑熱環境下にある。しかし、断熱材など特別の遮熱構造を持たない住宅が多く、屋根面の受熱による室温への影響が大きいものと考えられる。ネパール・バグマティ Bagmati 県ダーディン Dhaging 郡の農村では、近年トタン屋根の普及による室内温熱環境の悪化も見られるという指摘もある（倉本・リジャル、2014）。また、熱中症が多発しているにもかかわらず、住宅の建築構法に関しては、毒ヘビやモンスーン季の暴風雨などへの対策が優先され、暑熱対策が遅れている。Pradhan et al. (2013) は、ネパール南部のテライ低地において、気候変動に伴い暑熱ストレスが増加し、今後対策を講じる必要性を指摘している。IPCC 第5次報告書においても、有効な対策がとられないまま地球温暖化が進めば、アジアで暑熱による死亡率が高まると警告している（Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014）。

さらにネパールでは、現在経済が停滞し、エア・コンディショナー（以後エアコンと称す）の普及が遅れている。人々はエネルギーをあまり使用しない生活をしている。連日6時間以上の計画停電が行われるなど、電力事情が深刻である。このような状況下で、ネパールにおけるエアコンの急速な普及は望めない。よって、地域の気候特性に適応した住まい方やエネルギー対策が重要になってくる。日本からは、JICA 等の機関が関わり、ネパールにおける小型水力発電の開発や普及を支援、推進してきた。エネルギー分野における技術協力の方策を考える上でも、室内温熱環境の実態を評価することは有意義であると考えられる。

モンスーンアジア地域における室内気候の調査は、タイ、カンボジア、ミャンマーなどで行われている（アタシットほか、2003；宮崎ほか、2010；坂上・村川 1999 など）。それらは、主に建築学の分野からのアプローチであり、設備面での暑熱緩和やエネルギー消費の実態評価などに関連した解析は多いが、室内温熱環境の気候的な要因に重点を置き、詳細に検討したものは少ない。ネパール南部で住宅内の温熱環境を調査した研究として、リジャルほか（2002）や Rijal et al. (2005) があるが、短期間の調査であり、降水量の観測はなく、モンスーン季を含めた季節的な気候の特徴に関する考察はなされていない。

そこで本研究では、ネパール南部における住宅の室内温熱環境の季節的な特徴を、実証的に明らかにすることを目的として、ナワルパラシ郡パラシにおいて、屋根素材が異なる3家屋で2012年3月より2年間気象観測を行なった。その結果に基づき、気候学的観点から、気候風土がどのように室内温熱環境に反映するかに着目し、解析をすすめた。

2.3.2 調査対象地域および調査方法

(1) 調査対象地域

調査対象地域は、2.1、2.2 と同じで、図 2.2.1 に示すマフワ Mahuwa およびパタニ Patani の集落である。この集落内において、屋根素材の異なる3家屋の住居内と屋外1地点で気象観測を行った。

(2) 調査対象の家屋の構造および外観

調査対象の家屋の外観および室内を写真 2.3.1 に示す。

住宅 A の屋根素材はトタンで、塗装はされていない。木製の横木（母屋）にトタンを載せた構造である。断熱の施工はされておらず、屋根の裏面がそのまま天井となっている。天井の高さは、建物の端が 2m40cm、中央が 3m40cm である。住宅は 2 つの部屋と廊下で構成されている。入口は東向きで、部屋にはそれぞれ木製の窓がある。壁はレンガ造りで、表面に白色のモルタルが塗工されている。室内の床は、ビニール又はポリ製のマットが敷きつめられている。観測機器を設置した部屋は、日常居間兼寝室として利用されている。

住宅 B の屋根素材はコンクリートで、塗装はされていない。断熱の施工はされておらず、コンクリートの裏面がそのまま天井となっており、青く塗装されている。天井の高さは、建物の端、中央ともに 2m79cm である。住宅は 4 つの部屋と廊下で構成されている。入口は北向きで、居室にはそれぞれ木製の窓がある。表側の壁（北向）はレンガ造りで、表面に青色のモルタルが塗工されている。裏側（南向）はレンガが塗工されていない。室内の床は、タイル又は石でツルツルに加工されており、毒ヘビ対策にもなっている。観測機器を設置した部屋は、日常居間兼寝室として利用されている。

住宅 C の屋根素材はカワラで、塗装はされていない。屋根の構造は、中央に 1 本の棟木と傾斜方向に沿って数本の垂木が組まれており、その上に直交する形で竹の棧が張られ、天井部を形成している。断熱の施工はされていない。天井の高さは、建物の端が 2m、中央が 2m89cm である。住宅は 2 つの部屋で構成され、各々に入口がある。入口は東向きで、部屋にはそれぞれ木製の窓がある。壁はレンガ造りで、塗工はされていない。室内の床は、土間となっている。観測機器を設置した部屋は、食料や衣類などの保管に利用されている。

(3) 気象観測の方法

前述のように、当地においては、太陽高度が高く日射量が多い上に、すべての住宅において屋根に断熱材、遮熱材がないため、屋根面の受熱が室内の気候に大きく影響すると予想される。また、各家屋とも壁の素材がレンガのため、壁による室温への影響は、各住宅間で差が小さいものと考えられる。よって、本研究では各住宅間における屋根素材の違いが、壁素材よりも顕著に室温の差に反映するものと想定し調査を計画した。

1) 住宅内の気象観測

トタン屋根、コンクリート屋根、カワラ屋根の住宅内の温熱環境を調べるために、2012 年 3 月 1 日から 2014 年 3 月 6 日まで、30 分間隔で気温、相対湿度、黒球温度の測定を行った。気温および相対湿度は、自記記録式の温湿度ロガー（Onset 社製）を使用した。黒球温度は、直径 15cm の金属球に自記記録式の温度ロガー（T&D 社製）のセンサー部を球の中心に固定して測定した。なお、黒球温度は、2012 年 8 月 24 日から 2013 年 11 月 14 日までの期間欠測した。

2) 屋外の気象観測

屋外の気象データは、前節 (2.2) のバルプuri Balpuri 小学校の校庭に設置した気象ステーションにより、2012 年 3 月 1 日から 2014 年 3 月 6 日まで観測を行なった。(写真 2.1.1)。



住宅 A. トタン屋根の家屋住宅



住宅 B. コンクリート屋根の家屋



住宅 C. カワラ屋根の家屋

写真 2.3.1 調査対象の家屋の外観

校庭は部分は草地となっているが、その草は夏季には人丈ほどに成長する。気象ステーションは、Onset 社製で、気圧、全天日射量、風向、風速、気温、相対湿度、降水量を 15 分ごとに観測した。そのほかに、英弘精機社製精密全天日射計 (MS-801) により、全天日射量を観測した。なお、降水量は、2012 年 3 月 1 日から 8 月 23 日までの期間、欠測した。

3) 屋根面、壁面の表面温度の観測

屋根と壁の表面温度は、2014 年 3 月 3 日 12:00~5 日 9:30 に、温度ロガー (T&D 社製) のセンサー部を屋根面及び壁面に密着してアルミテープで固定し、10 分間隔で測定した。なお、コンクリートの屋根面温度は、欠測および異常値が多いため、解析には使用していない。日射量は、3 月 3 日 15:30~3 月 4 日 9:30 までの時間、欠測した。

2.3.3 結果

(1) 各季節の晴天日における気温、相対湿度、絶対湿度

2013 年 3 月~2014 年 2 月において、トタン屋根、コンクリート屋根、カワラ屋根の各住宅内 (以下各々をトタン室内、コンクリート室内、カワラ室内と称す) と屋外における気温、相対湿度、絶対湿度および日射量について、調査期間における各月の晴天日の平均日変動を算出した。なお、晴天日は日照率が 50% 以上の日とした。絶対湿度は、容積絶対湿度 (g/m^3) で算出した。図 2.3.1 に各季節における代表的な月の結果を示す。プレモンスー

ン季は2013年4月、モンスーン季は2013年7月、ポストモンスーン季は2013年11月、冬季は2014年1月を選んだ。

1) プレモンスーン季

プレモンスーン季の全天日射量の最大値は、モンスーン季に次いで大きい。夜半から早朝にかけては、各室内と屋外のそれぞれの間の気温差が大きく、高い方から順にコンクリート室内、トタン室内、カワラ室内、屋外となっている。これらの値は、日の出以降急激に上昇し、日較差が屋外 15.1℃、トタン室内 13.3℃、コンクリート室内 9.8℃、カワラ室内 13.5℃であった。17:00 までの日中の気温は、トタン室内で最も高く、コンクリート室内で最も低く推移した。日最高気温の出現時刻は、トタン室内とカワラ室内 14:30、屋外 15:30、コンクリート室内 16:00 であった。

各室内および屋外の相対湿度は、約 30~80%の範囲にあり、他の季節よりも低く推移した。その値は、夜間に高く、屋外、カワラ室内、トタン室内、コンクリート室内の順で高いが、日中は急激に低下し、各室内、屋外間の差が小さくなる。絶対湿度は、全てが終日 12.7~15.8g/m³の範囲で推移し、他の季節よりも日変化が小さい。

2) モンスーン季

モンスーン季の全天日射量の最大値は、他の季節より大きい。夜間の気温は、他の季節より緩やかに下降し、高い方から順にコンクリート室内、トタン室内、カワラ室内、屋外となっている。日の出以降、これらの値は他の季節より緩やかに上昇し、日較差が屋外 7.0℃、トタン室内 7.8℃、コンクリート室内 6.4℃、カワラ室内 6.3℃と他の季節よりも小さい。日中の気温は、カワラ室内で最も低い値を示し、16:00 まではトタン室内、それ以降はコンクリート室内で最も高く推移した。また日最高気温の出現時刻は、屋外、トタン室内、カワラ室内が 14:00、コンクリート室内が 17:00 であった。

相対湿度は、室内、屋外ともに終日 50%以上で推移した。その値は、夜間に室内で屋外よりも低く、日の出以降大きく低下した。絶対湿度は、全てが終日 11.0~15.8g/m³の範囲で推移し、夜間に急減した。

3) 冬季

冬季の全天日射量と気温の日変化には、ポストモンスーン季と同様の傾向がみられた。日の出以降、気温は急激に上昇し、日較差は屋外 14.7℃、トタン室内 12.1℃、コンクリート室内 9.1℃、カワラ室内 9.9℃であった。日中の値は、トタン室内が屋外をしのいで最も高く、コンクリート室内とカワラ室内が低く推移した。日最高気温の出現時刻は、トタン室内 14:00、カワラ室内と屋外が 15:00、コンクリート室内 16:00 であった。

相対湿度は室内、屋外ともに終日 60%以上で推移し、日変化はポストモンスーン季より小さい。日中の値は、気温上昇に伴い大きく低下した。絶対湿度は、全てが終日 8.6~14.8g/m³の範囲で推移し、4季節の中で最も低く、日変化が大きい。

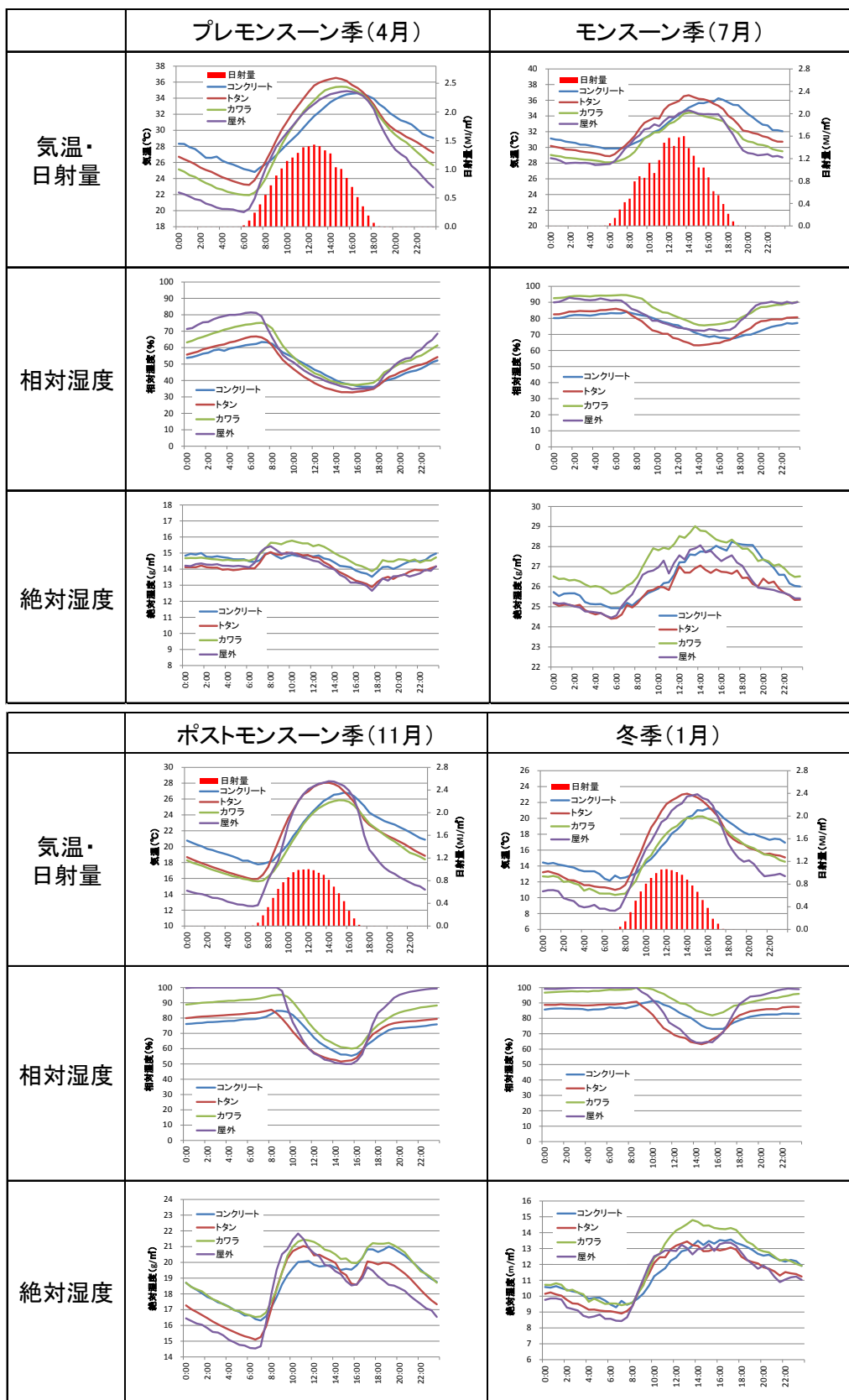


図 2.3.1 各季節の晴天日における気温，相対湿度，絶対湿度

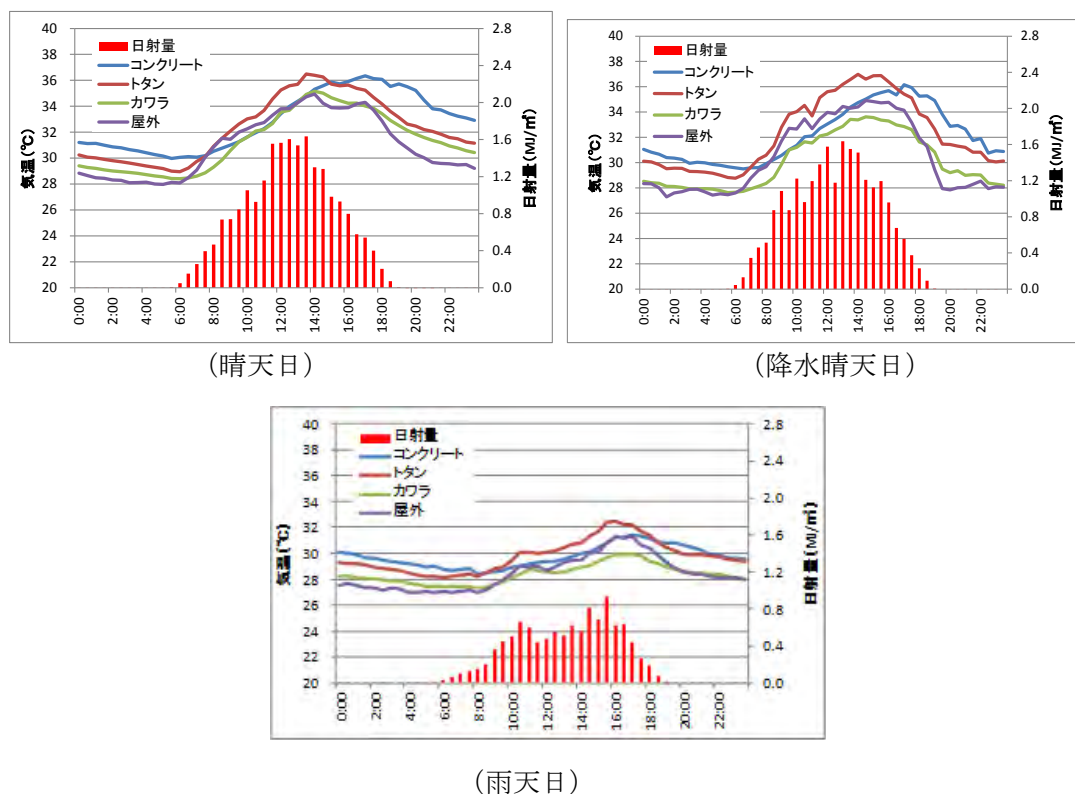


図 2.3.2 モンスーン季（2013 年 7 月）の晴天日，降水晴天日，雨天日における室内気温の平均日変化

(2) モンスーン季の晴天日，降水晴天日，雨天日における気温日変化

図 2.3.2 に 2013 年 7 月において，降水があった晴天日（以後降水晴天日と称す），降水がなかった晴天日（以後晴天日と称す），および雨天日における気温の日変化を示す．なお，雨天日は日照率が 20%未満で降水があった日とした．

日の出以降の気温上昇は，コンクリート室内とトタン室内においては，晴天日と降水晴天日との間であまり変化はないが，カワラ室内では，降水晴天日の方が緩やかである．日中の気温は，晴天日においては 14:30 まで，降水晴天日においては 16:30 までトタン室内が最も高く，それ以降はコンクリート室内が最も高く推移した．降水晴天日の日中においては，カワラ室内の気温が最も低く推移した．トタン室内とカワラ室内との気温差が最も顕著で，その最大値は，晴天日の 13:30 に 1.6°C だったのに対し，降水晴天日では 14:00 に 3.6°C であった．

降水晴天日の日射量では，12:30 にやや低い値がみられたものの，晴天日の日射量と降水晴天日ではあまり差はみられなかった．

雨天日は，気温上昇が緩やかで，日較差が晴天日より小さく，日中における気温は，高い方から順にトタン室内，コンクリート室内，カワラ室内であった．日射量が最大であった 15:30 に各室温の最高と最低の差は 2.8°C と最大になった．

(3) 晴天日における屋根面と壁面の表面温度

図 2.3.3 に 2014 年 3 月 4 日における各住宅の屋根面温度，壁面温度，室内外の気温を示す．屋根面温度は，日の出以降トタン屋根が急激に，カワラ屋根が緩やかに上昇した．

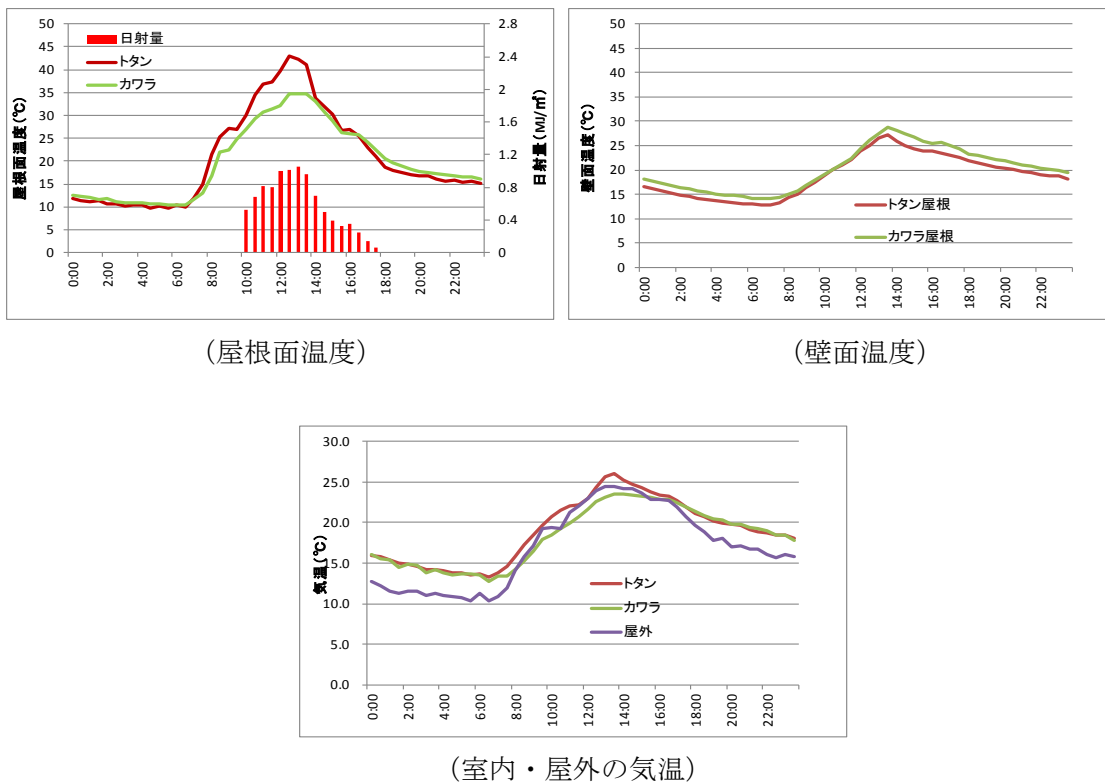


図 2.3.3 2014 年 3 月 4 日における各家屋の屋根面温度，壁面温度，室内・室外の気温相対湿度，絶対湿度

その最高値は、トタン屋根 42.9℃、カワラ屋根 34.8℃で、ともに 12:30 に観測された。14:00 以降それらの値は類似し、17:00 以降は屋外と同様の傾向を示した。室温は、日の出以降トタン室内がカワラ室内よりやや高く推移し、17:00 以降両者は同程度であった。それらの最高値は、トタン室内が 13:30 に 26.1℃、カワラ室内が 14:00 に 23.6℃で、壁面温度の日変化は、両者とも同様の傾向を示し、その最高値は、トタン屋根の住宅が 27.2℃、カワラ屋根の住宅が 28.7℃で、ともに 13:30 に観測された。

2.3.4 考察

(1) 室内気候の季節的な特徴とその要因

1) モンスーン季の特徴

モンスーン季における室内、屋外の気温は、夜間に他の季節より緩やかに低下する。この一因として、屋根の表面や内部が湿っているため、さらに熱容量が大きくなることが考えられる。モンスーン季は、他の季節に比べ降水頻度が高く、晴天日でもスコールのような短時間強雨がしばしばみられる。夜間に相対湿度が高いことから、屋根面の水分が蒸発しにくく、空気中の水蒸気が冷やされ飽和し結露したり、放射冷却が少ない可能性もある(近藤, 2000)。結果的にこれらのことが、日の出以降の気温が他の季節より緩やかに上昇し、日較差が小さい要因になっていると判断される。

また、日中の気温は、夕方まではトタン室内、それ以降はコンクリート室内において最も高く推移し、屋外より明確に高かった。これは、他の季節より全天日射量が多く、屋根面の受熱が大きいためと考えられる。コンクリート室内では、日最高気温が他の室内より 3

時間遅れて出現した。この遅れは他の季節より顕著であった。この要因として、屋根面の熱容量が大きいため、室温上昇に時間を要したものと考えられる。すなわち、室温は受熱量の積分と時間に応じて変動する。これは、建築設備等の分野で言われる「励振に対する応答」と解釈され、受熱量が“励振”、室温が“応答”に相当する（木村，1970）。

一方、日中においてカワラ室内の気温は最も低く、トタン室内との差は日最高気温時に最大であった。これは、屋根素材の保水状態の違いを反映したものと考えられる。すなわち、保水能力の高いカワラ屋根は、保水不可能なトタン屋根より湿った状態にあるため、日射による水分の蒸発で潜熱が奪われ、屋根の表面温度の上昇が抑制される。そのため室温の上昇も抑制され、トタン室内との間に大きな気温差が生じたものと理解される。またカワラ室内については、これに加え土間の湿気が影響し、日中の気温上昇を抑制しているものと考えられる。このことはカワラ室内における絶対湿度が高い傾向からも認められる。

以上の結果は、各室温の形成要因として、降水や屋根素材の保水状態が関係することを意味する。

2) 非モンスーン季の特徴

モンスーン季以外の季節（以後非モンスーン季と称す）における気候は、比較的類似した傾向を示すが、若干の違いがあり、①プレモンスーン季、②ポストモンスーン季・冬季に分けて記述する。

① プレモンスーン季

プレモンスーン季の気温は、日の出以降モンスーン季より急激に上昇し、日較差が大きい。この傾向は、コンクリート室内以外で顕著であった。コンクリート室内における日最高気温は、トタン室内より1時間半遅れて出現し、3.5℃低い値を示した。一方、夜間に室内の気温は、最も高いコンクリート室内と、最も低いカワラ室内との差がモンスーン季に比べ大きい。これらの要因として、日中の気温上昇には屋根面の受熱が、夜間の気温低下には、屋根面からの放熱が関与しているものと理解される。

また、カワラ室内の気温は、モンスーン季とは対照的に日中大きく上昇している。この一因として、空気が乾燥しており、カワラ屋根の保水が少なく、日中における室内の昇温抑制が小さいことが挙げられる。これは、モンスーン季に比べ相対湿度と絶対湿度が低いことから、空気中の水蒸気量が少ない結果を反映したものと判断される。

② ポストモンスーン季・冬季

両季節とも日の出以降、気温が急激に上昇し、日較差が大きく、この傾向はトタン室内で顕著である。日中の気温は、コンクリート室内とカワラ室内で屋外より低く、最も高いトタン室内でも屋外と同程度である。これは、他の季節より日射量が比較的少なく、屋根面の受熱が小さいためであると考えられる。両季節とも日最高気温は、トタン室内に比べコンクリート室内が2時間、カワラ室内が1時間半遅れて出現し、約3℃低い値を示した。これは、屋根素材の熱的性質の差異が室温に反映したものと判断される。

夜間に、室内の気温は屋外より高く、コンクリート室内で最も高く推移した。これらの値は、プレモンスーン季と同様、各屋根面からの放熱を反映したものと考えられる。しかし、カワラ室内とトタン室内の気温が同程度で推移しており、プレモンスーン季、モンスーン季とは異なる傾向を示した。この要因として、放射冷却等の効果によるものと推察されるが、現段階では検証できず、今後の課題である。

以上のように、各室温の形成要因として、屋根素材の熱的性質の効果が認められた。

(2) モンスーン季における降水と室温との関係

図 2.3.2 の結果によると、日の出以降、降水晴天日におけるカワラ室内の気温は、晴天日より低く推移し、最も高いトタン室内との差が顕著であった。このことから、降水晴天日において、保水能力の高いカワラ屋根がより湿った状態にあるため、日中においては、水分の蒸発による冷却効果が大きく作用して室温上昇が抑制され、その結果、保水不可能なトタン屋根の室温との間に大きな差が生じたものと判断した。

以上の結果は、モンスーン季は降水頻度が高く、屋根素材の違いが各室温の差に反映したとする前述の考察を裏付けるものである。なお、降水晴天日における全天日射量は、晴天日とあまり差はみられず、日射不足による昇温抑制は確認できなかった。

また雨天日は、室内、屋外ともに気温上昇が緩やかで、日較差が最も小さい。これは、晴天日に比べ、日中における日射量が少なく、蒸発による冷却効果も小さいため、気温上昇が抑制されたものと考えられる。しかし、雨天日でも日射量が最大の時には、トタン室内とカワラ室内の気温差が最大になり、降水晴天日ほどではないが、室温に蒸発による冷却効果が大きく作用していると理解される。

以上のことから、モンスーン季における降水が室温へ影響を及ぼしていることが明らかになった。

(3) 晴天日における屋根、壁の表面温度

図 2.3.3 では、日の出以降、トタン屋根の表面温度がカワラ屋根よりも急激に上昇し、全天日射量の極大域で、両者の温度差は最大値 8.1℃に達した。この要因として、屋根面の受熱の違いが示唆された。また、トタン室内の気温は、カワラ室内よりやや高く推移し、日最高値が 2.5℃高く、屋根面温度の最高値より少し遅れて出現した。これらの結果から、両住宅の日中における屋根面温度の差が、室温の差として確認された。以上のことから、日中における室温形成に屋根素材の熱的性質が関与していることが検証された。

2.3.5 まとめ

本研究では、ネパール南部の亜熱帯地域における住宅の室内温熱環境の季節的な特徴を実証的に明らかにすることを目的として、屋根素材が異なる 3 住宅で 2 年間気象観測を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) モンスーン季では、降水や高湿度の影響により、他の季節よりも、夜間気温の低下、日較差が共に小さい。また、最も高温なトタン室内と最も低温なカワラ室内との気温差は日中に顕著であった。これは、熱容量の他に、保水による昇温抑制が強いカワラ屋根と保水不可能なトタン屋根との温度差を反映したものと考察された。
- (2) 非モンスーン季では、日の出以降気温の上昇が急激で、日較差が大きい傾向が見られ、特にトタン室内で顕著であった。夜間の気温は、コンクリート室内で最も高く、他の室内との差が大きい。これらの要因として、日中には屋根面の受熱、夜間には屋根面からの放熱の効果が認められた。
- (3) 日の出後 2 時間における室内の気温上昇量は、全ての月で大きい方から順にトタン室内、カワラ室内、コンクリート室内であり、各屋根素材の比熱や熱伝導率の値からみても妥当である。よって、室内気候の形成に、屋根素材の熱的性質が大きく影響しているものと判断した。また、モンスーンにおける気温上昇量は、非モンスーン季より小さく、降水や屋根面の保水の影響により、日中の昇温が抑制された結果であると確認された。

- (4) モンスーン季において、降水晴天日のカワラ室内では、気温上昇が晴天日に比べ小さく、日中においては最も低く推移した。また他の室内、屋外との気温差が大きく、特にトタン室内との差が顕著であった。この結果は、保水の有無による屋根素材の温度差を反映したとする(1)の考察を裏付けるものである。以上のことから、モンスーン季における降水が、室温へ影響を及ぼしていることが明らかになった。
- (5) 晴天日における観測の結果から、日中におけるトタン屋根とカワラ屋根の表面温度の差が明確に現れ、両住宅の室温差が生じる主な要因と判断された。よって、日中における室温形成に屋根素材の熱的性質が関与していることが検証された。

参考文献

- 石崎武志・高見雅三・古谷太慈・ジョン・グルネワルド 2005：川越市山車収蔵施設内の湿度変化の実測と解析. 保存科学, No.44, 73-81.
- 尾崎哲二・鈴木義則・羽田野袈裟義・吉越恆・吉村孝信・迫口輝美・野口隆・田中稔 1999：保水性セラミック建材の熱環境改善に関する一実験. 水工学論文集, No.43, 239-244.
- 川村隆一 2007：モンスーン循環の形成とその変動プロセス—大気海洋相互作用と大気陸面相互作用から謎を解く—。天気, Vol.54, No.3, 199-202.
- 木村建一 1970：『建築設備基礎理論演習』学献社. 420p.
- 倉本龍二・リジャル ホム バハドゥル 2014：ネパールの農村地域の伝統的住宅における春の温熱環境に関する研究. 2014年度日本建築学会大会(近畿) 学術梗概集, 519-520.
- 近藤純正 2000：地表面に近い大気の科学. 東京大学出版会, 336p.
- 坂上恭助・村川三郎 1999：ミャンマーの伝統的住宅の水使用と温熱環境に関する実態調査. 1999年度空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1133-1136.
- ジッタウィクル アタシット・石原 修 2003：雨季と乾季におけるタイ住居の室内温熱環境に関する調査研究(環境工学). 日本建築学会研究報告(九州支部) 環境系, No.42, 181-184.
- 中村圭三 2008：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査. 環境情報研究, No.16, 13-23.
- 中村圭三 1990：北海道上川地方の高温期における農業生産の予測. 筑波大学 気候学・気象学研究報告, No.15, 39-44.
- 中村圭三・松本太・濱田浩美・駒井武・大岡健三・谷地隆・松尾宏・谷口智雅・戸田真夏 2014：ネパール・テライ低地における気候環境調査. 法政地理, No.46, 17-24.
- 宮崎恵子・小野恭平・高口洋人 2010：カンボジアにおける既存住宅の住宅内エネルギー消費量および室内温熱環境実測調査. 2010年度日本建築学会学術講演梗概集(北陸), 415-416.
- リジャル ホム バハドゥル・吉田治典・梅宮典子 2002：ネパール各地の伝統的住宅における夏季の温熱環境. 日本建築学会計画系論文, No.15, 41-48.
- Pradhan, B., S. Shrestha, R. Shrestha, S. Pradhanang, B. Kayastha and P. Pradha, 2013：Assessing Climate Change and Heat Stress Responses in the Tarai Region of Nepal. Industrial Health 2013, No.51, 101-112.
- Rijal H.B., H. Yoshida and N. Umemiya, 2005：Passive cooling effects of traditional vernacular houses in the sub-tropical region of Nepal, Proceedings of the 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture (Beirut), 173-178.

3. ヒ素に関する水文学的研究

ネパール国内で地下水の高濃度ヒ素汚染が検出されているが、本研究では調査が未だ十分でないテライ低地のナワルパラシ郡パラシ付近の集落を対象にヒ素汚染の実態と季節変動に関する調査を行った。また、ここではヒ素濃度の季節変化と地質構造の解析から、ヒ素汚染のメカニズムおよび対象地域の空間分布を明らかにした。

3.1 地下水の動態と水質に関する研究

3.1.1 目的と概要

WHO による飲料水水質ガイドラインでは飲用水のヒ素濃度は 10 ppb 以下と定められている。しかし世界にはその基準を上回る飲料水しか入手できない地域が多く存在する。アメリカ大陸では、北米カリフォルニアの一部や南米アルゼンチン、チャコ・パンパ平原、チリのアントファガスタの河川流域でヒ素濃度の高い地下水が見られる。ヨーロッパではハンガリーからオーストリアにかかるハンガリー大平原でヒ素汚染が知られている。アジアでは新疆ウイグル自治区の一部やタクラマカン砂漠、インダス川下流域、ベトナム、レッドリバーで地下水汚染があるが、最も深刻なのはバングラデシュからインド・ネパールにかけてのガンジス川流域である。これらの地域では井戸の掘削技術の進歩がヒ素を多く含む比較的深部の地下水利用を容易にさせたことで、逆にヒ素濃度の高い地下水利用を促進させる結果を招いている。

3.1.2 調査地域の概要

(1) 地形

図 3.1.1 にはネパールの標高分布を示した。ネパールで標高が最も低いテライ付近の 90m からエベレスト山頂 8,848m まで標高差は約 8,750m に達する。標高は北部が高く、南部のインド国境に向かい低くなり、ほぼ等しい標高が東西に帯状となって分布する構造を示す。首都カトマンズは標高約 1,400m の盆地に位置する。

本研究対象地域はネパール圏内で最も低いテライ低地に位置する。研究対象地域の南端はインド国境まで 2km 付近に位置する。研究対象地域の北には標高 800~1,100m のシワリク丘陵があり、その丘陵を源とする 4~5 河川が研究地域を流下している。研究地域は南北約 10km であり、標高 105m から 113m のわずか 8m 程度の標高差の平地に位置している。地形の傾斜はわずか 0.8m/km 程度である。このため、河川勾配も緩やかであると同時に地下水の動水勾配もほぼフラットで、地下水流動速度は極めて遅いと考えられる。

(2) 地質

ネパールはインド亜大陸がユーラシアプレートに衝突したことによって形成された地域である。かつてはテチス海があったところを約 5,000 万年前から衝突が始まり、ユーラシアプレートとインド亜大陸が押し合い、ヒマラヤ山脈が誕生した。図 3.1.2 に示すように、ネパールの地質は大きく 4 つに分類され、北からテチス堆積物、変成岩帯、レッサーヒマラヤ堆積物、シワリク堆積物がおよそ東西方向に分布している。テチス堆積物はユーラシアプレートとインド亜大陸の間にあったテチス海が干上がり、隆起した堆積物であり、エベレストの山頂にまで達している。本研究対象地域の表層部分は約 1 万年前以降の沖積平野堆積物で構成されており、シワリク堆積物の 2 次風化堆積物の粘土やシルトなどの細粒

の土粒子を主体に構成される。この堆積物の多くは粘土やシルトなどの細粒の土粒子によって構成され、調査対象地域の周辺では数 cm 程度の円礫を一部に含むことがある。また、シワリク山麓近くや南東付近など、場所によっては砂層が卓越している箇所も存在する。

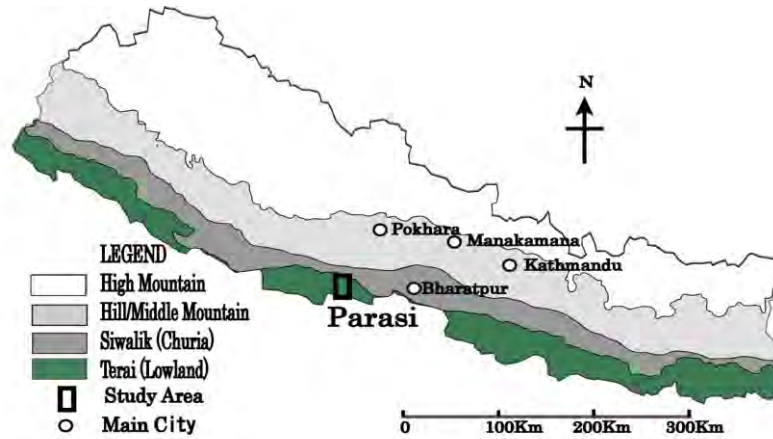


図 3.1.1 ネパールの標高分布

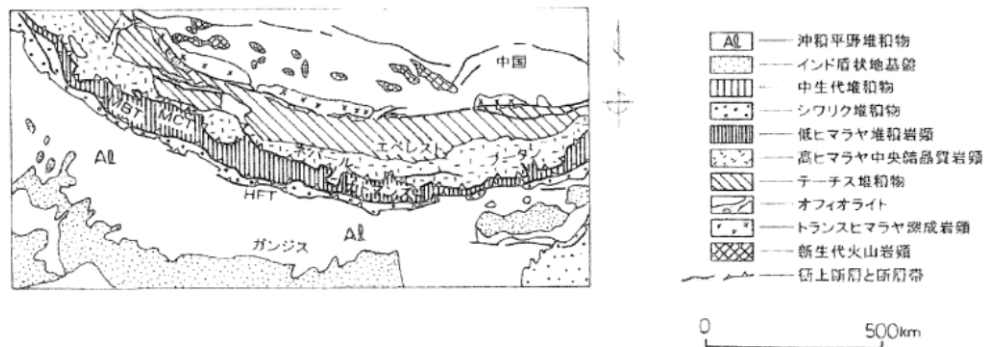


図 3.1.2 ネパールの地質分布

3.1.3 調査方法

本研究ではネパールのインド国境に近いテライ低地ナワルパラシ郡パラシの東西約 6km、南北約 10km の地域を調査対象とし、地域内に散在する全ての集落で各 2 箇所以上の井戸で観測を行った。また、調査は、乾季である 2012 年 3 月 2 日から 6 日の 5 日間と雨季である 2012 年 8 月 16 日から 27 日の 11 日間実施し、各井戸では水温、pH、EC、ORP、DO、簡易 As 採水のほか、測定できる井戸では地下水位、井戸深度を測定した。また、採水した水試料は、アルカリ度を現地で測定し、その他の項目は日本に持ち帰り、イオンクロマトグラフおよび ICPM-8500 で分析した。

3.1.4 調査結果

中村ら(2008a)、中村ら(2008b)、中村ら(2010)は本研究調査地域で高濃度のヒ素汚染があることを報告した。本研究では、詳細な現地調査により、以下のデータおよび科学的知見が得られた。

(1) 井戸形式、深度

今回の調査で測定できた井戸は、25集落(ワード)の中の54本であり、うち浅井戸の開放井戸は14本であった。この地域の井戸は伝統的な開放井戸と40年ほど前から普及してきた打ち込み井戸(管井戸)に分類される。開放井戸の掘削深度は10m未満で、今回の調査における地下水面までの深さは2~7m、湛水深は0.4~4.35mであった。この時期は乾季であるため、湛水深が小さい。打ち込み井戸の深度は実測できないが、聞き取り調査の結果、5.4~52.5mと多様である。

(2) ヒ素濃度分布(雨季と乾季)

現地では採水した水を持ち帰り、日本で測定した最高ヒ素濃度は、2012年3月の調査では図3.1.3に示すようにKhokharpurwa(No.4)における1,048ppbである。なお、当該井戸は住民がすぐに埋め戻して廃止した。この集落では他の井戸でも500ppb以上の値が得られており、この地域が高濃度ヒ素地帯であることを示している。また、少し距離をおいたKunawar(No.12)では577ppb、Mahuwa-2(No.17)では513ppb、Kachanhawa(No.11)では312ppbの井戸があるほか、Goini(No.26)、Suryapura(No.5)、Patkhauli(No.13)の集落でも比較的高濃度の200ppb前後の値を示す井戸が存在していた。2012年8月の調査で得られたヒ素濃度分布は図3.1.4に示した。最も高いヒ素濃度が得られた集落はKunawar(No.12)における529ppbである。また、少し距離をおいたMahuwa(No.8)では391ppb、Kachanhawa(No.11)では318ppb、Khokharpurwa(No.4)、Suryapura(No.5)、Goini(No.26)の集落でも比較的高濃度の200ppbを超える値を示す井戸が存在していた。Patkhauli(No.13)では194ppb、Atharahati(No.2)では181ppbの値を示しこの地域ではほぼ東西にヒ素濃度の高い地下水が存在していると考えられる。

図3.1.5には井戸深度と乾季・雨季のAs濃度の関係を示した。乾季と雨季ではほぼ一定のAs濃度であった。また、この地域の帯水層は5m~6m付近の浅層地下水、12~24m付近の第2帯水層、30~50m付近の第3帯水層に分類できることがわかった。この中で浅層地下水の第1帯水層のヒ素濃度は10~100ppbと相対的に低い。また、第3帯水層は0~10ppbと極めて低い濃度であった。一方、第2帯水層では10~1000ppbの濃度を示しこの地域の汚染された地下水は基本的には第2帯水層に限定されていることを示した。

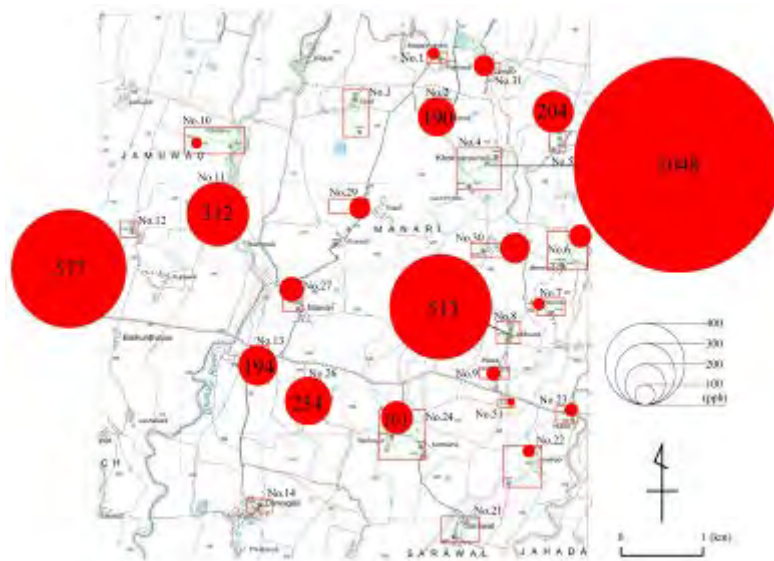


図 3.1.3 2012年3月におけるヒ素濃度分布(乾季)

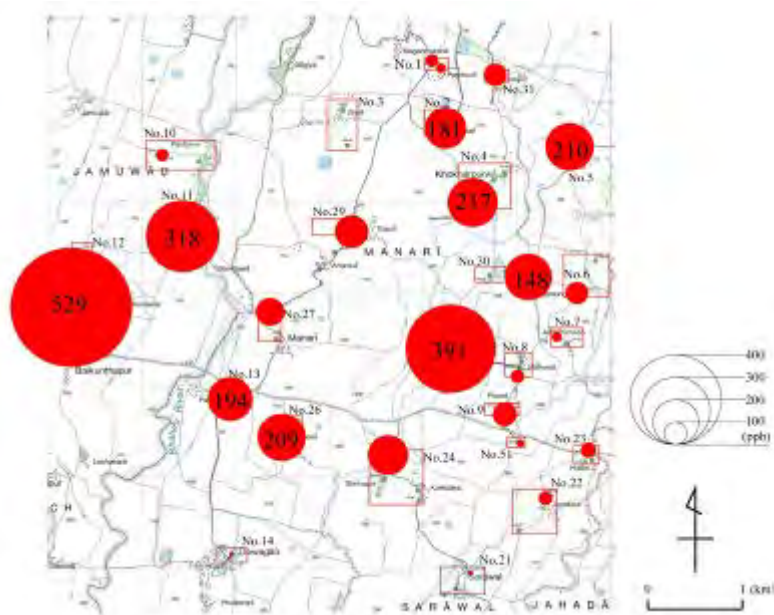
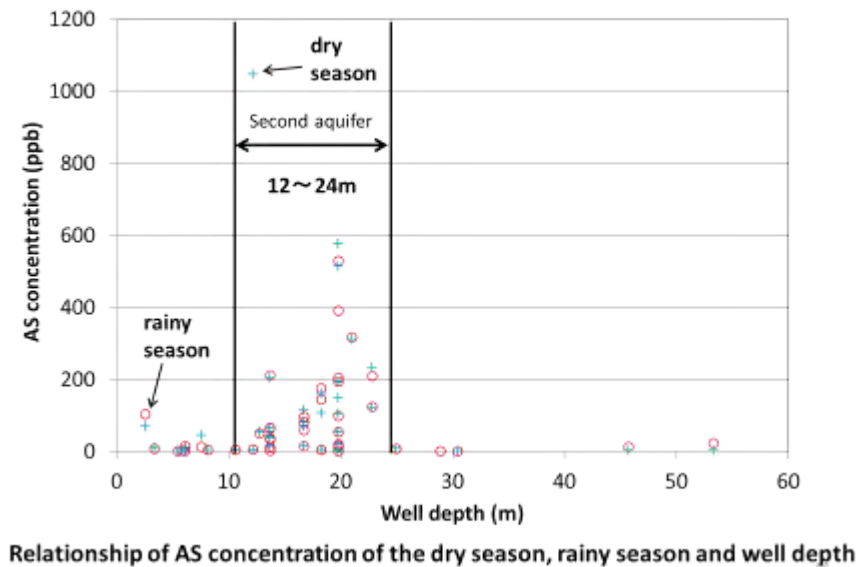


図 3.1.4 2012 年 8 月におけるヒ素濃度分布 (雨季)



Relationship of AS concentration of the dry season, rainy season and well depth

図 3.1.5 井戸深度と乾季・雨季の As 濃度の関係

(3) 溶存酸素量 (DO), 酸化還元電位 (ORP), 電気伝導度(EC)の分布

対象地域の DO 飽和度は 13~82%の範囲を示し、平均では 32%で極めて嫌気的な状態であった。同時に測定した酸化還元電位は-192~280mV の範囲で、平均で-15mV を示した。最も DO の低い井戸は Sarawal (No.7) で浅井戸の開放井戸であり、ORP も-119mV を示した。酸化還元電位の値が低い井戸は、比較的浅い井戸が多いが、酸化還元電位が低い場合でも、DO も低いとは限らない。このように還元状態の帯水層が広範囲に分布していることは、この地域の比較的浅い地質が極めて還元性の高い状態であることを示した。

電気伝導度(EC)は500~1,920 μ S/cmの比較的高い値が観測された。ECの大きな値の井戸はほとんどが開放井戸で、この地域の浅層地下水の汚染を示唆した。汚染の原因はほとんどの家で牛を飼育していることから、その糞尿が雨水とともに浸透していることも一因として推定される。第3帯水層の井戸ではECは500~800 μ S/cmの値を示しているが、牛の糞尿等によるECへの影響は厚い難透水性の地層を途中に介在していることより、その影響はほとんどないと考えられる。

(4) 水質組成

図3.1.6には調査対象地域における乾季の水質組成を示した。調査対象地域では、中央部付近でヘキサダイヤモンドが比較的大きいことがわかる。南部の地域では、ダイヤモンドは小さく、溶存物質が少ないことを示している。これらのデータからは、調査対象地域の中央部の地下水は比較的滞留時間が長いことを示した。一方、南部の地域では、ローカルな涵養域が想定され、水質構成成分が希薄であることを示した。

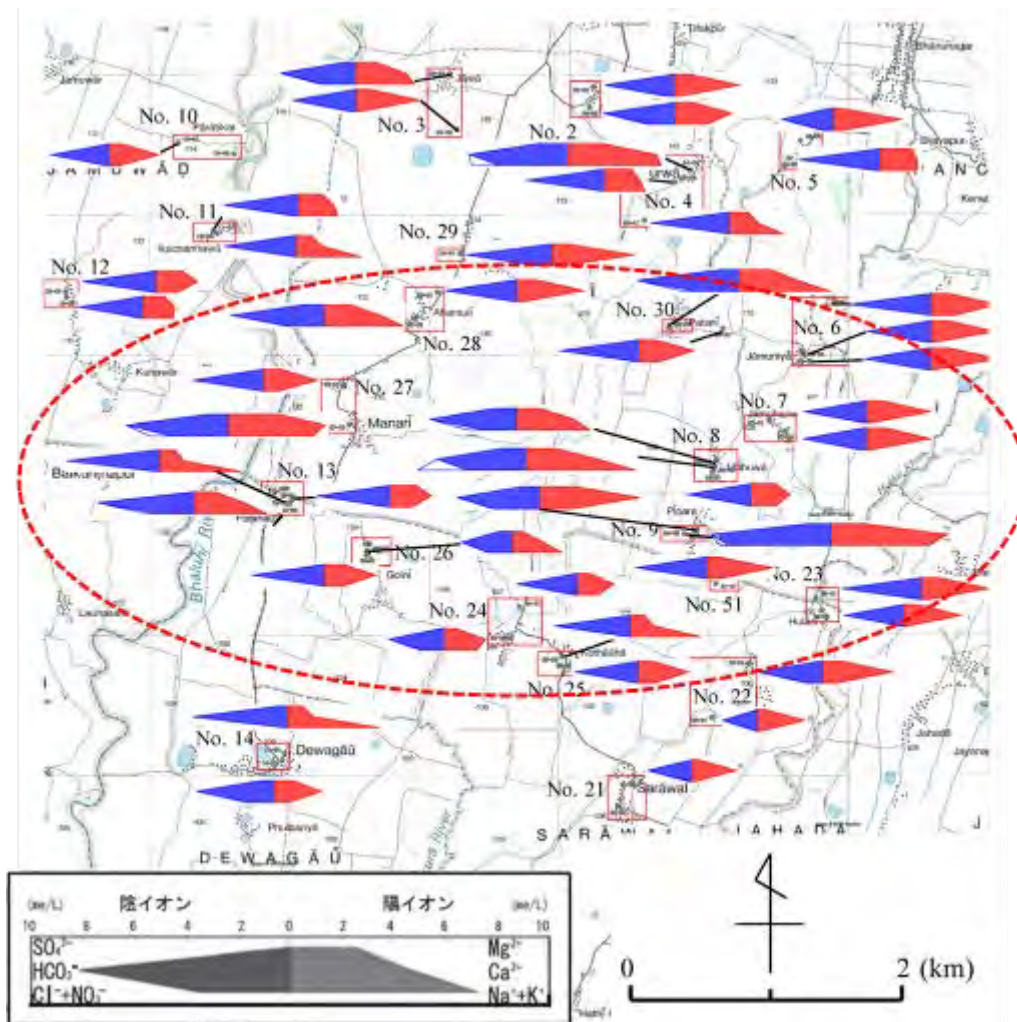


図 3.1.6 調査対象地域における乾季の水質組成

3.1.5 地下水質に関する考察

(1) 乾季と雨季のヒ素濃度の関係

図 3.1.7 には乾季と雨季の As の関係を示した。乾季のヒ素濃度は雨季のヒ素濃度と比較して高い値を示す。X に乾季のヒ素濃度， Y に雨季のヒ素濃度とした場合の回帰式は $Y=0.88 X+8.67$ となり，相関係数は 0.95 と極めて高い値を示した。一般に乾季にはヒ素濃度が高くなることが知られており，両者の測定期間でたまたま同程度の濃度を示したことが考えられる。このことから，雨季と乾季ではヒ素濃度に大きな差異はみられなかったが，雨季には調査対象地域の地下水は降水により希釈され，ヒ素濃度がわずかに低くなることが示唆された。この地域の地形は平坦で地下水流動の方向性は決定しにくい，ほぼ，北から南方向へわずかに傾斜していることを考えると，北の Khokharpurwa から Patani, Mahuwa の南方向へヒ素を高濃度に含む地下水の局所的流動があることを示している。

粘土層は厚いが，その分布はそれほど連続的ではないと考えられ，また地形的な傾斜も小さいことから，周辺の帯水層はシワリク丘陵から連続する被圧帯水層ではなく，断続的な帯水層にローカルな降水が浸透して飽和帯を形成していると考えられる。

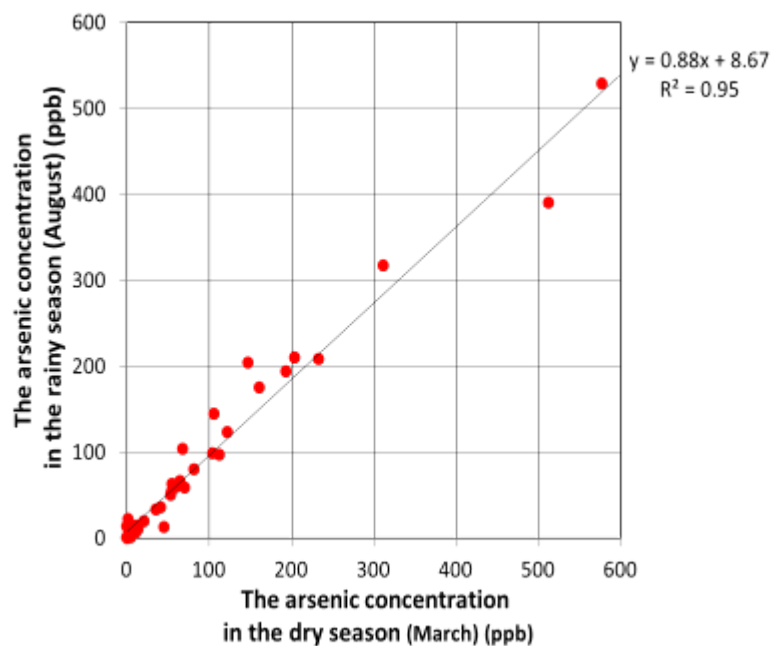


図 3.1.7 乾季と雨季の As の関係

(2) ヒ素の溶出条件

ヒ素は自然界でも広く偏在していることが知られているが，地下水へのヒ素汚染の原因は人為的な要因によるものと自然起因によるものが考えられる。ネパール国内では人為的な鉱山などによるヒ素汚染は無く，またヒ素化合物を原料とする工場等もない。ネパール国内には火山性のヒ素溶出も考えられない。これらのことから，ネパール南部の低地はインドのガンジス川に続くヒマラヤ山脈起源の沖積平野であり，テライ低地を中心に広範囲にヒ素汚染が広がっていることから，ネパールにおけるヒ素汚染はこれらの堆積物起源で

あると考えられる。自然起因によるヒ素は、地下水の酸化還元状態の変化により、ヒ素を含有している地層中の鉄鉱物（硫化物や水酸化物）から地下水中へ溶出してくると考えられる(田辺ら, 2001)。

鉄の多くは2価で存在し、かつヒ素濃度の高い地下水で、 Fe^{2+} の濃度が高いことを示しており、還元状態からのヒ素の溶出を説明することができる。ORPはほとんど負の値で、地下水は還元状態にある。調査対象地域は地下水流動が極めて遅いと考えられることから、多くの溶存イオンが還元状態で滞留していると考えられる。

(3)ヒ素の還元メカニズム

ヒ素濃度の低いところでは As^{5+} の割合が高く、ヒ素濃度の高いところではほとんど As^{3+} の状態に存在していると考えられる(田辺ら, 2001)。一般にヒ素は5価の状態に酸化水酸化鉄や水酸化マグネシウムなどに取り込まれているといわれている。還元状態になると As^{5+} を補足している酸化水酸化鉄の Fe^{3+} が Fe^{2+} に還元され、その結果 As^{5+} が地下水に遊離し、やがて還元されて As^{3+} に変化すると考えられる(田辺ら, 2001)。

これらの調査結果から、本研究対象地域では上記と同様なヒ素還元メカニズムが発生していると考えられる。特に、第2帯水層ではその傾向が顕著であった。調査地域の中央付近にヒ素の高濃度井戸が多くあり、雨季よりも乾季の方が10-12%程度濃度は高くなる。前述の通り、最高濃度の井戸では1,048ppbが観測され、多くの井戸で500ppbを超える値が得られた。また、調査地域の地下水流動は極めて小さい可能性が示唆された。

3.2 地下水ヒ素濃度の分布に関する研究

3.2.1 調査方法

本研究ではネパールのインド国境に近いテライ低地ナワルパラシ郡パラシの東西約 6km, 南北約 10km の地域 (図 3.2.1) を調査対象とし, 地域内に散在する全ての集落で各 2 箇所以上の井戸で観測を行った。また, 調査は 2012 年 3 月から 2014 年 8 月までの 5 回にわたり実施し, 各井戸では水温, pH, EC, ORP, DO, 簡易 As 採水のほか, 測定できる井戸では地下水位, 井戸深度を測定した。また, 採水した水試料は, アルカリ度を現地で測定し, その他の項目は日本に持ち帰り, イオンクロマトグラフおよび ICPM-8500 で分析した。

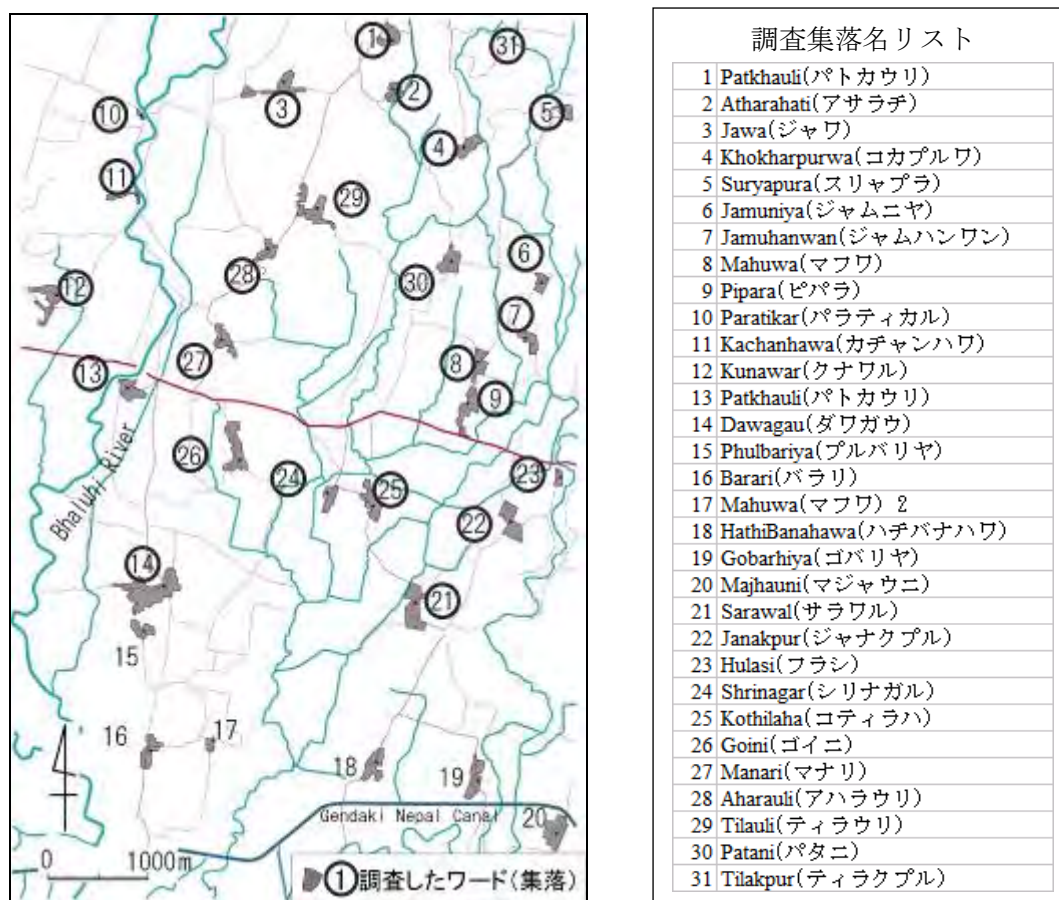


図 3.2.1 地下水の採取および観測地点, 集落リスト

3.2.2 水平的分布

調査地域で観測された地下水中のヒ素の水平分布を図 3.2.2 に示す。最も高いヒ素濃度が得られた集落は Kunawar(No.12)における 528ppb である。また, 少し距離をおいた Mahuwa (No.8)では 319ppb, Kachanhawa (No.11)では 317ppb, Khokharpurwa (No.4), Suryapura (No.5), Goini (No.26)の集落でも比較的高濃度の 200ppb を超える値を示す井戸が存在していた。Patkhauri(No.13)では 193ppb, Atharahati (No.2)では 181ppb の値を示しこの地域ではほぼ東西にヒ素濃度の高い地下水が存在していると考えられる。また, 調査地域の北側の扇状地上流側ではヒ素の汚染はほとんど観測されなかった。さらに, 国道の南側 (No.21 より南) の地域でも同様に高濃度のヒ素は観測されていない。図 3.2.3 は測定ポイントと

ヒ素濃度の関係を示したものである。特定の地域において高いヒ素が観測される状況ではなく、なかり広範にわたり高濃度のヒ素が観測されることがわかる。これらのことから、ナワルパラシのほぼ全体の地域で 200~500ppm のヒ素汚染地帯が確認され、その汚染の水平分布は後述の垂直分布とも深く関連してきわめて複雑であることが判明した。

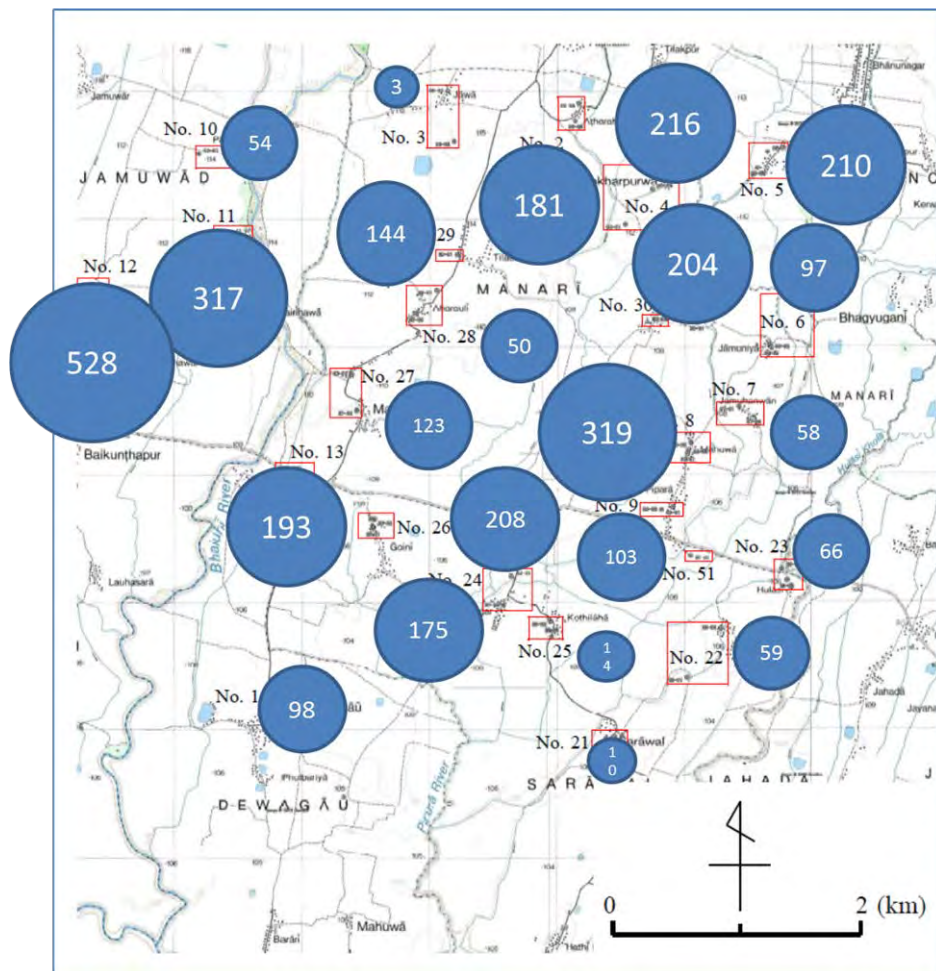


図 3.2.2 地下水中のヒ素濃度の水平分布

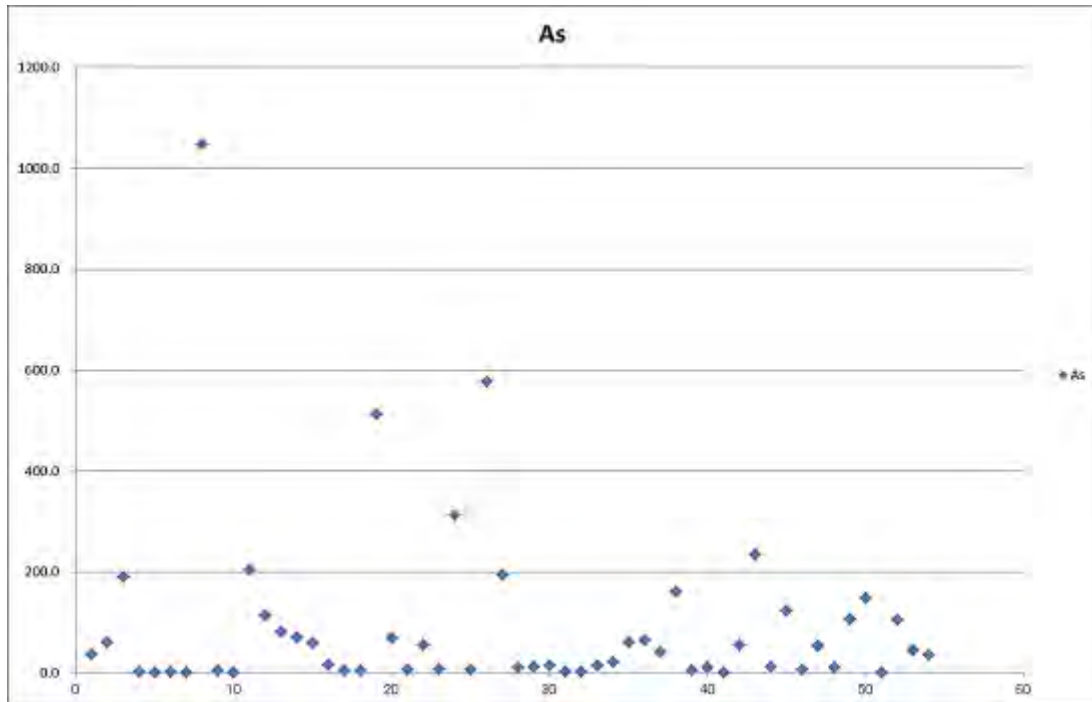


図 3.2.3 地下水中のヒ素濃度と測定ポイント

3.2.3 鉛直的分布

井戸の深度とヒ素の濃度の関係を図 3.2.4 に示す。この関係から、高濃度のヒ素は深さ 10m および 15～22m の井戸に集中していることがわかる。現地で作井する管井戸の多くは 15～20m の深さにスクリーンがあり、特に 12～24m の井戸の多くがヒ素で汚染されていることが判明した。

図 3.2.5 は地下水の酸化還元電位（ORP）と井戸深度の関係を示したものである。井戸の深さが 20m 付近で ORP の測定値が最小となり、この帯水層ではきわめて還元性が強い環境条件となっている。前述のように、堆積物中のヒ素が還元環境の下で地下水に溶出する傾向が大きいため、このような関係を示すものと考えられる。

3.2.3 現地の連続観測データ

住民である現地スタッフに依頼して、2012 年から 2015 年まで地下水の連続観測を実施した。図 3.2.6 と図 3.2.7 は、それぞれ地下水中のヒ素濃度および地下水位などの各種パラメータの変動を示したものである。この地域の地下水の水位および流動は雨季と乾季、さらには年度によっても大きく変化することがわかり、水文環境の変動を理解する上で重要な観測データとなっている。また、ヒ素濃度も季節や年度によって大きく変動している。

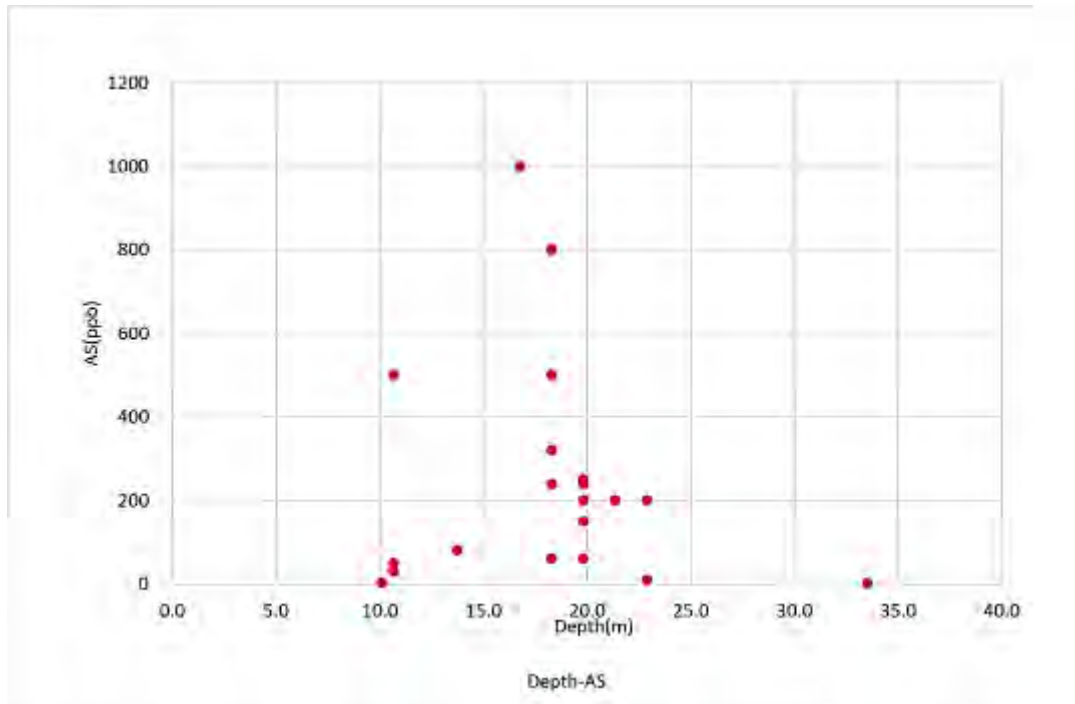


図 3.2.4 地下水のヒ素濃度と井戸深度の関係

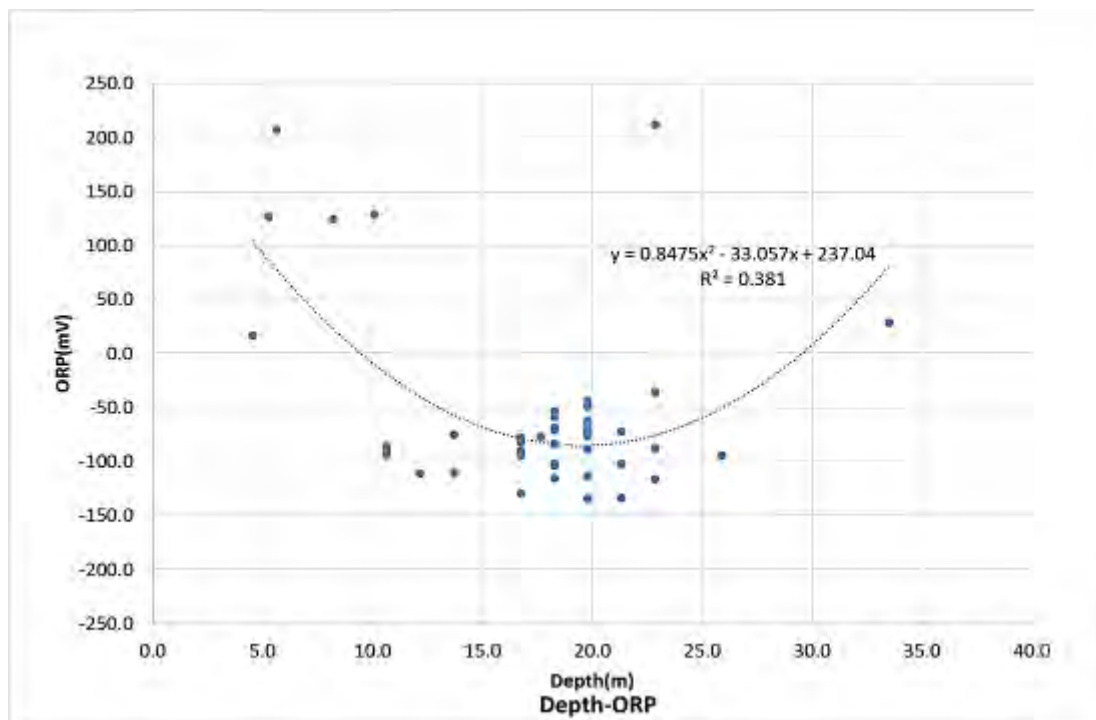


図 3.2.5 地下水の酸化還元電位（ORP）と井戸深度の関係

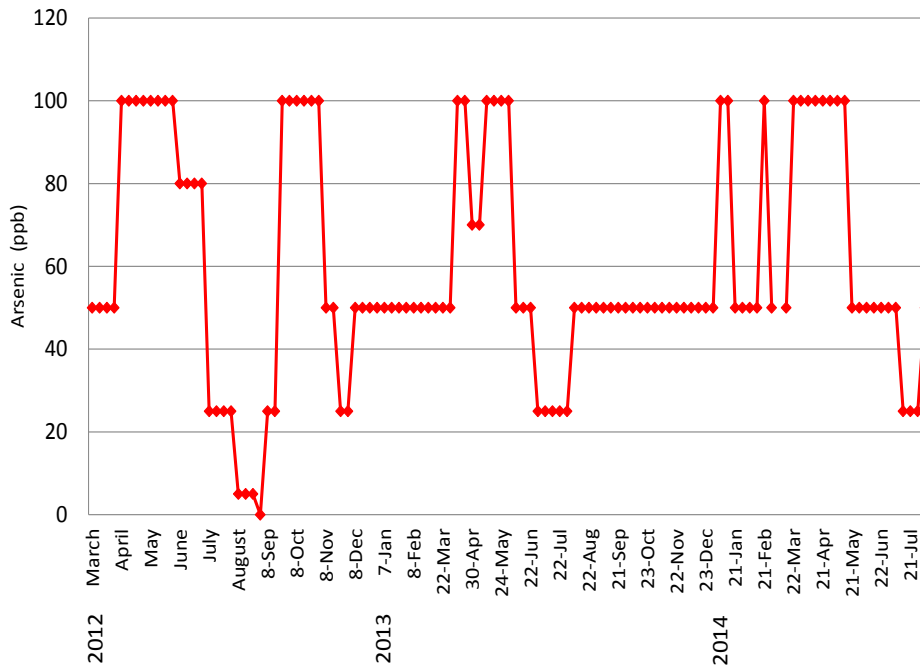


図 3.2.6 地下水中のヒ素濃度の変動（現地スタッフ連続測定）

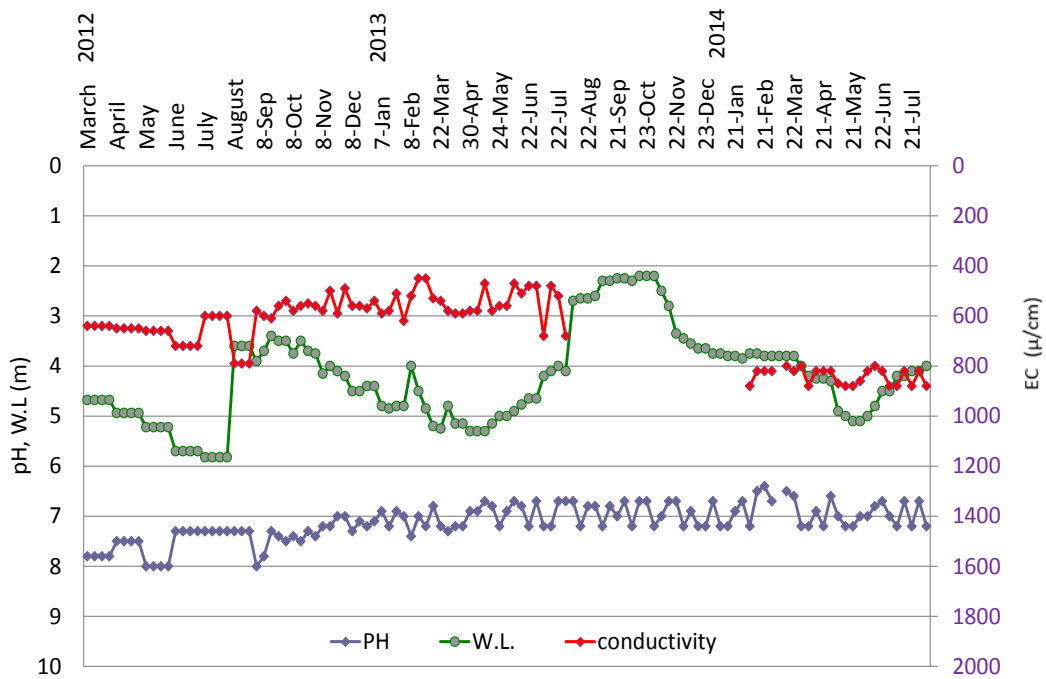


図 3.2.7 地下水の pH, EC, 水位の変動（現地スタッフ連続測定）

3.3 水収支に関する研究

3.3.1 水収支の基礎データ

調査地域の水収支を検討するための基礎データを得ることを目的として、ピパラのバルプリ小学校校庭の北西部に気象ステーション (Onset 社製 H21-02) を設置し、気圧、全天日射量、風向、風速、気温、相対湿度等を 15 分間隔で観測した (写真 2.1.1)。また、蒸発量については、この地点から北に約 2km のパタニにおいて (図 2.2.1)、地上 1m 高度に設置した自作の蒸発計 (直径 20cm) により、現地スタッフが毎日 8 時に観測した (写真 2.2.1)。これらの観測結果については、「2.1 テライ低地の気候環境」、「2.2 テライ低地における全天日射量と蒸発量」で報告した。

調査地域における 2013 年の降水量・蒸発量・気温の月別値を、表 3.3.1 に示す。この表によると、6 月から 9 月にかけてのモンスーン季の降水量は 1173mm で、年降水量 1451mm の 80.8% を占めている。一方蒸発量は、3 月から 5 月にかけてのプレモンスーン季に、非常に高い値を示している。また、5 月から 9 月までの月平均気温は、30℃ 近くの高い値を示す。

表 3.3.1 2013 年の降水量と蒸発量の年変化

Month	Precipitation Total(mm)	Evaporation Total (mm)	Air Temperature Average (°C)
January	14.0	36.5	11.6
February	33.0	58.5	16.9
March	0.5	170.3	22.2
April	84.5	200.2	26.9
May	146.0	159.6	29.3
June	387.0	82.2	29.5
July	337.0	62.1	29.7
Aug	239.0	40.4	29.1
Sep	210.0	91.8	28.4
Oct	0.0	70.6	24.9
Nov	0.0	86.5	19.3
Dec	0.0	56.3	15.2
Total/Average	1451.0	1115.0	23.6

3.3.2 水収支に関する考察

前節の観測データおよび表 3.3.1 から、次の通り 2013 年の水収支を推計した。最大可能蒸発散量については、ソーンズウェイト (Thornthwaite, 1948) の方法による計算の結果、1365.8mm の値を得た。

上述のように、降水は雨季に集中し、10 月から 3 月までの乾季には、極端に少なくなる。自然地形の地域においては、水面蒸発を基準とした E_0 と水収支から得られた蒸発散量 (E_T) との比較から、その比 (fp) が示される (新井, 2004)。

$$E_T = fpE_0$$

f_p は、0.6~0.7 とする 경우가多い。日本で記録的な猛暑であった1994年に、宮城県の水田では0.74であった(近藤, 1998)。当調査地域は、さらに暑い亜熱帯であるため、 f_p に0.8を適用し、実蒸発散量1092.6mmを得た。この値は、現地で観測した蒸発量1115mmにも近似し、妥当な値であると判断された。

雨季には、降水量、蒸発量、気温との関わりで、地下水涵養条件が変化することが示唆される。また、調査地域の表層が厚いシルト・粘度で覆われているため表面流出が多く、地下浸透はほとんどないものと考えられる。さらに、帯水層構造が細砂主体で動水勾配も小さいことから、大量の揚水がない限り地下水は非常に遅い流動形態を示すものと想定される。従って、調査地域において、地下水は長期間滞留していることが予想される。

これらの要因を考慮して推計した、調査地域内における水収支を、図3.3.1に示す。

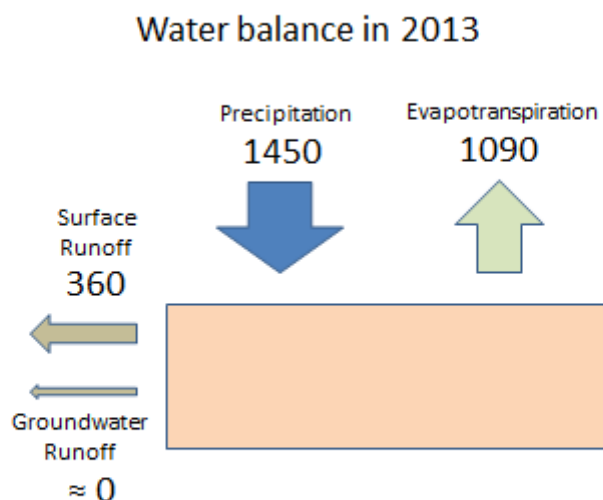


図 3.3.1 2013 年の水収支の推計

15

調査地域では乾季、特にプレモンスーン季において蒸発量が大きく、気温との関係で蒸発散量を推定できることがわかった。現地において気象観測を行うことにより、地表における水の蒸発や涵養などの状況を、定性的に把握することができた。

参考文献

- 新井正 2004：熱・水収支水文学。古今書院，309p
 近 藤純正 1998：蒸発散量と降水量の気候学的研究。天気，Vol.45 (4)， 269-277。
 田辺公子・矢野靖典・康木峰也・漬部和宏・藪内一宏・横田漠・康中博見・徳永裕司・ハミドールラーマン・フェローゼアーメッド 2001：バングラデシュにおける地下水のヒ素汚染についてーサムタ村におけるヒ素濃度特性と溶出メカニズムに関する考察。水環境学会誌， 24-6， 367-375。
 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008a：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査。環境情報研究。 No.16. 13-23.

- 中村圭三・大岡健三・Bhanu Bhakta Kandel 2008b: ネパールのテライ低地の井戸水利用に関する実態調査, 環境情報研究, No.16, 25-33.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2010: ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査とその対策. 環境情報研究, No.17, 1-13.
- 吉川宏一・大野博之・稲垣秀輝・平田夏実 2003: オムニスケープジオロジーーネパールと四国の比較一, 応用地質, 41 (1), 14-24.
- 濱田浩美・中村圭三・駒井武・大岡健三・谷口智雅・松本太・戸田真夏・松尾宏・ギミルハリパラサド 2014, 千葉大学教育学部研究紀要, No.62, 385-392.
- Thorntwait, C.W., 1948 : An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, Vol.38, 55-94.

4. ヒ素に関する地形・地質学的研究

4.1 地形形成・地形分類に関する研究

4.1.1 ネパールの地形概要と調査地域

(1) 地形概要

世界の屋根といわれるチベット高原の南端には東西約 2400km のヒマラヤ山脈がそびえ、8000m を超える高峰で世界のトップ 10 のうち 8 座はネパールに位置している。調査地域の上流に位置するカリガンダキ川流域の北部上流域など中国に隣接する内陸山岳部では、雨季でもほとんど雨が降らず、砂漠に近い乾燥地域であり表層の風化が激しい。

ネパール北側は急峻な山脈が多く平地は少なくかなり狭い。北から南に向かって最高 8,000m レベルから約 100m 以下まで標高が低くなり急激な地形の変化を示す。ヒマラヤ高峰群のある氷雪帯およびツンドラから温帯を経てインド国境に接するテライ低地の亜熱帯まで気候は急変し、南北 150~200km 程度の短い距離で地形や土地利用も大きく変化する。

両極端な地形や気候を示す南北地域の間中部は人口が比較的多く、首都カトマンズや観光地のポカラやタンセンなどの高原都市も存在する。この中間部は丘陵地帯や盆地、低山地帯で占められる。森林が主体であるが、森林を切り開いた緩斜面には段々畑が広がり放牧も一部みられる。谷など川沿いの比較的低い場所では狭いながら稲作も行われ小規模な山村集落が散在する。このエリアは温暖な気候で、南側にはマハバラート山地やシワリク(チュリア)丘陵が東西に発達している。

(2) 河川概要

ネパールは、図 4.1.1 および図 4.1.2 に示すように、南からテライ低地、中間部、高ヒマラヤ地帯を示す。ヒマラヤ山脈からインドのガンジス平原に南下するカリガンダキ川はシワリク丘陵の隆起により部分的にほぼ東方向に流れる。カリガンダキ川はナラヤニ川に合流し、インドでガンジス川に合流する。調査地域はネパール中央部の河川流域が 1 か所に収斂してガンジス平原に流出する地域に位置する。調査地域は北西約 40km のブトワル Butwal を流れる河川扇状地と南東のナラヤニ川の間中部に位置する低地であり、図 4.1.3 に示したパラシ Parasi の東にある。ブトワル扇状地全域では井戸水から基準値を超えるヒ素汚染は確認されていない。図 4.1.3 に示すように調査地域を流れる小河川は、シワリク丘陵の南側斜面を水源とするが河川流域は長さ僅か 20km 程度で乾季には涸川になることもある。シワリク丘陵の北側斜面を含め表流水からは基準値を超えるヒ素汚染は検出されていない。

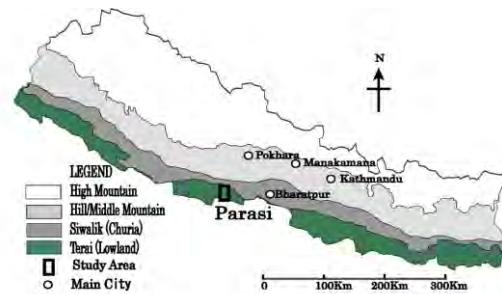


図 4.1.1 ネパールの地形・標高区分
南からテライ低地、中間部、ヒマラヤ山岳地帯



図 4.1.2 主な河川流路
ネパール中央流域はヤラヤニ川に収斂
出典 CIA Map, The World Factbook

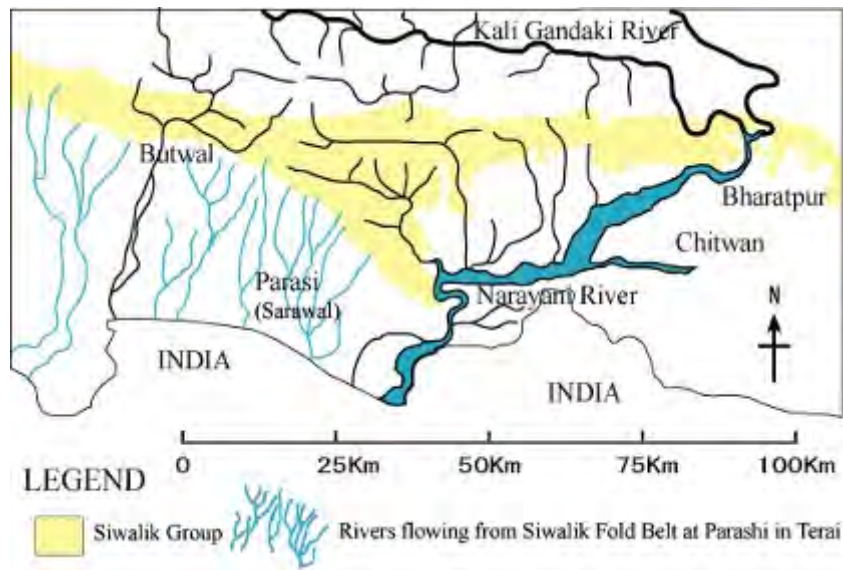
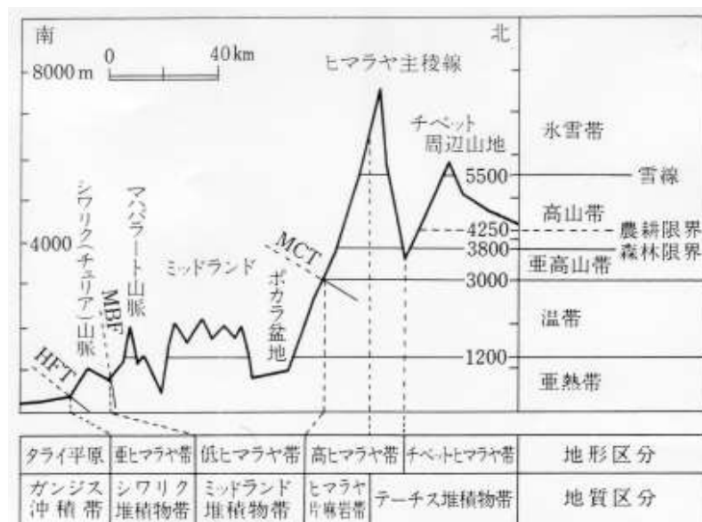


図 4.1.3 調査地域周辺の河川水系 (中村・大岡・駒井 2007)

4.1.2 地形分類

ネパールの地形区分は断面で眺めると、インド国境のある南から、テライ低地 (タライ, ガンジス平原の一部), 亜ヒマラヤ (シワリク丘陵), 低ヒマラヤ (ミッドランド), 高ヒマラヤ等に大別される (図 4.1.4)。この図の左端に示される通り、ネパール南端には、標高 100m 前後のテライ低地 (タライ) があり稲作を主とした農業地帯となっている。テライの北側には衝上断層で標高 800~1,100m 程のピークを持つシワリク丘陵が屏風のようにそびえ (写真 4.1.1), シワリクは HFT ヒマラヤ前縁衝上断層と MBF 主境界断層に挟まれている。MCT 中央衝上断層に至る中央部にはマハバラート山地と低ヒマラヤ高地がある。そして図の右側、ネパール北側では標高 5,500m の雪線より高い地域が高ヒマラヤの冰雪帯になる。



HFT: ヒマラヤ前縁衝上断層 MBF: 主境界断層 MCT: 中央衝上断層

図 4.1.4 ヒマラヤ山脈の地形区分と地質区分 (在田一則 1988)



写真 4.1.1 シワリク丘陵（チュリア）が屏風のようにテライ低地から隆起

4.2 研究地域及び上流域における地質環境

4.2.1 カリガンダキ川～ナラヤニ川流域

調査地域南東部を流れる大河川ナラヤニ川の上流部分カリガンダキ川の流域地形を北から南に向かって順に述べる。

(1) 聖地ムクティナート～ジョムソン・マルファ村

ポカラから北西約 80 kmに位置するジョムソン空港 (2,700m) を上空から見ると数段の河成段丘がカリガンダキ川に沿って確認できる (写真 4.2.1)。河川沿いに侵食された地形が確認でき両側の山々は乾燥気候のため樹木がまばらで灌漑農地を除き植生はほとんどない。



写真 4.2.1 ジョムソン空港上空からカリガンダキ川を撮影

河原には砂レキが堆積しており河床に砂泥はほとんど見られない。河原ではノジュールとみられる黒色の丸い石の中からアンモナイトの化石が発見されている。この地域の地層には海生生物の化石を大量に含むことから海成シルトなどの堆積物の存在が確認できる。ジョムソンから聖地ムクティナートに至る崖にはテチス海成堆積岩の褶曲したダイナミックな地質構造が観察できる (写真 4.2.2)。

カリガンダキの河川名は黒い濁った川という意味を持ち、上流でも



写真 4.2.2 カリガンダキ川上流(テチス海成堆積岩)

常に薄黒く濁っている。濁りの原因は流域にある大量の岩石が風化してできた砕屑物や氷河湖など堰止湖跡の湖成堆積物などの影響によるものと推定される。

流域のムクティナートからマルファ、タトパニに至る地域は乾燥気候のため山の斜面の植生は貧弱で両岸の風化が激しい。そのため斜面崩壊があり大規模な地すべりや崩壊跡も各地で観察できる。一方、河岸には淘汰のよいグラニューールから中粒サイズの石英砂（白砂）の小規模な堆積が散見される。

4.2.2 カリガンダキ川中流域

カリガンダキ川は中国国境付近の乾燥地帯の源流からミッドランドを南に流れ、マハバラート山地からシワリク丘陵に接する手前で東に流れを大きく変えて約 100km 直進する。これはシワリク丘陵の隆起速度がカリガンダキ川の侵食力より大きかったので衝上断層に沿って東に流れを変えた結果である。写真 4.2.3 が示す通りチュリア丘陵では山脈の岩石を V 字に侵食している。カリガンダキ川の河岸に沿った平坦部には、淘汰のよい石英の中粒砂（白砂）の堆積がところどころにみられる（写真 4.2.3）。



写真 4.2.3 カリガンダキ橋の白砂（ナラヤニ川支流）

4.2.3 カリガンダキ川下流域

カリガンダキ川は合流してインド国境までナラヤニ川となる。複数の支流が合流して川幅は場所によって 4km を超える大河川になり雨季の流量は非常に多くなる（写真 4.2.4-5）。



写真 4.2.4 ナラヤンガード付近を流れるナラヤニ川



写真 4.2.5 インド国境近くを流れる川幅 5km ほどのナラヤニ川

4.2.4 テライ平野

ネパール南部で東西に広がる低地はテライと呼ばれる穀倉地帯である。テライは国土面積の約 20% 近くを占める未開のジャングルであったが 1950 年代にマラリアがほぼ撲滅されたことから開発が進み人口が急増している。現在、テライは森林が伐採されシワリク山麓付近を除きほとんどが農地になっている。ネパールの最低標高点もこのテライ低地にありその標高は海拔 70m 前後といわれる。

テライは基本的に河川の洪水によって発達した低地であり後背湿地や自然堤防で構成され、一部には河岸段丘の面影もみられる。乾季には河川水位が低くなり小河川は涸川になることもある。そのため農業用のため池が各地に散在する。亜熱帯の恵まれた気候で肥沃な土地が広がる一方で、雨季の定期的な大雨や乾季の干ばつ、そして壊滅的な洪水も過去に何度も発生している。テライ低地のほぼ中央に位置する標高 105m~115m 前後の低地が本研究の調査地域である。

(1) テライからシワリク丘陵に至る断面図

シワリク丘陵からテライにかけて急激に地形が変化する。調査地域の南北と東西の標高と断面図をそれぞれ図示した (図 4.2.1, 図 4.2.2)。平面図の四角枠及び断面図の太い矢印は調査地域の範囲を示す。



図 4.2.1 調査地域および地形断面の表示範囲

南北断面図の南側 NS43 は調査地域の南端で標高 105m であり, Dewangau(14)や Sarawal(21)付近. 調査地域北端の Patkhauli(1)は標高 118mの NS49 の南 600m にあり NS48 が Atharahati(2)114m. Khokharpurwa(4)は標高 113m, Mahuwa(8)は標高 106m, Manari(27)は 110m の標高である. 各左側の図のうち調査地域をフォーカスして拡大したものが右側の図になる. 各断面図には 1km ごとのスケールと番号を振っている.

シワリク丘陵は標高 800~1,100m の連続するピークで調査地域から眺めると北東に位置する. 調査地域付近の南北と東西の断面を JICA 25,000 分の 1 地形図でプロットした図 4.2.2 を眺めると南北は徐々に斜度が緩くなり, ボーリング掘削調査地点では最高地点から最低地点まで距離 6 km を北から南に向かって 10m~12m ほど標高が低くなる. また, 東西は調査地域においてほぼフラットであることが確認できる.

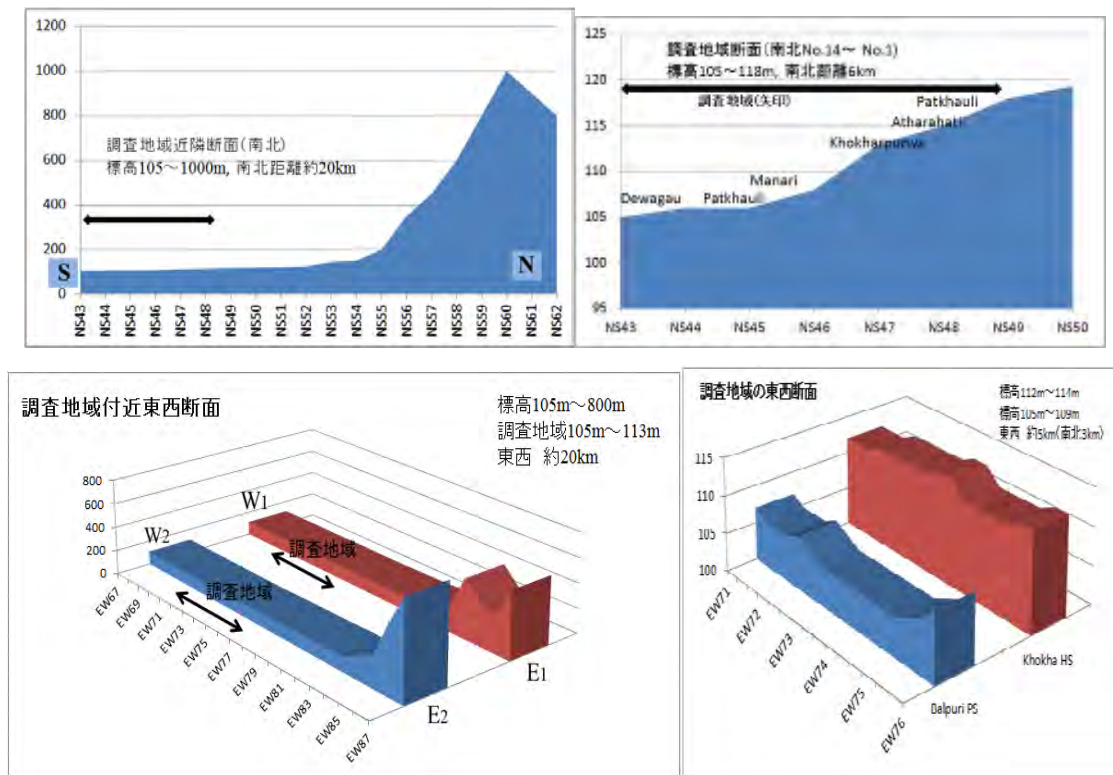


図 4.2.2 調査地域周辺の地形断面と部分拡大図 (図 4.2.1 の範囲参照)

(2) テライ北部 (Bhabar zone)

Bhabar zone はシワリクに隣接する扇状地が主体になっており南北数キロから 12km の幅がある. 現在でも大半が広葉樹サル(*shorea robusta*, Sal)の樹木で覆われている. 森林土は薄く地下には砂レキが存在する. この地域では円摩した巨レキが多数産出しテライの住宅基礎などに利用されている. 露頭では淘汰の悪い厚いレキ層が確認できる. 土地はレキが優越する地質で地下水も得にくく農耕に適さない. 従って民家は少なくサルの原生林が調査時点でも存続していた. 網状河川がみられ乾季には涸川となる小河川も多数みられる. これらの河床は有色レキが主体であり砂や泥も一部確認できる. Bhabar zone に集落はない.



写真 4.2.6 有色円レキが堆積する河床



写真 4.2.7 扇状地の網状河川

(3) テライ中央部

調査地域はテライ中央部のルンビニ地域に位置する。中央部の南北幅は約 10-12 km 程度である。現在は大量の井戸揚水の影響で数は減少しているが北の扇端近くに自噴井が確認できた。北部は砂やレキがみられる地域が一部あるが表土はシルト卓越の地質で平地はすべて水田である。また JICA 25,000 分の 1 地形図により泉 (spring line) が源流と推定される小河川も複数確認できる。河床はシルト主体であり小レキはあまり確認できない (写真 4.2.8-9)。浅層帯水層は河川由来の細砂で構成されておりヒ素濃度の高い井戸が散見される。



写真 4.2.8 表土はシルトが卓越する



写真 4.2.9 シワリクから流れる小河川
河岸と河床はシルト

(4) テライ南部

南部はインド国境まで続く平坦な低地で一面が水田とサトウキビ畑である。傾斜はほ



写真 4.2.10 水田とサトウキビ畑



写真 4.2.11 河川の河床堆積物はシルト・粘土で砂やレキはほとんど確認できない

とんどないフラットな土地である。表層は粘土混じりシルトでレキは見られない。湿地が多くみられ池にはハスが自生する（写真 4.2.10）。写真 4.2.11 に示す通り河床は粘土混じりシルトであり、乾季には小河川のたまり水状態が見られる。調査地点があるテライ低地から南東に 900 km 以上もの距離にあるインドベンガル湾まで広大なガンジス平原の低地が続く。驚くことに河口まで約 900km 続く平原の標高差は僅か 100m 足らずという極めて平坦な地形であり、洪水が発生しやすい特徴がある。

前述の通り調査地域の南や西（Dewangau や Butwal など）の浅層帯水層は、その多くが河川由来の円レキなど砂レキで構成されヒ素濃度は低い傾向にある。

4.2.5 調査地域と上流河川の関係

(1) 洪水と地すべり

2015 年 4 月のネパール大地震では各地で雪崩や地すべりが生じている。地震多発地帯のネパールでは同様な地震に起因する崩壊により河川に碎屑物が流入し下流に大量の堆積物を運搬している。一方、1993 年 7 月のインド・ネパールの記録的な集中豪雨は「パチャースサールの豪雨」とよばれ、死者 1,460 人、行方不明 700 人以上、被災者総数約 50 万人、全半壊家屋 39,000 軒、被害総額約 110 億円という大災害であったといわれる。死者の約半数は洪水による犠牲者であり、ついで多いのは斜面崩壊と土石流による死者である。隆起する山は風化し侵食され雨水や雪氷によって岩石の碎屑物が下流に運搬される。氷河湖の崩壊や山崩れも洪水となって下流に大きな影響を及ぼす。

テライとシワリク丘陵の境界に位置する地方都市プトワル Butwal には大規模な扇状地が発達している（図 4.1.3）。プトワルから南に走る国道の工事現場では円レキが連続して堆積しており洪水で大量の砂レキが堆積していたことが確認できる。大河が山岳地域からテライへ流下する箇所では破壊的な洪水が頻発しており洪水のたびに流路を変えてきている。

ナラヤニ川も洪水で流路を頻繁に変えており元々国境であった流路が現在は異なる場所を流れている。調査地域とナラヤニ川河床の標高はほぼ同じレベルであり大洪水が発生した場合にはこの大河川ナラヤニ川の影響も受けていると推定される。但しフラットな低地なので泥水の洪水が押し寄せ長期間停滞する状況であると推定できる。調査地域を東西に走る嵩上げた砂利道でさえ洪水によって 1m 以上冠水すると地域住民は証言している。

調査地域には図 4.1.3 に示す通りシワリク丘陵を水源とする 10 km 程度の短い流路を持つ小河川があるが浸食削剥量が少ない。シワリク源流の小河川の浸食領域（斜面）は主に有色泥岩（シワリク A 層）で構成され調査地域の帯水層を構成する地質と異なるケースが確認できる。従って大河川ナラヤニ川の洪水により砂レキやシルト等が堆積していたことも推定できる。

(2) 調査地域と上流の地質

1) 最上流ムスタング Mustang 地域（Higher Himalayan）

カリガンダキ川最上流域はムスタング谷部で Mustang Khola と呼ばれる。この南北約 50km の谷沿いは北部が東西約 20km、下流の南が東西約 10km の範囲で粘土質の湖成堆積物と泥灰岩などで構成される河川及び氷河の堆積物である。

2) チベット堆積帯（アンモナイト化石）

ジヨムソム付近を含むムスタング谷部の東側 20km～40km はチベット堆積帯 Tibetan Sedimentary Zone と呼ばれ、水深がやや深いデルタ沖側のプロデルタ堆積物（底置層）起源



写真 4.2.12 カリガンダキ川は 5,000m 以上浸食し世界で最も深いといわれる峡谷を形成 (Natural History Museum 写真を引用)



写真 4.2.13 ダウラギリ山と手前の山の間の深い峡谷にカリガンダキ川がある。

であり極細粒砂，シルトや粘土の地層である。年間を通じて乾燥気候であるため風化や浸食が激しく小谷や溪谷によって碎屑物はすべてカリガンダキ川に流入する。これがカリガンダキの河川水が濁る原因であると推定される。前述の通り，この流域にある黒いジュラシック石灰岩の中からアンモナイトやベルムナイトの化石が多数発見されている。

3) セティ類層 Seti Formation

カリガンダキ川はジョムソムからベニの間でヒマラヤ山脈 7,000m~8,000m のピークを東西約 30km 幅で刻み，驚異的な 5000m 以上の深谷を鋭く浸食している (写真 4.2.12-13)。

ベニ北側の南北幅 10~30km で東西約 270km のセティ類層 Seti Formation はナラヤニ川の支流が複数流れており緑灰色の緑泥岩 chlorite，白雲母 muscovite，塊状珪石 massive quartzit のレキや砂岩が特徴である。ヒ素を含有する可能性がある緑泥岩の存在が注目される。

(3) シワリク層群の地形形成

シワリク丘陵から調査地域に何本もの小河川が流れている。シワリクの地形形成は調査地域の堆積物を検討する上で重要な要素である。シワリク丘陵はもともとヒマラヤ碎屑物が平らに堆積していた河川湖沼堆積物が隆起してできたものである。古地磁気測定によって判明したシワリク丘陵の隆起は今から 70 万年前である (図 4.2.3)。隆起開始前は元々平らに堆積したシワリク層群は 1500 万年前頃から堆積を始めた。シワリク層群で最も古い最下部に位置する A 層アルンコーラ層は泥岩主体で砂岩層を少しはさむ整合の地層である。漣痕など古流行解析で北東から北西まで流向はぶれており河床勾配は緩く河川運搬力が弱く堆積物に泥が卓越する (図 4.2.3)。

流速が遅いと砂やレキを移動させることができず，水域で流れがない状態にならないと泥や汚濁物のコロイド状フ



図 4.2.3 シワリク層群の堆積の様相 (木崎 1994 P104)

ロックは沈降・堆積することができない。900 万年前ぐらいからは砂岩層が増えて泥岩層がはさむ互層になる。砂の存在は山脈の隆起が盛んになり河川勾配が大きく流速も速くなっていることを意味する。砂岩には黒雲母のゴマシオが認められるが、黒雲母は高ヒマラヤに存在するヒマラヤ片麻岩や花崗岩が起源である。

760 万年前頃からはB層ビナイコーラ層が堆積し始め、細レキや中レキ、砂岩が優勢になる。250 万年前にC層チトワン層が堆積し淘汰のよい中レキ（珪岩）で構成されている。150 万年前には淘汰の悪い巨レキのD層デオラリ層が堆積する。

シワリク層群（写真 4.2.14）は全体で 6,000m を超える層厚があり上流ヒマラヤの碎屑物によって1,400 万年もかけて堆積したものである。浅い湖に土砂が溜まるにしたがってそこが沈降し、その上にさらに溜まる、という具合に、次第に膨大な地層になってきた（木崎 1994）。この沈降はヒマラヤが上昇隆起することが原因になっている。現地の露頭で観察するとシワリクの地層は下部から上部に向かって泥から砂、砂からレキに変わっている。



写真 4.2.14 シワリク丘陵

このように下部では泥岩主体のものが徐々に上方粗粒化している。河川の働きによる堆積物の堆積環境が推定できる。古い時代には河川勾配が緩いシルト粘土が河川によって運搬され、やがて上流の山が高く隆起して川の流速が急になると浸食力が高まり砂が流れて堆積し、さらに河川勾配が大きくなってレキが運搬されシワリク層群の上部に堆積するようになったと推測されている。

レキ岩は移動距離が限られ巨レキなどは付近の山から崩落して河川を流下している。従って木崎 1994 が述べている通り、300 万年前から 200 万年前になると泥や砂が高ヒマラヤから運ばれてきた時代は終わり低ヒマラヤが隆起して、そこが主な供給源になってきた。レキは珪岩や石灰岩など低ヒマラヤ堆積物の岩石で構成されている。

木崎 1994 によると A 層下部には泥岩が多い（図 4.2.3）。熱帯で風化した赤土などが混じり赤や青、茶色など雑色の泥岩が存在する。泥岩は石灰質であり一部石灰岩が存在する。これらはテチス海堆積物に多い石灰岩に起因する二次的堆積物や低ヒマラヤの珪岩層起源の碎屑物だと考えられる。

シワリク丘陵南端を東西に横切る国道の露頭はほとんどすべてが泥岩もしくはシルトであり変成岩は見当たらない。このため付近の地層は A 層アルンコーラ層下部であると判断できる。

参考文献

在田一則 1988：ヒマラヤはなぜ高い。青木書店、172p.

大岡健三・駒井 武・成澤 昇・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本太 2014：

ネパール・テライ低地の砒素汚染と周辺地質。環境地質学論文集, Proceedings of the 24th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics, 45~50.

大岡健三・駒井 武・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本太・谷口智雅 2013：

- ネパール・テライ低地の砒素汚染と上流域の関係. *Proceedings of the 23rd Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics*, 147~152.
- 駒井 武・大岡健三・中村圭三 2014 : ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染の現地調査および対策. *Proceedings of the 23rd Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics*, 24, 51-56.
- 木崎 甲子郎 1994 : ヒマラヤはどこから来たか—貝と岩が語る造山運動. 中公新書, 173p.
- Nakamura, K., K. Ooka and T. Komai, 2007 : The drinking water quality in four physiographic regions of Nepal and arsenic contaminated groundwater in Terai, lowland Nepal. *環境情報研究*, 15, 53-70.

4.3 堆積物の地質調査に関する研究

4.3.1 調査方法

調査地域の地質学的特徴を把握するため、深度 50m までを対象にした井戸の掘削調査を実施した。現地では電源や水源の確保が困難であったため、テライ平原でよく使用されている井戸の掘削方式である手動式打撃掘削工法（スレッジャー法）を採用した。

スレッジャー法は単管を井戸孔の底に落下させ、地層を打撃しながら掘削をしていく方法である。手の平にて単管を上下にあわせ開閉を行うことにより、泥水の排水が行われ、またこの排水に伴って地質試料が排出される。

この工法は、掘削時の地下水や練粉によるコンタミの影響は多少あるものの、深度方向の堆積物試料を比較的正確に採取できる特長がある。以下にスレッジャー法の特徴を記す。

- ① 人力だけで掘削を行うことが可能であり、電源を必要としない。
- ② 必要な機材は、単管、接続金具、先端ビット、竹等（揚水管および手漕ぎ井戸ポンプについては別途村内のよろずやにて購入）であり、車両による機材搬送の必要がない。
- ③ 調査地域においては、軟弱な地層が深部まで連続しており、また地下水位も浅いため、掘進効率が非常に高い。H27 年 3 月の掘削においては、のべ 3 日間で 50m の掘削を行っている。
- ④ 機械式のボーリングマシンに比較して廉価にて掘削が可能である。当該サイトにおいて井戸掘削に必要な費用は、H27 年 3 月の掘削においては約 25,000 ルピー（日本円にして 25,000 円位）、揚水管、手漕ぎ井戸ポンプ代を加えても約 35000 ルピー（35,000 円位）である。



写真 4.3.1 堆積物採取のための掘削調査



写真 4.3.2 堆積物採取のための掘削調査



写真 4.3.3 堆積物採取のための掘削調査



写真 4.3.4 堆積物採取のための掘削調査

一方、スレッジャー法による井戸掘削は、上記の通り様々な長所を有するが、検討課題もあげられる。

- ① 地質の正確な深度の把握が難しい。地上部分に泥水とともに排出される地質試料は、単管の内部を一定の時間を要して移動した後に排出されることより、掘削時の先端ビット部分の到達深度と、その時点において排出された地質試料では差が生じる恐れがある。
- ② 地質状況、特に砂層においては正確な粒径分布の把握が難しい。地質試料は、シルトや粘土に対しては固形物として地上に排出されるため地質の記載が容易であるが、砂層や礫層の場合、単管の内部にて泥水とともにスライム状にて排出されるため、正確な記載が困難となる。特にシルト混じり砂のような地質においては、シルト部分に関しては泥水中に溶出してしまい、粒径の大きな砂部分のみの評価となってしまう恐れがある。
- ③ 掘削孔を保護するケーシングパイプを同時併入していないことより、孔壁の崩壊が生じるおそれがある。特に掘削作業は夜間には行われないため、一定の深度まで掘削しても、翌朝には孔壁の崩壊により井戸が埋まってしまい、再度掘りなおす必要も生じる。
- ④ 掘削孔を保護するケーシングパイプを同時併入しておらず、また掘削径も十分に大きくないことより、揚水管のストレーナー部分へのグラベルパッキングの正確な充填が困難である。井戸の目詰まりや砂の流入につながり、井戸の寿命を短くする原因となる。
- ⑤ 同様に帯水層が複数あり上部の帯水層においては飲用に不適な水質である場合、飲用不適の帯水層に対してはセメンティング等による遮水を行い汚染地下水の流入を防ぐことが望まれるが、本工法においては困難な状況である。
- ⑥ 孔壁の崩壊を防ぐために、循環泥水中に牛糞を混ぜる工法もサイトによっては観察されたが、衛生上の問題が懸念される。
- ⑦ 今回の調査においては深度 50m までの掘削を行い井戸を設けたが、さらに深い帯水層に対する掘削においては、孔壁の崩壊等により本工法では困難が生じることが予想される。

スレッジャー法による掘削調査の状況を、写真 4.3.1～4.3.4 に示す。調査においては 1m 間隔で採取された堆積物の試料を記載するとともに、土性、粒度および pH などを現場にて測定した。

4.3.2 調査対象地の地質状況

各井戸における堆積物の地質構造、層序、地下水面および帯水層などの状況を図 4.3.1 と表 4.3.1 に示す。地表付近は主にシルトであるが、深度 10m まではシルトと粘土の互層を形成している。約 18m 地点の第一帯水層の上部には黒色の粘性土が確認され、有機物質の含有量（強熱減量）が 5 から 10% 程度のピート層を形成している。その下部も同様にシルトと粘土の互層となり、第二帯水層は比較的厚層の細粒砂で構成されている。さらに下部では 10m を超える粘性土を介して黒色のピート層が存在し、その下部には層厚 4m 程度のしっかりした第三帯水層が確認されている。全体的な地質構造は上記のような層序の連続傾向を示しているが、第二帯水層と第三帯水層の間には粘土質からなる難透水層が存在

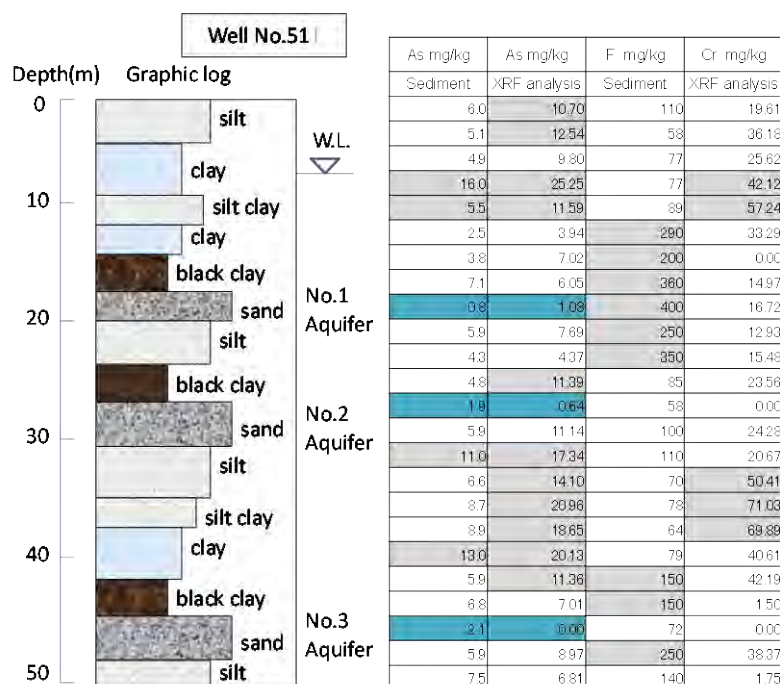


図 4.3.1 Well No. 51 の地質柱状図および堆積物の化学組成

するため、30mより深部では浅層地下水の影響が鉛直方向に及び難い地質条件となる。

現地調査において掘削した井戸は、以下のとおりである。このうち、6本の井戸では地質調査のための堆積物試料を全深度で採取した。それ以外の井戸は観測井として使用した。

- ・2012年3月調査 No. 51 (20m), No51(45m)
- ・2012年8月調査 No. 2, No. 30, No. 51
- ・2014年3月調査 No. 2, No. 4, No. 8, No. 13, No. 51
- ・2014年8月調査 No. 2, No. 4, No. 51

また、2012年から2014年の掘削調査で観測された各井戸における堆積物の地質構造、層序、地下水面および帯水層などの状況を表4.3.1～表4.3.2に示す。ほかの井戸とほぼ同様にして、地表付近は主にシルトであるが、深度10mまではシルトと粘土の互層を形成している。約15m地点の第一帯水層の上部には黒色の粘性土が確認され、それ以降では第二帯水層および第三帯水層が確認された。ヒ素の高濃度の汚染は、いずれも第一帯水層と第二帯水層の間の地層で確認された。この区間ではコア調査の詳細な記載にあるように、黒または暗色のクレーの堆積物となっており、一部ではヒ素の含有量が高い地点も確認された。堆積物試料の状況を写真4.3.5～写真4.3.8に、現場での地下水分析状況を写真4.3.9-10に示す。



写真 4.3.5 黒色を示すシルト．有機物片を含む



写真 4.3.6 第2帯水層を構成する砂層
(中粒砂～粗粒砂．礫)



写真 4.3.7 第3帯水層を構成する砂層
(細粒砂～中粒砂)



写真 4.3.8 井戸 No.51 の堆積物サンプル



写真 4.3.9 現場での分析状況



写真 4.3.10 地下水中のヒ素分析状況

表 4.3.1 堆積物試料の地質学的特徴と化学成分 (W-1, 2, 3) 2012 年度調査

井戸 1	採取点	深度	特徴	色彩	As 含有量	As 溶出量	備考
	W 1-1	2m	粘土	黄褐色	n. d.	0. 307	
	W 1-2	4m	粘土	黄褐色	n. d.	0. 475	
	W 1-3	6m	シルト	褐色	5. 431	0. 474	
	W 1-4	8m	シルト	黄褐色	6. 898	0. 603	
	W 1-5	10m	砂シルト	黒褐色	n. d.	1. 127	
	W 1-6	12m	シルト	褐色	n. d.	0. 465	
	W 1-7	14m	シルト	黒褐色	n. d.	1. 250	
	W 1-8	16m	シルト	グレー	10. 973	11. 814	
	W 1-9	18m	砂	褐色	n. d.	2. 123	
	24				mg/kg	ppb	
井戸 2	採取点	深度	特徴	色彩	As 含有量	As 溶出量	備考
	W 2-1	2m	粘土	黄褐色	n. d.	0. 489	
	W 2-2	4m	シルト	褐色	1. 721	3. 298	
	W 2-3	6m	シルト	黒褐色	2. 576	0. 324	
	W 2-4	8m	シルト	褐色	n. d.	0. 973	
	W 2-5	10m	シルト	黒褐色	n. d.	5. 424	
	W 2-6	12m	シルト	黒褐色	n. d.	18. 319	
	W 2-7	14m	砂	褐色	n. d.	3. 082	
					mg/kg	ppb	
井戸 3	採取点	深度	特徴	色彩	As 含有量	As 溶出量	備考
	W 3-1	2m	粘土	黄褐色	n. d.	0. 082	
	W 3-2	4m	粘土	黄褐色	3. 972	0. 275	
	W 3-3	6m	シルト	褐色	n. d.	2. 253	
	W 3-4	8m	砂	褐色	n. d.	1. 380	
	W 3-5	10m	砂	褐色	n. d.	1. 264	
	W 3-6	12m	シルト	褐色	3. 426	2. 240	
	W 3-7	14m	シルト	褐色	n. d.	0. 417	
	W 3-8	16m	砂	黒褐色	n. d.	4. 153	
					mg/kg	ppb	

表 4.3.2 堆積物試料の地質学的特徴と化学成分 (W-2, 30, 51) 2012年8月調査

ネパール地質試料 2012.8-19-22									
坑井	No.51	土質	色調	水分	ヒ素 mg/kg		フッ素	ホウ素	クロム
					底質試験法	XRF分析			
N-1	2	シルト	黄色		6.0	10.70	110	87	19.61
N-2	4	シルト	褐色		5.1	12.54	58	80	36.18
N-3	6	シルト	褐色		4.9	9.80	77	93	25.62
N-4	8	レキ、シルト	褐色		16.0	25.25	77	92	42.12
N-5	10	レキ、シルト	黒色、褐色		5.5	11.59	89	90	57.24
N-6	12	大レキ、シルト	黒色、褐色	自由地下水	2.5	3.94	290	84	33.29
N-7	14	細砂、シルト	灰色		3.8	7.02	200	63	0.00
N-8	16	砂、シルト	黄色、褐色		7.1	6.05	360	59	14.97
N-9	18	粗砂	黒色、灰色	帯水層	0.8	1.08	400	47	16.72
N-10	20	シルト	灰色		5.9	7.69	250	73	12.93
N-11	22	シルト	灰色		4.3	4.37	350	88	15.48
N-12	24	シルト	グレー		4.8	11.39	85	86	23.56
N-13	26	砂、シルト	褐色	帯水層	1.9	0.64	58	27	0.00
N-14	28	粘土、シルト	黄色、褐色		5.9	11.14	100	88	24.28
N-15	30	粘土、シルト	黄色、褐色		11.0	17.34	110	89	20.67
N-16	32	シルト	灰色		6.6	14.10	70	92	50.41
N-17	34	シルト	黄色、褐色		8.7	20.96	78	99	71.03
N-18	36	シルト	褐色、鉄錆		8.9	18.65	64	90	69.89
N-19	38	レキ、シルト	褐色、鉄錆		13.0	20.13	79	77	40.61
N-20	40	レキ、シルト	褐色、鉄錆		5.9	11.36	150	95	42.19
N-21	42	砂、レキ	灰色		6.8	7.01	150	100	1.50
N-22	44	砂	灰色	帯水層	2.1	0.00	72	99	0.00
N-23	46	レキ、シルト	灰色、黄色		5.9	8.97	250	68	38.37
N-24	47	レキ	灰色		7.5	6.81	140	65	1.75
	48	細砂	灰色						
坑井	No.30	土質	色調	水分	ヒ素 mg/kg		フッ素	ホウ素	クロム
	深度(m)				底質試験法	XRF分析	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
N-25	2	シルト、粘土	黄色		7.0	12.64	96	98	20.58
N-26	4	シルト、粘土	黄色		4.9	12.57	66	89	50.02
N-27	6	シルト	褐色		8.3	16.19	96	100	45.20
N-28	8	シルト	灰色		8.8	10.70	63	100	28.30
N-29	10	シルト	灰色、黄色		2.5	5.51	93	87	11.46
N-30	12	シルト	灰色		4.4	7.13	120	92	33.77
N-31	14	シルト	灰色		8.5	11.89	130	92	64.11
N-32	16	細砂、シルト	黒色、灰色	帯水層	1.5	0.00	210	48	1.13
	18	粗砂	鉄錆						
坑井	No.2	土質	色調	水分	ヒ素 mg/kg		フッ素	ホウ素	クロム
	深度(m)				底質試験法	XRF分析	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
N-33	2	シルト	黄色		7.4	9.50	92	90	20.47
N-34	4	シルト	黄色		7.9	13.05	110	99	26.50
N-35	6	シルト	灰色		5.9	13.65	100	99	58.19
N-36	8	シルト	褐色		11.0	13.19	94	65	4.12
N-37	10	レキ、シルト	褐色		1.8	1.37	62	29	0.00
N-38	12	レキ、シルト	黒色、褐色		6.7	2.99	97	40	20.41
N-39	14	レキ、シルト	黒色、褐色		5.3	8.62	140	97	27.57
N-40	16	細砂、シルト	灰色	帯水層	6.9	10.54	120	92	37.43

表 4.3.3 堆積物試料の地質学的特徴と化学成分 (W-Patkhaui) 2014 年 3 月調査

Patkhaui				標高(推定): 107m		
掘削日時	深度	地質	記事	帯水層区分(案1)	帯水層区分(案2)	写真
2014/3/1	表層～10cm	シルト混じり細砂	粒径のそろった均一なシルト混じり細砂を主体 5mm～20mmのチャートの垂円礫を混入する。 灰褐色			
	1m	(コア欠)				
	2m	シルト混じり粘土	粒径均一なシルト混じり粘土			
	3m	シルト混じり粘土	粒径均一なシルト混じり粘土			
	4m	シルト・中砂混じり細砂	φ2～10mmの垂円礫を混入する		第1帯水層	○
	5m	シルト混じり粘土	粒径均一なシルト混じり粘土 灰青色			
	6m	(コア欠)				
	7m	粘土混じりシルト	粒径均一な粘土混じりシルト オリーブ灰色			
	8m	粘土混じりシルト	不規則に褐色の細い縞模様が入る。 φ2mm位の垂円礫を混入する			
	9m	シルト	φ1～2mmの垂円礫を混入する。 オリーブ灰色			
	10m	シルト	粒径均一なシルト オリーブ灰色			
	11m	シルト混じり粘土	粒径均一なシルト混じり粘土 灰青色 オリーブ灰色			
	12m	粘土	上位より粘土比率が高くなる。粒径均一			
	13m	礫・粘土混じりシルト	不規則に褐色の細い縞模様が入る。 φ1～3mm位の垂円礫を混入する			
	14m	細砂	細砂(泥水中の沈殿物より判定) ごく微細な白雲母粒や黒雲母粒を含む	第1帯水層(上部)	第2帯水層(上部)	
	15m	粘土混じりシルト	粒径均一			
	16m	粘土混じりシルト	粒径均一			
	17m	粘土混じりシルト	粒径均一			
18m	細砂	微細砂主体(泥水中の沈殿物より判定) φ5～10mmの角礫。垂角礫を混入する。礫種は砂岩礫。 シルト分含む	第1帯水層(下部)	第2帯水層(下部)		
19m	細砂	微細砂主体(泥水中の沈殿物より判定) φ5～10mmの角礫。垂角礫を混入する。礫種は砂岩礫。 シルト分含む。黒色の微粒子多く含む				
20m	シルト混じり粘土	シルト混じり粘土。やや締まっている。 暗灰色。色調として黒味が強くなる。幅1mm。長さ10mm位の有機物片(植物根?)をはさむ。 有機物小片を縞状(幅1mm長さ10mm)もしくは斑状(φ2～5mm)にて所々に散在する。			○	
2014/3/2	21m	シルト混じり粘土	暗灰色。有機物小片を所々に含む。			
	22m	シルト・礫混じり粘土	黄灰色。φ1～2mmの角礫(黄灰色)を含む			
	23m	シルト・礫混じり粘土	褐灰～黄灰色。粘土中に灰もしくは青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。わずかに有機物片を混入する			
	24m	シルト混じり粘土	褐灰～黄灰色。粘土中に灰もしくは青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。わずかに有機物片を混入する			
	25m	シルト混じり粘土	黄灰色。粘土中にわずかに有機物片を混入する			
	26m	シルト混じり粘土	黄灰色。粘土中にわずかに有機物片を混入する			
	27m	シルト混じり粘土	黄灰色。粘土中に灰褐もしくは青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。 φ1～2mmの垂角礫を含む(写真)			○
	28m	シルト混じり粘土	黄灰色。粘土中にφ3mmの灰褐の斑状、縞状の有機物片?が不規則に入る。。固結度増す			
	29m	シルト混じり粘土	粘土中に灰褐の斑状、縞状の着色が不規則に入る。φ1～2mmの垂角礫を含む			
	30m	シルト混じり粘土	粘土中に灰褐の斑状、縞状の着色が不規則に入る。少量の有機物片を混入する			
	31m	粘土混じりシルト	暗灰色となる。灰褐の斑状、縞状の着色が不規則に入る。幅0.5mm、長さ1～2mmの暗灰色や黒色の有機物片を不規則に混入する。やや固結している。(写真)			○
	32m	粘土混じりシルト	オリーブ灰～暗灰色となる。暗灰色の縞状や斑状の変色が不規則に挟まれる			
	33m	粘土混じりシルト	オリーブ灰～暗灰色となる。暗灰色の縞状や斑状の変色が不規則に挟まれる			
	34m	シルト混じり細砂	細砂・微細砂が泥水中、バケツの底に溜まる	第2帯水層	第3帯水層	○
35m	シルト混じり細砂	細砂・微細砂が泥水中、バケツの底に溜まる				
36m	細砂混じりシルト	φ1～2mmの垂角礫を含む。φ1～2mmの斑状や縞状の茶褐色の変色がみられる。φ1～2mmの黒色の斑(有機物片?)を含む				
36.5m	シルト混じり粘土	全体として均一な粒径よりなるシルト混じり粘土				
2014/3/3	37m	シルト混じり細砂				
	37.5m	シルト混じり粘土	オリーブ灰。粘土中に灰褐色の縞状の着色が不規則に入る。			
	38m	細砂混じりシルト	暗灰色。粒子均一			
	39m	シルト混じり粘土	暗灰色。粘土中に灰褐色の縞状の着色が不規則に入る。			
	40m	シルト混じり粘土	φ1～2mmの垂角礫を多く含む(写真)			
	41m	細砂	微細砂～細砂主体、微小の黒色の粒子を多く含む(写真)(泥水中の沈殿物より判定)	第3帯水層	第4帯水層	○
	42m	細砂	微細砂～細砂主体、微小の黒色の粒子を多く含む(泥水中の沈殿物より判定)			○
	43m	細砂	微細砂～細砂主体、微小の黒色の粒子を多く含む(泥水中の沈殿物より判定)			
	44m	細砂	微細砂～細砂主体、わずかに中砂含む、微小の黒色の粒子を多く含む(泥水中の沈殿物より判定)			
45m	細砂	微細砂～細砂主体、わずかに中砂含む、微小の黒色の粒子を多く含む(泥水中の沈殿物より判定)				

表 4.3.4 堆積物試料の地質学的特徴と化学成分 (W-51) 2014 年 3 月調査

バウプリ小学校				標高(推定):○○m			
掘削日時	深度	地質	記事	帯水層区分(1案)	帯水層区分(2案)	写真	
2014/8/20	0~20cm	表土・砂混じりシルト	表土・植物根含む			○	
	1m	粘土混じりシルト	灰褐色、φ2mm~3mmの垂角礫を少量含む			○	
	2m	粘土混じりシルト	灰褐色、φ2mm~3mmの垂角礫を少量含む			○	
	3m	シルト混じり粘土	1~2mmの有機物片を所々に含む			○	
	4m	シルト混じり粘土	1~2mmの有機物片を所々に含む			○	
	5m	シルト混じり粘土	φ1~2mmの角礫を少量含む			○	
	6m	シルト混じり粘土	φ1~2mmの角礫を少量含む			○	
	7m	粘土混じりシルト	φ1~2mmの角礫を少量含む、L=5mmの有機物片含む			○	
	8m	粘土混じりシルト	φ1~2mmの角礫を少量含む			○	
	9m	粘土混じりシルト	有機物片を少量含む。色調が不規則に変化する。			○	
	10m	シルト混じり粘土	暗灰~灰色に色調が変わる。黒色の有機物小片を多く含む。固結強い。			○	
	11m	レキ混じり粘土	暗灰色、φ0.5~1mmの角礫を多く含む。			○	
	12m	レキ混じり粘土	暗灰色、φ0.5~1mmの角礫を多く含む。			○	
	13m	細砂	シルト、φ1~2mmの角礫混じりの細砂(コア採取量少ない)		第1帯水層	第2帯水層(上部)	○
	14m	粘土混じりシルト	暗灰色、褐色の有機物片を混入する。				○
	15m	シルト・レキ混じり砂	砂は中砂~粗砂主体。φ1~2mmの角礫を少量含む(コア採取量少ない。泥水中のスライム沈殿物より判定)		第1帯水層	第2帯水層(上部)	○
	16m	シルト混じり砂	暗灰色。粒径均一な細砂。黒色の微小粒子(黒雲母片?)。銀色の白雲母片を含む(コア採取量少ない。泥水中のスライム沈殿物より判定)				○
	17m	シルト混じり砂	暗灰色。粒径均一な細砂。黒色の微小粒子(黒雲母片?)。銀色の白雲母片を含む(コア採取量少ない。バケツのスライム沈殿物より判定)				○
	18m	シルト混じり砂	暗灰色。粒径均一な細砂。黒色の微小粒子(黒雲母片?)。銀色の白雲母片を含む(コア採取量少ない。バケツのスライム沈殿物より判定)				○
	19m	シルト混じり粘土	灰褐色を示す粘土中に黒色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。φ1~2mmの角礫を少量混入する				○
20m	砂	粗粒砂主体。φ2mm位の角礫を含む		第1帯水層	第2帯水層(上部)	○	
2014/8/21	21m	粘土混じりシルト	暗灰~灰褐色。褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。褐色のφ1~5mmの垂角礫の粒子を所々に混入する。固結強い。			○	
	22m	粘土混じりシルト	暗灰~灰褐色。褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。褐色のφ1~5mmの垂角礫の粒子を所々に混入する。固結強い。			○	
	23m	砂	黄褐色。中砂混じりの細砂主体。粗粒砂主体。(コア採取量少ない、バケツの沈殿物より判定)	第2帯水層	第2帯水層(下部)	○	
	24m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に黒色の縞模様が入る。褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。固結強い。			○	
	25m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に黒色の縞模様が入る。褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。固結強い。			○	
	26m	粘土混じりシルト	灰褐。所々に黒色の粒子が不規則に入る。灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	27m	粘土混じりシルト	灰褐。所々に褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。固結度高い。			○	
	28m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。縞模様は鉛直方向へ伸びている。			○	
	29m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。縞模様は鉛直方向へ伸びている。			○	
	30m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。縞模様は鉛直方向へ伸びている。			○	
	31m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。縞模様は鉛直方向へ伸びている。			○	
	32m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。縞模様は鉛直方向へ伸びている。φ0.2mm位のバミス状の粒子を所々に含む。			○	
2014/8/22	33m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に褐色や青灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	34m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に黒灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	35m	シルト混じり粘土	灰褐。所々に褐色、青灰色、黒灰色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	36m	シルト混じり粘土	青灰色が主となる。所々に褐色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	37m	シルト混じり粘土	灰~青灰色。所々に褐色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	38m	シルト混じり粘土	灰~青灰色。所々に褐色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	39m	シルト混じり粘土	褐灰色が主となり灰~青灰はおおよそ30%位。所々に褐色の斑状、縞状の着色が不規則に入る。			○	
	40m	シルト混じり粘土	色調として褐灰50%。灰50%			○	
	41m	シルト混じり粘土	色調として褐灰20%。灰80%。φ0.5mmの黒い斑が所々に混入。固結度やや緩くなる。			○	
	41.5m	砂	細砂~中砂(バケツのスライム・沈殿物より判定)			○	
	42m	砂	細砂~中砂(バケツのスライム・沈殿物より判定)			○	
	43m	砂	細砂~中砂(バケツのスライム・沈殿物より判定)	第3帯水層	第3帯水層	○	
	44m	砂	細砂~中砂(バケツのスライム・沈殿物より判定)			○	
45m	砂	細砂~中砂(バケツのスライム・沈殿物より判定)			○		

表 4.3.5 堆積物試料の地質学的特徴と化学成分 (W-4, Khokapurua) 2014 年 8 月調査

		コカプリア 高校内 No.4 Nepal 推定標高112m		
掘削日	深度 m	地質	記事	帯水層区分
	1	シルト盛土	隣接ため池の掘削土と推定	
	2	シルト	黄色&黄褐色シルト主体だがVFSを微量含む	
	3	シルト	黄褐色まだらシルト VFSとφ2mmレキを稀に含む	
	4	シルト混じりVFS	黄褐色シルト主体からVFSが増加傾向	
2014	5	VFS混じりFS	黄褐色 FSが増加傾向	第1帯水層
Aug.	6	FS	黄褐色 FSが主体で黒色微粒子で僅かにゴマシオ	
19	7	粘土混じりシルト	暗灰色、一部青灰色	
	8	粘土混じりシルト	暗灰色、一部やや明るい青灰色	
	9	粘土混じりシルト	暗灰色、オレンジまだらが出始める	
	10	粘土混じりシルト	暗灰色にオレンジ色まだらが不規則に入る	
	11	粘土混じりシルト	青灰色	
	12	粘土混じりシルト	青灰色	
	13	粘土混じりシルト	青灰色	
	14	黒色シルト粘土質	黒 (スクールで一時掘削中止)	
	15	黒色シルト粘土質	黒	
	16	黒色シルト粘土質	黒	
	17	FS	暗灰色 淘汰が悪い VFS~FS	第2帯水層 (ヒ素リスク有)
	18	Granule, Very Coarse	暗灰色 淘汰が悪い	
	19	FS	19.5m付近でFSから粘土混じりシルト	
	20	VFS	暗灰色	
	21	FS	暗灰色、黒雲母混じり、鉄臭あり	
	22	粘土状黒色シルト	いわゆるブラッククレー	
	23	粘土状黒色シルト	いわゆるブラッククレー	
	24	シルト混じり粘土	黄褐色 MSとFS少し混ざる	
	25	シルト混じり粘土	Granuleと不定形のレキ(スラグ状)含む	
	26	FS	褐色	第3帯水層 (ヒ素ND)
	27	Granule混じりMS	有色砂、全体的に明るい赤褐色	
	28	Granule	φ1~3mm砂礫含む 赤褐色	
	29	FS	明るい灰褐色	
	30	FS	明るい灰褐色	
	31	シルト混じり粘土	黄褐色	

4.3.3 堆積物の地質学的考察

(1) 周辺の地形と水系

調査地域の北東約 20km にあるシワリク丘陵直下の緩斜面では巨礫 Boulder, 円礫 Pebble など礫主体の岩石が堆積している。付近の河川は網状河川で乾季には多くが涸川となり地下水水位も低いため涵養域であると推定される。シワリク丘陵から南に下って東西を走る国道を過ぎると短い扇状地状の地形がほぼ消滅する。国道は扇端の南側の平地をほぼ直線に走る。シワリク丘陵の稜線(標高 800m~1,100m) から標高 110m~120m 程度の平地に流出する小河川の山麓部分の距離は僅か 5km~10km 程で狭い流域しかなく、広大な流域を持つヒマラヤと比較すると浸食碎屑物の生産量はかなり少ない。これは調査地域の水系やシワリク逆断層スラスト構造からも自明である(図 4.3.2, 図 4.1.3)。

調査地域の北西に位置する扇状地は北に長さ 10km から 15km 程度発達し原生林で覆われている。地質は平野部になると小河川の河床含め表

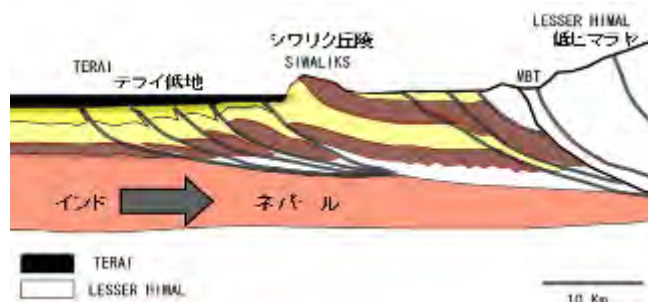


図 4.3.2 シワリク逆断層模式図 (2007 大岡原図)

土はすべてシルト・粘土になる。調査地域南端ではさらにフラットになり水田やサトウキビ畑が広がる。表層は粘土が優越する。

調査地域の南東約 30km にあるナラヤニ川は川幅が 5km 前後の大河川である。ナラヤニ川の水位（雨時に冠水する中水敷）と調査地域の小河川の水位は両者とも標高 109m 程度でほぼ一致する（大岡 2014）。ナラヤニ川上流のカリガンダキ川などの支流では常に濁った河川水が流下するが両岸には白い石英砂が断続的に確認できる。複数の支流が合流したナラヤニ川はシワリク丘陵を蛇行しながら横切ってテライ低地になって川幅をさらに広げ流れは緩くなる。インド国境にあるダムのナラヤニ下流では円礫と白い石英砂がみられる。ダム上流側から調査地域の南に向かって建設された半円形の灌漑運河の河床（深さ約 8 m）にも淘汰のよい石英砂が連続して堆積している。付近の表層はシルト・粘土であるが洪水や豪雨などでナラヤニ川によって石英砂がヒマラヤ山脈から運ばれることが推定される。

一方、調査地域の北西側にあるプトワルにはシワリク丘陵を浸食する河川がテライ低地に流入する地点から南に向かって長さ 40km 以上の扇状地を発達させている。プトワル周辺を南北に走る国道の掘削工事現場は扇状地に位置し円礫が連続して確認できた。礫主体の地層であるため井戸水から有意なヒ素汚染は検出されていない。

調査地域周辺はほぼフラットな地形でシルト・粘土の表層地質であり、深度 50m までの掘削調査でも帯水層の砂層を除くと厚いシルト・粘土で占められている。Neku 2011 によると調査地域南側の 3 つの浅井戸ボーリングコア分析の粘土占有率は 88%、85%、86%と粘土が主体となっている。粘土の推定含有量は全体の 60%~80%程度で残りがシルトである。これらの知見から主にシルト・粘土が厚く堆積している調査地域は大きな流水の影響を受けない水はけが悪く湛水しがちな低地であり微細粒子が凝集しながらゆっくり沈殿したことが推定できる。北西は急峻なシワリク丘陵（図 4.3.3）で遮られ、南東には大河川ナラヤニ川があり北西には流速の早い河川が大規模扇状地を形成している。

(2) 調査地域の地質特性

調査地域の北から南の地質について順に述べる。北端に位置する No. 2(標高 112m)の井戸掘削では深度 10m~12m に直径 4 mm~7 mm の円礫主体の滞水層が確認できたが水質が悪く飲用に適しない(大岡 2013)。表層 3m 付近までは黄色系のシルト層でその下部は暗青灰色のシルトで還元環境であった。No. 2 井戸はシワリクから 4km 程度の距離なのでシワリク起源の堆積物であると推定される。

北部 No. 4 のコカプルワ Khokhapurwa 井戸では水温が 26 度で浅井戸（深度約 14m）の酸化還元電位がマイナス 30mv で DO が 29%、深井戸（深度約 30m）酸化還元電位がプラス 130mv で DO が 54%で水温は 25. 9℃であった。掘削したサンプルを観察すると表層 3~4m までは黄色及び明るい褐色のシルトであったが下部ではマダラの粘土混じりシルトに



図 4.3.3 シワリク丘陵の稜線と扇状地
‘LUMBINI’ Himalayan MapHouse/UNDP



写真 4.3.11 Khokhapurwa のシルト粘土と砂 (還元色砂層から高濃度ヒ素を検出)

なり、その下に暗灰色砂層の帯水層が存在する。暗灰色の還元色砂層の地下水からは高濃度のヒ素を検出した。一方、深度 26m~30m 付近にはヒ素が検出されない帯水層が確認できた。表 4.3.5 にコア記載がある。

調査地域の南側にあるデワガウ Dewagau (No.14)では地下に有色礫がみられた。第一帯水層と第二帯水層の両方から河川由来と推定できる有色の円礫が確認できた。

現地の井戸職人によると調査地域の東西両方向や南側では円礫が大量に出てくるが調査地域中心部は地下水が豊富に出ず、地層は粘土・シルトが中心で帯水層から細砂・極細砂しか出てこないことが多い。また、調査地域では良質の帯水層があまり発達していないという。従って、シルト・粘土が厚く堆積している調査地域は河川など流れの影響をほとんど受けない湛水しがちな低地であったことが推定できる。調査地域の周囲では河川流路跡の礫が堆積する環境にあり比較的良好な帯水層が存在する。本調査の結果にも整合する図 4.3.4 (Sharma 1981) のテライ断面模式図 (中央 Terai zone) が示す通り、地下で一部礫層が断絶するような粘土主体の地質であることが推定できる。

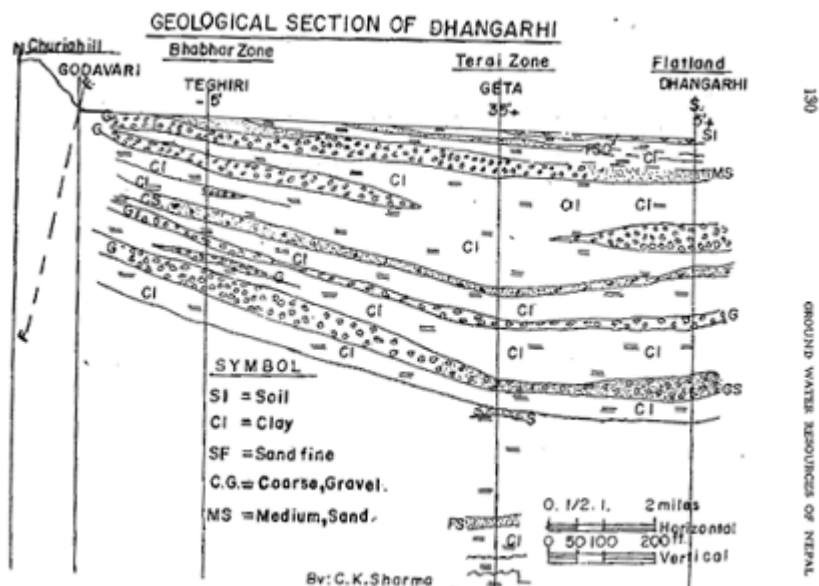


図 4.3.4 ボーリング掘削で調査した地質断面図 (Sharma 1981)

(3) シルト・粘土の起源

地形を観察すると調査地域北側の比較的新しい表層堆積物はシワリク丘陵起源であると想定できる。しかし帯水層を構成する下層堆積物（大量の河川堆積物）はシワリク丘陵の狭い流域だけでは供給できない。そうするとヒマラヤ山脈とネパール中央部の広い流域を持つナラヤニ川の洪水による堆積作用による寄与が推定できる。高ヒマラヤから流れてきたナラヤニ川由来の白色石英砂によって構成される滞水層が調査地域の複数地点で確認できる（大岡 2013）。この白色石英砂はシワリク丘陵起源の小河川堆積物には一切みられない。シワリク丘陵から流れ出るプトワルなどの河川堆積物は一般的に有色礫である。

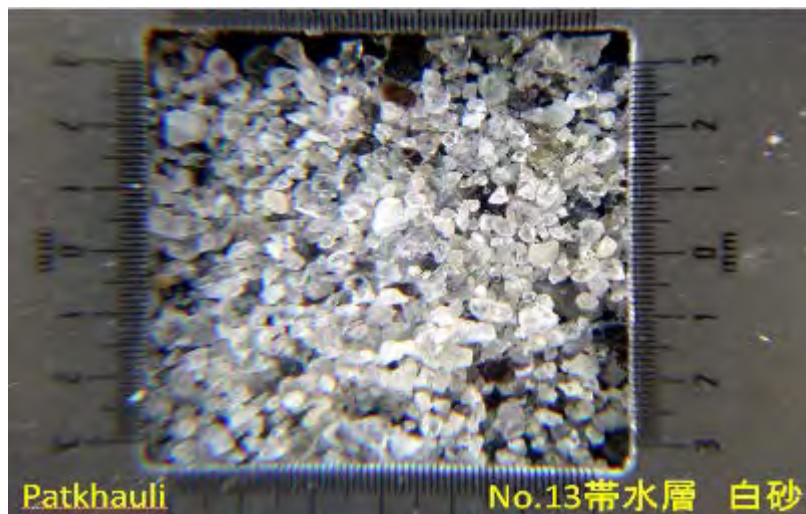
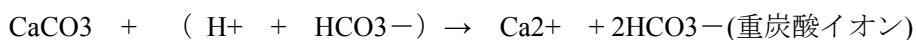


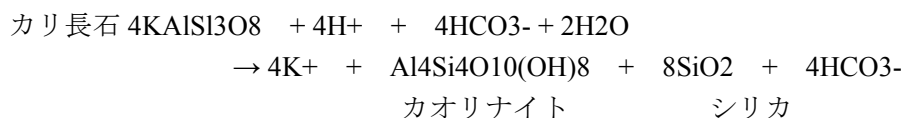
写真 4.3.12 ナラヤニ川由来の白色石英砂

(4) 石灰岩とカリ長石の化学風化 化学風化による分化

Peaty Clay(46-46.5m depth at Goini)からは白雲母 Muscovite, 石英 Quartz, カルサイト Calcite が有意に検出されている（Nakano,2012）。その中でカルサイト方解石を構成する炭酸カルシウム CaCO_3 は自然界で大気と雨水の作用で風化する。雨水には大気中の二酸化炭素が作用して炭酸が生じる。炭酸 H_2CO_3 は水素イオン H^+ と炭酸 HCO_3^- イオンになり、次の式の通り石灰石を風化させカルシウムイオンと重炭酸イオンに分解する。



石灰岩が化学風化を受けてカルシウムイオンと重炭酸イオンとなって河川で運搬されテライ低地で湛水し凝集沈殿して堆積物となる。一方、花崗岩などに含まれるカリ長石は、炭酸の水素イオンによって加水分解されてカオリナイト（粘土鉱物）を作る。上流域からは風化碎屑物と長石やシリカなど水に溶けた鉱物起源イオン、それに重炭酸イオンが河川で運搬される。



なお、方解石 (calcite) は、鉱物 (炭酸塩鉱物) の一種で、組成は炭酸カルシウム (CaCO_3)。石灰岩の主成分鉱物である。

一般的に水中の粘度鉱物などのコロイドは表層のゼータ電位がマイナス 20～マイナス 30mV の範囲にあり相互に反発し分散状態を保っている。上流のカリガンダキ川は微粒子で常に濁っており粘土やシルト、細砂が浮遊して流下する。一方、花崗岩などに含まれる石英は風化しにくいため比較的粗い粒子のままカリガンダキ川などの支流からナラヤニ川経由で下流に運搬される。つまり上流で風化した岩石は主に、粘土・シルトと石英砂に分離して下流の平野で堆積する。

(5) 考察とまとめ

調査地域の中心部を除くその周囲の堆積環境及び地質は河川の影響を直接受け流路跡が砂礫層となり帯水層を構成している。しかし調査地域は数十メートルの厚さのシルト・粘土の卓越した地質で地下水流動は停滞傾向である。一方、粘土の堆積環境は、水流がほとんどなく水が停滞した洪水などによる溜り水状態で、かなりの数の洪水と長い凝集沈殿時間をかけて堆積したものと推定できる。つまり調査地域は平坦で水はけが悪く湛水しがちな窪地又は沼、湿地などの低地であったと判断できる。

調査地域の北東は急峻なシワリク丘陵で遮られ、南東には大河川ナラヤニ川があり北西には流速の早いプトワルの河川が比較的大規模な扇状地を形成している。しかもシワリク丘陵やプトワル扇状地からは有意なヒ素は検出されない。ヒ素含有が比較的高濃度で検出されるのは砂礫層でなくシルト・粘土層の地層である。カリガンダキ川流域から粘土と共に運ばれた薄い濃度のヒ素が調査地域で複雑なメカニズムで濃縮された可能性が示唆される。

参考文献

- 大岡健三・駒井 武・成澤 昇・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本太 2014 : ネパール・テライ低地の砒素汚染と周辺地質. *Proceedings of the 24th Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics*, 45-50.
- 大岡健三・駒井 武・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本太・谷口智雅 2013 : ネパール・テライ低地の砒素汚染と上流域の関係. *Proceedings of the 23rd Symposium on Geo-Environments and Geo-Technics*, 147-152.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008 : ネパール・テライ低地における砒素汚染調査. *環境情報研究*, 16, 13-23.
- 末永和幸・筒井康美・谷正和 2012 : ネパール・ナワルパラシ群の地下水砒素汚染状況と帯水層特性. 第 17 回アジア地下水砒素汚染フォーラム講演要旨, 19-22.
- Nakamura, K., K. Ooka and T. Komai, 2007 : The drinking water quality in four physiographic regions of Nepal and arsenic contaminated groundwater in Terai, lowland Nepal. *環境情報研究*, 15, 53-70.
- Nakano, A., K. Kurosawa and M. Tani, 2012 : The concentrations of arsenic and some other elements and pH in the sediments collected at Nawalparasi District of Nepal. *The 17th International Forum on Arsenic Contamination of Groundwater in Asia*, 25-30.
- Neku, Amar, 2011 : Hydrogeological investigation of arsenic contaminated groundwater in Nawalparasi, Nepal. *The University of Texas at Dallas*, pp30.
- Sharma, Chandra, K., 1981 : *Ground Water Resources of Nepal* (2nd edition). Navana Printing Works (Calcutta) .

4.4 地下水のヒ素濃度と地質に関する研究

4.4.1 はじめに

テライ低地では、1990 年後半から地下水の摂取による健康被害が報告され、2000 年以降に国際協力事業団 JICA や現地の NGO などによって広域の現地調査が行われてきた。その結果、ナワルパラシ地域の集落では、井戸水中に含まれる高濃度のヒ素の暴露により健康影響が生じていることが示唆され、そのリスクを低減するための方策が検討されている。その後、2007 年からの敬愛大学ほかの現地調査、2010 年からの九州大学ほかの調査研究も開始され、ヒ素による健康リスクの原因と対策に関する本格的な取り組みが開始された。

中村ら(2008)は、ナワルパラシの多数の井戸の水質やヒ素汚染の状況、健康被害の状況などを調査し、地下水中のヒ素濃度の空間分布とその季節変動、集落の住民へのヒアリングによる社会的な検討を行った。末永ら(2012)は、井戸の掘削調査により地下水の挙動とヒ素の濃縮メカニズム、地質構造と帯水層特性の関係などの水文地質学的な検討を行っている。これらの一連の調査研究を通じて、当該地域における健康被害は主として地下水中のヒ素の濃集に原因していることが分かってきたが、地層や帯水層におけるヒ素濃集のメカニズムや溶出を抑制するための方策などについては未だ不明な点が多い。特に、安全な地下水源の確保や井戸構造の改善によるリスク低減を実現するためには、堆積構造とヒ素溶出の関わりや堆積物の地球化学的な分析に基づく科学的な知見の集積とデータの解析が欠かせない。

このため、2011 年から 2013 年にかけてテライ低地のナワルパラシ地域において発生する地下水中のヒ素汚染の状況を重点的に調査し、地下水および堆積物におけるヒ素の濃集と地質環境との関係について詳細に検討した。地下水のモニタリングや化学分析、さらには井戸の掘削によって採取された堆積物の観察および化学分析を行ったところ、第二帯水層の付近で地下水中のヒ素濃度が高く、嫌気的な地質環境により堆積物からのヒ素の溶出傾向が促進されることを見いだした。一方、堆積物中のヒ素の含有量は特に高い値を示さないことから、堆積環境や地質条件の影響が大きいことが示唆された。

本論文では、主として堆積物の掘削調査の解析から得られた地質構造、層序および地球化学的な知見に基づいて、当該地域に特有の堆積構造と嫌気的な地質条件の関わり、さらには井戸に沿った鉛直方向のヒ素の動態や地下水への溶出挙動について考察する。

4.4.2 地質と地形

(1) テライ堆積盆

ネパールの南部における帯状の平原はテライ低地と呼ばれ、ヒマラヤ山脈からインド洋に至る多くの河川が低地に収斂して扇状地及び広大な沖積平野（ガンジス平原）という特有な地形をなしている。低地の平均的な標高は 110～120m 程度であり、河川の堆積物により構成される平坦なテライ堆積盆として知られている。調査対象の地域の地理、地形的な状況を図 4.4.1 に示す。斜線部として示したテライ低地のうち、中央部のナワルパラシ地域を重点的に調査した。当該地域に集積している堆積物および表層土壌は、河川上流のシワリク丘陵またはヒマラヤ山脈から河川を通じて移動した粒子（風化鉱物、粘土、砂）を起源としていると考えられる。表層部は主に黄色または褐色の粘性土であり、現地では煉瓦の原料として使用されている。Gurung ら(2005)の地質調査では 20～30m にわたる粘性土からなる堆積環境が報告されているが、さらに深部まで実施した今回の地質調査では、シルト、粘土および砂質土よりなる 50m 以上の厚層の堆積盆を形成していることが認められた。

炭素同位体による年代測定によれば、地表から 12~15m までの堆積物は、4000 年から 12000 年 BP 以前に堆積したことが確認されているので、沖積層の平均的な堆積速度は 1~3 mm/year と推定される。

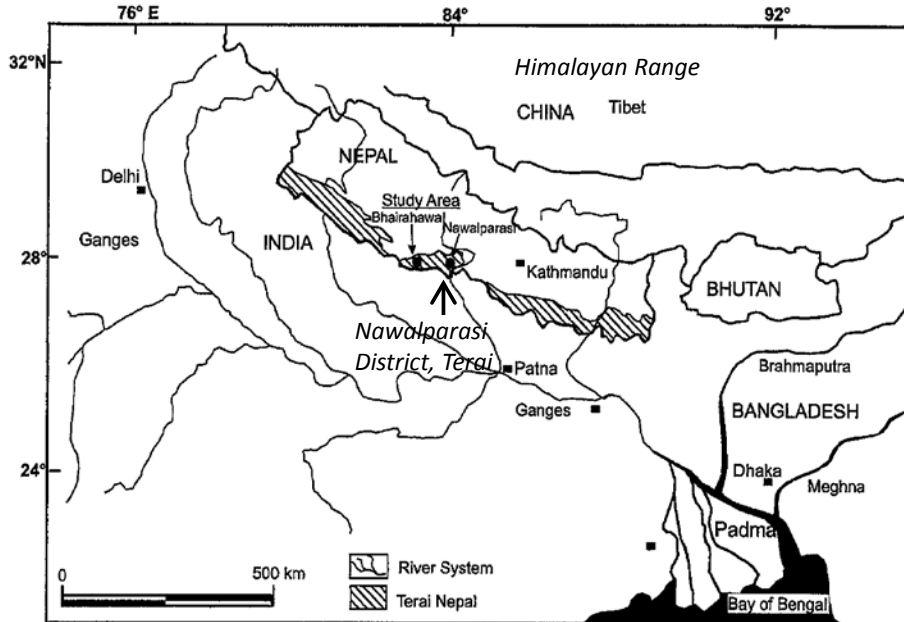


図 4.4.1 ネパールテライ低地における調査地域の平面図 (Gurung, 2005)

(2) 帯水層と地下水

テライ低地における地質層序の詳細と帯水層特性については、いくつかの調査研究があるものの、未だによく分かっていない。今回の地質調査により、地表面から 50m までの地層中に少なくとも数枚以上の帯水層と難透水層の互層からなる地質構造が確認された。後期完新世における気象変動に基づいて低地の堆積環境が変化し、これらの地質構造が形成されたと考えられる。アジア諸国でも海進に代表されるような温暖な気候に起因する沖積層および帯水層の形成が確認されているが、それに類似した堆積環境であることが推察される。また、温暖な気象環境では湿地または氾濫原における生物活動が活発であり、ピート層などの有機物の多い地層が形成された可能性が高い。調査地域の中央部では三枚以上の帯水層が確認され、それらは比較的粗い砂粒子により構成されているため、水平方向の透水性が高く、良好な地下水の揚水が可能な状況である。当該地域における地下水の流向は、シラワク丘陵からインド境界に向かう南北方向の流れが卓越している。一方、帯水層間の難透水層は層厚の粘性土で構成されているため、鉛直方向の地下水および溶存成分の移動性は小さいと考えられる。

4.4.3 地下水汚染の調査

(1) ヒ素濃度と汚染リスク

ナワルパラシ地域における地下水汚染の実態を調査するため、2011 年から 2013 年にかけて現地調査および環境モニタリングを実施した。現地調査は冬季と夏期（あるいは雨期と乾期）の 2 回に分けて実施し、当該地域で使用している既設井戸を対象にして地下水の

採水、現地の分析（基本項目）および採取した地下水試料の化学分析を行った。主な調査項目は、水温、pH、溶存酸素(DO)、酸化還元電位(ORP)および有害元素(ヒ素、鉛等)である。また、継続して実施する環境モニタリングの項目は、水温、地下水位、pH および ORP である。図 4.4.2 は、2012 年 8 月に観測された地下水中のヒ素濃度の分布を示したものである。また、地区ごとの地下水中のヒ素などの溶存イオンの濃度データを表 4.4.1 に示す。対象地域の中央部において 300ppb を超えるヒ素の地下水汚染が確認され、その周辺でも広範囲にわたって 200~300ppb の高濃度のヒ素が検出された。ヒ素の WHO 飲用基準値は 10ppb なので、それに対して 10 倍から 50 倍のヒ素汚染が発生していることを示している。地圏環境リスク評価システム GERAS(川辺,2008)を用いて地下水飲用の健康リスクを診断すると、一日耐用摂取量 TDI に対して 50~250%の曝露量となり、発ガンリスクでは $1.5\sim 7.5\times 10^{-3}$ と推算された。生涯にわたってこの汚染水を飲用したとすれば、人口 10 万人あたり 150~750 人の発ガン傾向の増加が見積もられる。現地 NPO(ENFO, 2004)や JICA などが実施した疫学調査でも同程度の健康リスクが報告されており、きわめて深刻な状況と判断される。

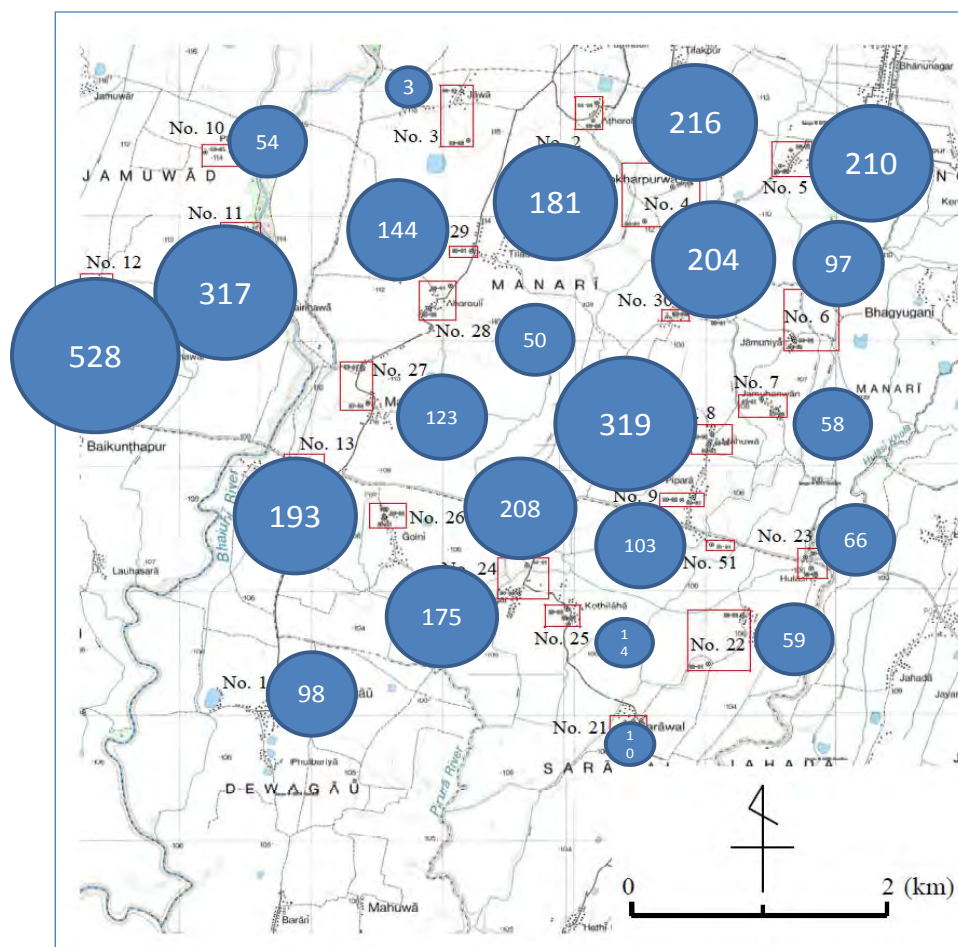


図 4.4.2 採取した地下水中のヒ素濃度の分布（単位：ppb）

表 4.4.1 地区ごとの地下水中の溶存イオン濃度

No.	Name of places	As	Co	Fe	Mn	B
1	Patkhauli	14	0.048	260	5	38
2	Atharahati	82	0.072	57	330	30
3	Jawa	3	0.580	20	1500	140
4	Khokharpurwa	1800	0.064	55	43	220
5	Suryapura	2	0.160	24	15	34
6	Jamuniya	130	0.140	23	140	45
7	Jamuhanwan	29	0.170	51	160	35
8	Mahuwa	19	0.064	19	2	170
9	Pipara	55	0.330	55	17	71
10	Paratkar	73		15	92	55
11	Kachanhawa	27		44	93	190
12	Kunawar	5	0.120	100	210	29
13	Patkhauli	680		20	20	120
14	Dewagau	8		22	69	160
15	Phulbariya			14	30	64
16	Barari	10	0.044	690	180	33
17	Mahuwa	5		35	56	35
18	Hathi Banahawa	1	0.024	100	640	23
19	Gobarhiya		0.059	39	24	120
20	Majhauni	3		88	2	25
21	Sarawal	27	0.100	600	660	25
22	Janakpur	71	0.052	72	190	25
23	Hulasi	140		480	48	40
24	Shrinagar	590		120	10	68
25	Kothilaha	70		830	18	37
26	Goini	550	0.036	21	4	71
27	Manari	210	0.092	82	70	72
28	Aharauli	61	0.084	330	36	30
29	Tilauli	48	0.060	86	38	23
30	Patani			11	4	170
	Maxmum	1800	0.580	830	1500	220
	Minimum	1	0.024	11	2	23
	Average	175	0.121	145	157	73

Unit: ppb

(2) ヒ素汚染との相関

ヒ素による地下水汚染が生じている井戸は調査全体の約 30%にもおよび、ほかに代替する井戸あるいは水道水源が無いことから住民による曝露の可能性が高いことが示唆される。図 4.4.2 に示したヒ素濃度の空間分布をみると、対象地域の中央部、北部で相対的に濃度が高い傾向がみられるが、局所的には 10ppb 程度の低濃度の地域も多くみられる。また、シワリク丘陵の近傍やインド国境寄りの地域では、一般にヒ素の濃度は低い傾向にあり、地下水の流動や流向の影響も示唆される結果となっている。地下水中のヒ素が高い地域では、ORP や DO の値が低く還元的あるいは嫌氣的な地質環境にあることが確認されている。

図 4.4.3 は、地下水中のヒ素濃度と ORP の関係を示したものである。ORP の値が -100mv から -200 mv のように低い地下水では、ヒ素の濃度が 200ppb を超過するケースが多くなっている。このほか、ヒ素と相関の高い元素としては、鉄、ホウ素、フッ素などがあげられる。ヒ素は三価の鉄と反応して共沈現象を生じることが知られており、ホウ素とフッ素は沖積層の沈積メカニズムとの関係が推察される。また、井戸の深度とヒ素濃度との関係では、高濃度のヒ素は深度 12~24m の井戸で多く発生していることも明らかになっており、帯水層特性との関わりが示唆される結果となっている。

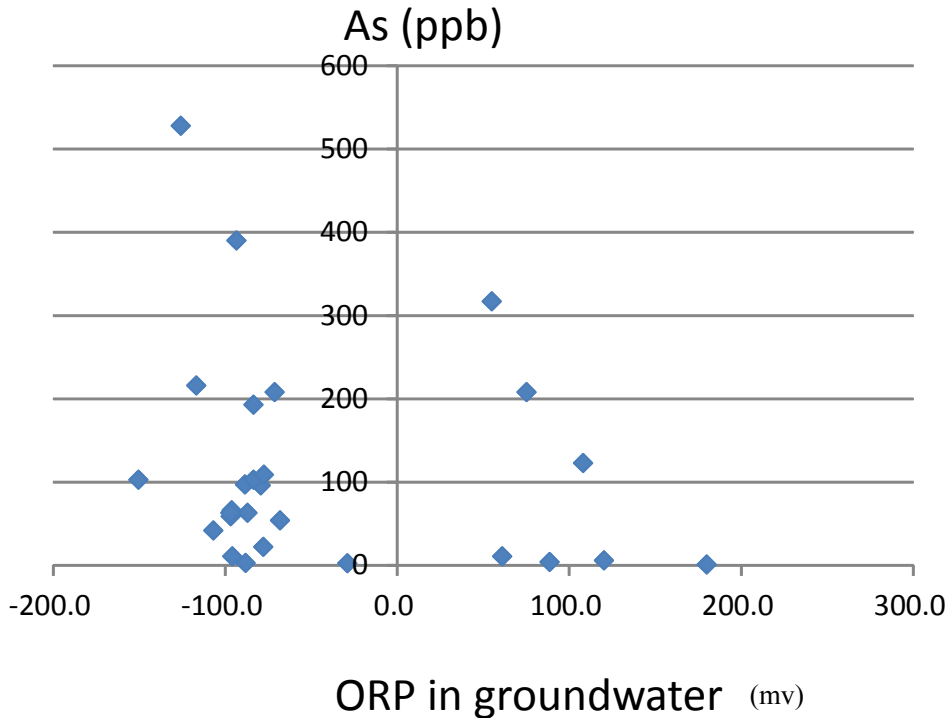


図 4.4.3 井戸水の酸化還元電位 ORP とヒ素濃度の関係

4.4.4 地球化学的特徴

(1) 地球化学的考察

地下水中のヒ素の起源および地層中の動態を明らかにするため、堆積物試料の詳細な観察および化学分析を実施した。井戸の深度と堆積物中のヒ素含有量との関係を示した図4.4.4の折れ線グラフは、堆積物中のヒ素の含有量（底質試験法，XRF）である。また、深度方向のヒ素の含有量の変化を図4.4.4に示す。また、深度方向のヒ素と鉛の含有量分布を図4.4.5および図4.4.6に示す。帯水層を構成する堆積物（細粒砂，粗粒砂）のヒ素の含有はきわめて少量であり、いずれも1 mg/kg程度であった。当初、ヒ素が帯水層内に濃集され、地下水を経由して移動すると思ったが、この仮説は否定された。むしろ、ヒ素は帯水層の間のシルト粘土層に多く含有し、XRFによる含有量は10~20mg/kgであった。一般環境と比べて特段の高濃度とは考えられないが、砂層と比べると数倍の含有量を示した。フッ素は帯水層の近傍に多く含有し、逆にクロムはシルト粘土の層に多く含有することも分かった。帯水層と難透水層を構成する化学組成に差異があることから、堆積した沈積粒子の母岩が異なることが推察される。XRDによる定性的な解析結果によれば、シルト粘土層には粘土鉱物や緑泥石のような風化鉱物が含まれ、帯水層には石英や長石のような造岩鉱物が多く含有することも分かった。これらのことから、ヒ素は堆積物の沈積プロセスにおいてシルト粘土層に集積し、それが地下水汚染の起源となっていることが考えられる。

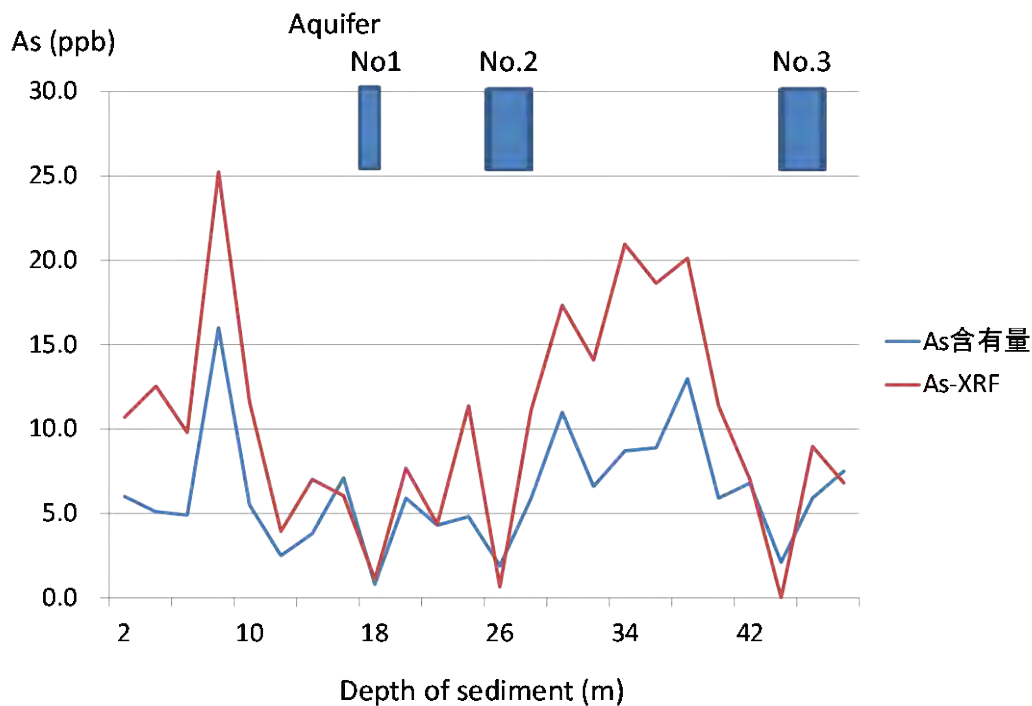


図 4.4.4 井戸の深度と堆積物中のヒ素含有量との関係

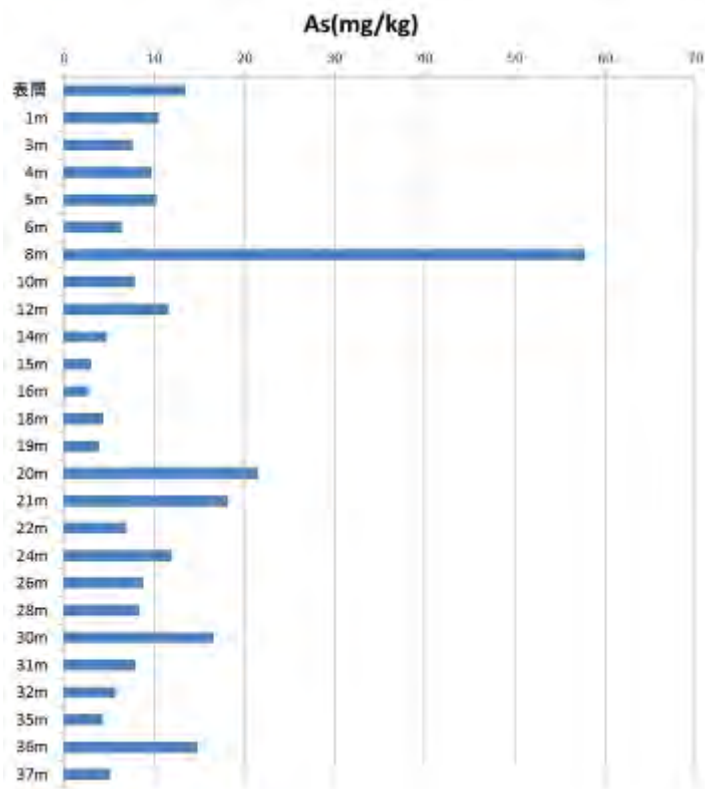


図 4.4.5 ヒ素の含有量と堆積物深度の関係

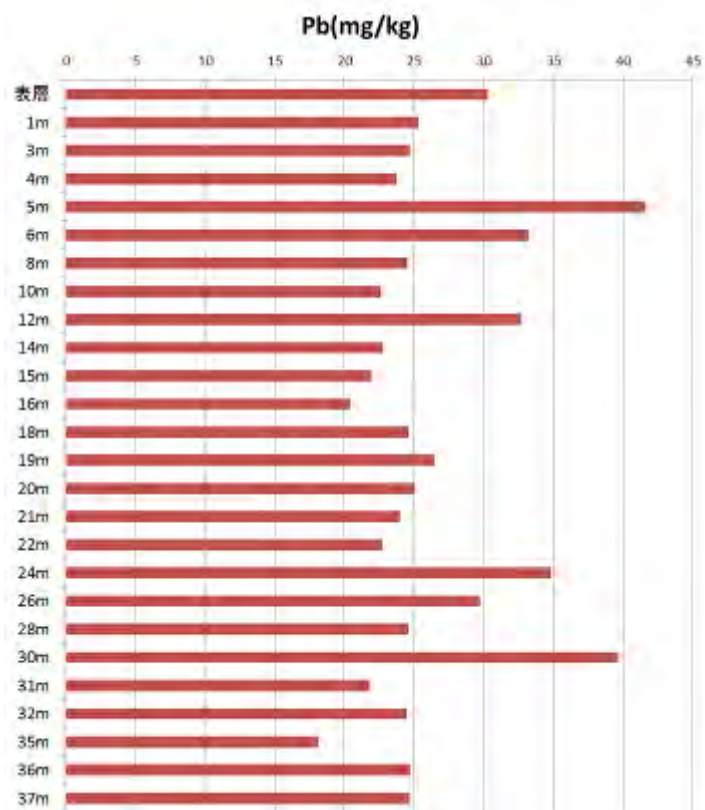


図 4.4.6 鉛の含有量と堆積物深度の関係

次に、堆積物から地下水へのヒ素の動態について地球化学的な考察を行う。各帯水層におけるヒ素の濃度分布を調べると、シルト粘土層に蓄積されたヒ素は、通常の酸化環境ではほとんど溶出しないことが分かる。一方、第二帯水層の近傍には層厚のピート層と難透水層が上部と下部に存在するため還元的な地質条件となっており、ヒ素が容易に溶出する環境条件となっている。図 4.4.7 に示した ORP とヒ素濃度の関係、井戸深度とヒ素濃度の関係なども、このようなヒ素の動態をよく裏付けている。また、第一帯層および第二帯水層で溶出した高濃度のヒ素は、その下部の層厚のシルト粘土層に妨げられて第三帯水層には到達しないため、30m 以深ではヒ素を含まない安全な地下水を供給できると考えられる。今後、現地に特有な地質環境におけるヒ素濃集や曝露防止の方策について、現地調査を継続する予定である。

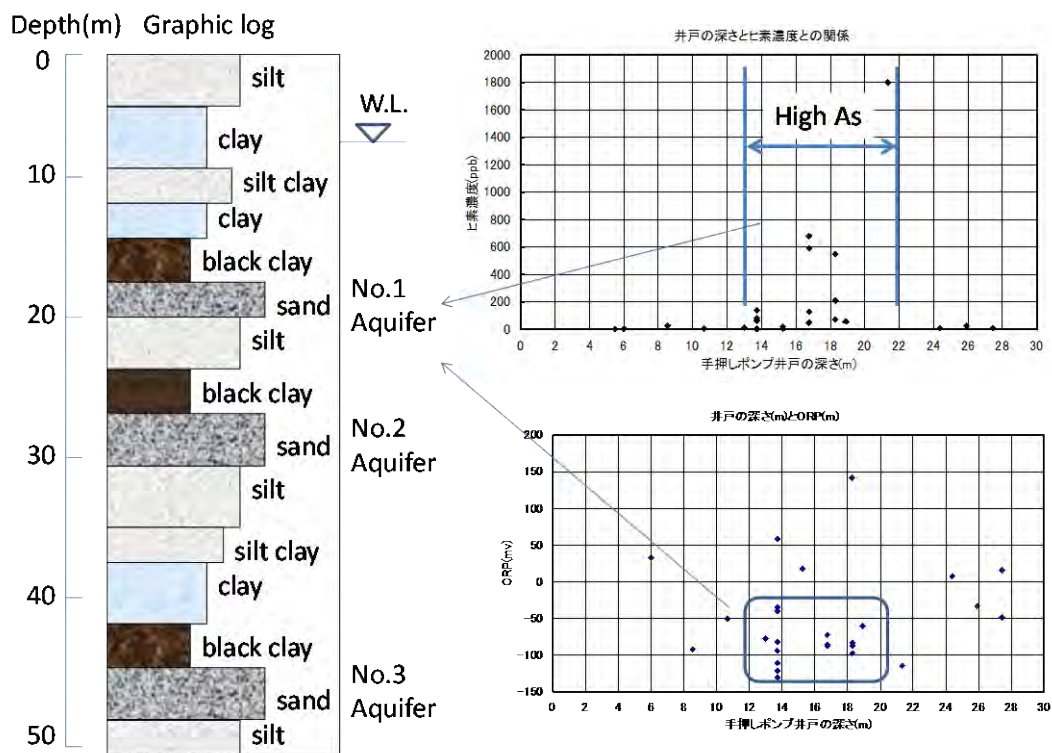


図 4.4.7 地質および帯水層の構造と ORP、井戸深度の関係

4.4.5 まとめ

ネパール・テライ低地にみられる地下水中のヒ素汚染について、現地調査および環境モニタリング、井戸掘削による堆積物の観察と化学分析を実施して、ヒ素の濃集メカニズムと堆積物から地下水への溶出の動態について考察した。その結果、ヒ素は帯水層間のシルト粘土層に濃集され、嫌氣的な地質環境において地下水中に高濃度で溶出する可能性が示唆された。本研究で得られたこれらの知見は、井戸の構造改善や安全な地下水の飲用指導、曝露リスクの防止など、今後ヒ素の対策や健康リスクの回避を実施する上で、有益な科学的な情報を与える。

参考文献

- 川辺能成・駒井武 2008 : 地圏環境リスク評価システム GERAS の開発. Green Report, 11-12.
- 国際協力事業団 2010 : ネパール国ナワルパラシ郡における地域社会のヒ素汚染対策事業報告書.
- 末永和幸・筒井康美・谷正和 2012 : ネパール・ナワルパラシ群の地下水ヒ素汚染状況と帯水層特性. 第 17 回アジア地下水ヒ素汚染フォーラム講演要旨, 19-22.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008 : ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査. 環境情報研究, No.16, 14-23.
- 駒井 武・大岡健三・中村圭三 2014 : ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染の現地調査および対策. 環境地質学論文集, 24, 51-56.
- ENPHO, 2004 : The State of Arsenic in Nepal –2003, prepared by Environment and Public Health Organization (ENPHO) for National Arsenic Steering Committee (NASC).
- Gurung, K., H. Ishige and M. Khadka, 2005 : Geological and geochemical examination of arsenic contamination in groundwater in the Holocene Terai Basin, Nepal. Env. Geol., 49, 98-113.

5. 住民と生活に関する実態研究

生活用水として日常利用（飲用）されている井戸（地下水）利用と集落の生活実態について明らかにするため、ヒ素汚染地域にある集落を対象に、聞き取り、アンケート調査を行った。ここでは、集落の民族的背景や井戸利用の実態とヒ素汚染の状況および住民の水利用に対する意識や生活等の実態および、飲用水利用の課題や対策等についても考察した。

5.1 住民に関する研究

5.1.1 ネパールの宗教・民族・カーストの概要

ネパールの宗教は2011年推定で、ヒンドゥー教（Hindu 81.3%）・仏教（Buddhist 9.0%）・イスラム教（Muslim 4.4%）、その他宗教と多様である（Source US CIA）。2001年との比較でヒンドゥー教（80.62%）が微増し、仏教（10.74%）が1.74%減少しイスラム教（4.20%）も0.2%減少している。かつて国教とされたヒンドゥー教が主要な宗教である。ネパールではヒンドゥー教と仏教が混在して祭られる伝統的寺院も少なくない。

ネパールの推定人口は30,986,975 (July 2014 est.)であり、隣国インドや中国と同様、多民族国家である。ネパールの民族（Caste/Ethnicity）は2011年のセンサス（国勢調査）によると125グループに及ぶ。カトマンズ盆地で繁栄したネワール族と、ヒマラヤに近い北部の山岳地帯に住む民族はともにチベット・ビルマ語系の民族である。カトマンズ盆地にいるネワール族と、ヒマラヤに近い北部の山岳地帯に住むタマン族・マガル族・グルン族・タカリー族などの民族はともにチベット・ビルマ語系である。一方、南部のテライ低地には北インド系の住民（マイティリ族・ポジブリ族など）が多く居住する。今でも文化的にはインドに近く、ヒンドゥー教が中心でイスラム教徒も少数存在する。テライには先住民族であるタルー族が多く居住するが集落ごとに方言があり、その民族性は多様である。タルー族には鎌形赤血球など耐マラリアの遺伝的特性がある。調査地域の周辺では8割以上がタルー族といわれ、マラリアが撲滅される1950年代までは、テライには他の民族はほとんど居住しなかった。マラリアをもたらす蚊が生息しない丘陵地帯から比較的カーストの高い民族がテライに移住し土地を占拠したのは1950年代以降である。

ネパールでは、パルバテ・ヒンドゥー（山地のヒンドゥー教徒）や北インド系民族を中心に、カースト制度が独特な形で残っている。都市化や近代化にともないカースト制度も多少変容してきているが、いまだカースト制度は社会に強い影響力を持っている。多くの人々はそのカースト（身分）ごとにそれぞれのコミュニティ内で生活している。同じカースト同士としか結婚しない地域、カーストによって職業が決まっている地域、高カーストの子どもが低カーストの大人を呼び捨てにする地域などが今でも残っている。

次に、カースト制度及び調査地域の最下層（不可触カースト）に関して考察する。ネパールのカースト制度は、上位から、バフン(Bahun, ブラフマン Brahmin, 聖職者)→チェットリ Chhettri (クシャトリア kshatriya, 王侯・武士)→バイシア (Vaiśya, 商人)→ダリット (Dalit, 不可触民) という順に、ヒンディー社会では4つの社会集団に序列づけられている。ネパールでは、インドでバイシアの下層に位置付けられているシュードラ (Śūdra, 隷属民・農民)とダリットをほぼ同一視しているようである。タルー族など各地域に居住する Janajati (少数民族) はチェットリの下層に位置し、バイシアと同位置とされるが、ネパール王政下ではカースト枠外で単純労働者や農民として搾取された歴史がある。

ネパールにおいて上位カーストのバフンとチェットリは人口の約30%であるが、政治家

や公務員の約 70%を占めている。一方、全人口の 15%程を占めるダリット等は、ほとんど公職には就けない状況である。

5.1.2 調査地域における民族・カースト・宗教

文化人類学や社会学では一般的にネパールの社会制度を、カーストに属するグループ、ネワール族及び少数民族、ムスリム、その他に区分して研究している。しかし、テライにおいて、その民族や社会制度はかなり複雑でありいくつもの解釈がある。例えば、高地・丘陵からの移住者とテライ先住民族という大きな区分を前提に、移住者の区分は①カースト（階層グループと Dalit 不可触民）、②Janajati（少数民族）、③ネワール、④ムスリムその他、という 4 区分である。もう一つのテライ先住民族を主体とした区分の解釈は、①カースト職業グループ、②Dalit 不可触民、③Janajati（タルー民族と他の少数民族）、④ムスリム、⑤その他、といった区分けである。つまり民族・カースト・宗教の各要素が重複したり孤立したりしており統一した明確な区分けがかなり困難であることがわかる。このような混沌とした社会制度を前提に調査地域の聞き取り調査について次の通り報告する。

5.1.3 現地（アンケート）調査

ネパールナワルパラシ郡パラシ東部にあるマフワとコカプルワの 2 つのワード（集落）における聞き取りアンケート調査（2014 年 3 月）の結果を表 5.1.1～表 5.1.4 に示す。調査件数は、マフワ 85 件、コカプルワ 58 件、総数 143 件である。なお、タルーは北インド系の先住民族、バフンはブラフマン同様にカースト最上位で、ネワール族はカトマンズ盆地の歴史的居住者、カミは鍛冶屋などの職業カースト、そしてヤダブはカーストの上位チェットリ（クシャトリア）階級に属する。一方、カースト区分のブラフマンは最上位、チェットリは貴族や軍人等、バイシアは商人クラス、シュードラは隷属民・農民、ダリットは不可触民、ムスリムはイスラム教徒を指す。民族とカーストの関係を図 5.1.1 に示す。

表 5.1.1 2 集落の民族（アンケート個数）

集落	数（戸）	民族・カースト・数（戸）（%）
マフワ	85	タル 68(80%), カミ 4(5%), ヤダブ 2(2%), その他 11(13%)
コカプルワ	58	タル 46(79%), バフン 10(17%), ネワール 1(3%), その他 1(2%)
総数	143	タル 114 (80%), バフン 10(7%), カミ 4(3%), ヤダブ 2(1%), ネワール 1 (1%), その他 12(8%)

表 5.1.2 2 集落のカースト（アンケート個数）

集落	数（戸）	カースト・数（戸）（%）
マフワ	85	ブラフマン 0(0%), チェットリ 6(7%), バイシア 59(69%), シュードラ 0(0%), ダリット 10(11%), ムスリム 10(11%)
コカプルワ	57	ブラフマン 10(20%), チェットリ 0(0%), バイシア 46(84%), シュードラ 0(0%), ダリット 1(1%), ムスリム 0(0%),
総数	142	ブラフマン 10(7%), チェットリ 6(4%), バイシア 117(75%), シュードラ 0(0%), ダリット 11(8%), ムスリム 10(7%),

表 5.1.3 2 集落の宗教（アンケート個数）

集落	数（戸）	宗教・数（戸）（%）
マフワ	84	ヒンドゥー 74(87%), ムスリム 10(11%)
コカプルワ	58	ヒンドゥー 58(99%),
総数	142	ヒンドゥー 132(87%), ムスリム 10(11%)

表 5.1.4 民族とカーストの関係

		カースト					合計
		ブラフマン	チェットリ	バイシヤ	ダリット	その他	
民族	チェットリ	0	0	1	0	0	1
	バフン	9	0	0	0	0	9
	タルー	0	0	96	1	0	97
	ネワール	0	0	1	0	0	1
	カミ	0	0	0	4	1	5
	ヤーダブ	0	2	0	0	0	2
	その他	1	5	1	10	10	27
	合計	10	7	99	15	11	142

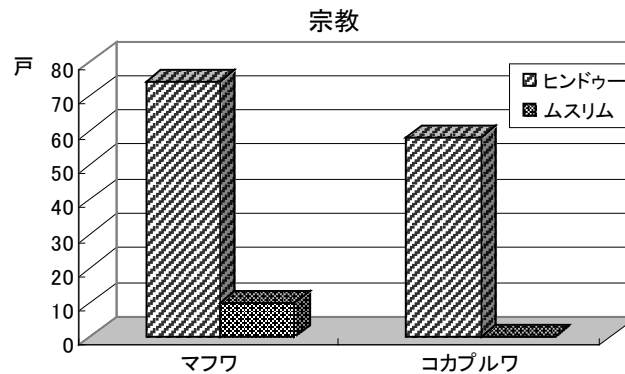
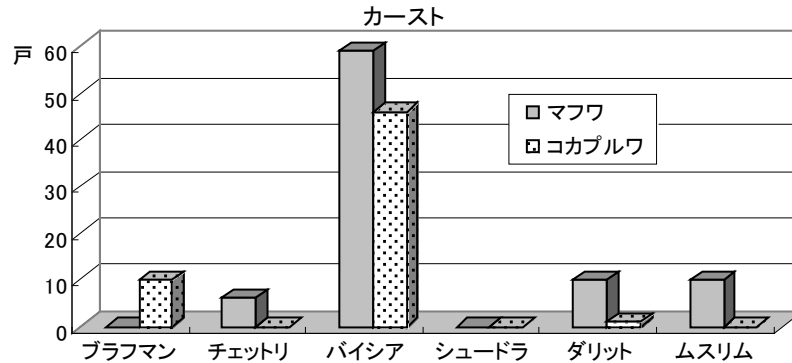
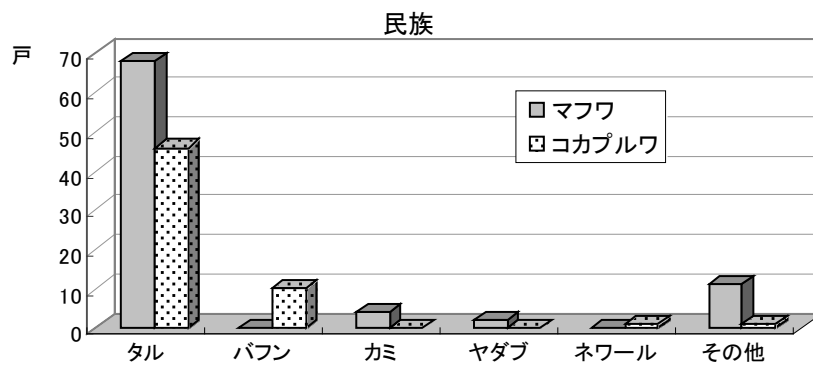


図 5.1.1 マフワとコカプルワにおける民族、カースト、宗教の実態

5.1.4 ワード内の居住域分布

民族・カースト・宗教の違いによる集落内の居住域の分布をみると、両集落ともダリットは村のはずれ(両端)に居を構えている。なお、ワードは日本の集落に該当するユニットである。今回の調査 2 集落であるマフワとコカプルワでは、マフワのみにムスリムがみられた。彼らはワードの中央部の集合住宅に居住しており、敷地内に礼拝用の小さなモスクを設けている。

マフワでダリットの割合が 11%と高いのは、差別意識が強いバフンが居住していないため、ダリットにとってはコカプルワよりも居住環境が良いと思われる。ダリットは、飲用水の水源への接触禁止、寺院・ホテルなど公共の場所への入場禁止、祝宴などでの高位カーストとの同席禁止など種々の差別を受けている。ダリットは、共同井戸の水の利用が不可であり、接触したら聖水で清めなければならない。ムスリムも不浄カーストに区分されるが、共同井戸の水は利用不可であるが、接触しても聖水で清めなくても良いカーストである。都市部では、カーストによる差別は無くなりつつあるが、僻村ではまだこのような差別がみられる。調査地域のダリットは、現在井戸を共同で所有しているため、水に関してはカーストによる差別問題は生じていないように思われる。家屋は、収入が少ないためか簡素な造りとなっている(写真 5.1.1)。バフンの家屋は、レンガ積の壁、柱にモルタルを上塗りしペイント塗装を施したものである(写真 5.1.2)。



写真 5.1.1 簡素な造りのダリットの住居



写真 5.1.2 レンガにモルタル、ペイント塗装したバフンの住居

教育関係では、1~8年生(基礎教育)まで授業料は無料だが、貧しい環境にあるダリットは、10年生まで無料となっている。コカプルワの学校ではダリットに年間 400 ルピーの奨学金を与えている。ダリットの卒業生の中には、エンジニアなど高度な技術を有する職業に就いているものもいる。下層カースト、特にダリットの地位向上が今後望まれる。

補：2001年センサス(国勢調査)では、全国の識字率は男性 65%、女性 42.9%であるのに対して、ダリットは男性 33.9%、女性 12%と低い。全国平均で一人当たりの年収が 210 ドルであるのに対して、ダリットは 39 ドルに過ぎない。また、全体の平均寿命が男性 59.3 歳、女性 59.8 歳であるのに対して、ダリットは男性 50 歳、女性 48.3 歳と全国平均をかなり下回っている。(SOURCE: 2015 CIA WORLD FACTBOOK AND OTHER SOURCES)

5.2. 飲料水・生活用水等に関する研究

5.2.1. 調査地域および内容

調査地域は、ネパール中央南部テライ低地のルンビニ県ナワルパラシ (Nawalparasi) 郡パラシ (Parasi) の東方 5km 付近の東西約 6km, 南北約 10 km の範囲内に位置する集落である。ここは米作を主とした二毛作の農業地帯であり、5 つの村 (Jamwad, Tilakpur, Manari, Dewagau, Sarawal) に位置する集落を対象とした (図 5.2.1)。

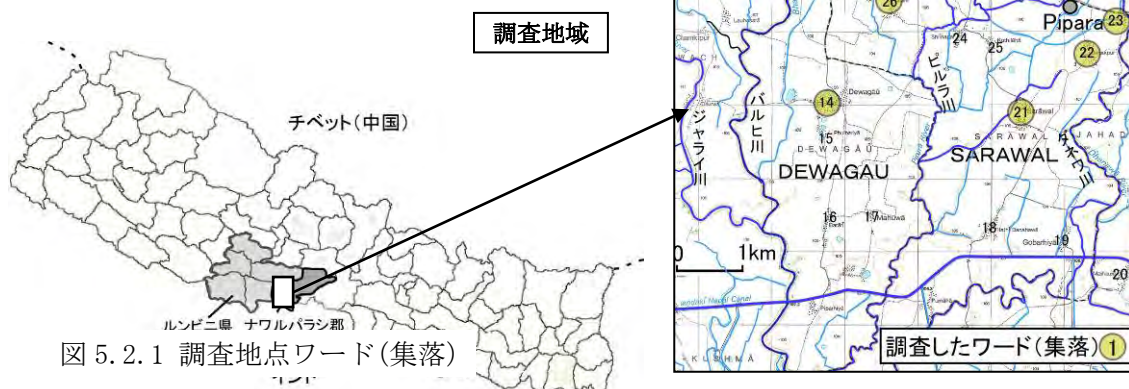


図 5.2.1 調査地点ワード(集落)

2012年3月3日～3月6日に行った現地調査では、25の集落内にある複数の井戸における100箇所の井戸利用状況(観察と聞き取り)調査と水利用に関する住民116人への聞き取り方式のアンケート調査をネパール人現地スタッフの協力のもとで実施した。

表 5.2.1 調査地域における集落別調査対象井戸数およびアンケート数

集落(Word)名	調査井戸数	アンケート数	集落(Word)名	調査井戸数	アンケート数
1 Patkhauri(パトカウリ)	5	6	21 Sarawal(サラワル)	4	3
2 Atharahati(アサハラティ)	4	4	22 Janakpur(ジャナクプル)	4	7
3 Jawa(ジャワ)	5	7	23 Hulasi(フラシ)	3	3
4 Khokharpurwa(コカプルワ)	7	6	24 Shrinagar(スリナガル)	7	9
5 Suryapura(スリヤプラ)	3	4	25 Kothilaha(コティラハ)	6	6
6 Jamuniya(ジャムニヤ)	3	3	26 Goini(ゴイニ)	4	3
7 Jamuhanwan(ジャムハンワン)	4	4	27 Manari(マナリ)	5	2
8 Mahuwa(マフワ)	3	6	28 Aharauli(アハラウリ)	3	6
9 Pipara(ピパラ)	4	5	29 Tilauli(ティラウリ)	2	3
10 Paratkar(パラティカル)	3	6	30 Patani(パタニ)	2	4
11 Kachanhawa(カチチャンハワ)	2	4	31 Tilakpur(ティラクプル)	5	4
12 Kunawar(クナワル)	4	3	51 9. Pi para(ピパラ)の学校	1	
13 Patkhauri(パトカウリ)	4	4			
14 Dawagau(ダワガウ)	3	4			
			26地点	100	116

表中の番号は、調査にあたって事前に付した整理番号である。15～20は調査対象とせず、記載なし。

さらに、2014年3月1日～4日には、2012年の調査をもとに、ヒ素汚染問題が大きいと思われる2つの集落(マフワ Mahuwa, コカプルワ Khokharpurwa) (図 5.2.1 の⑧と④, 図

5.2.2) を対象に全井戸を目安に、住民の生活と飲料水、井戸の種類、設置年、深さ、利用目的、水の量・味や質、砒素汚染・病気の有無、雨水の利用と意識、水利用での要望および民族、宗教などについて聞き取りアンケート調査を行った。

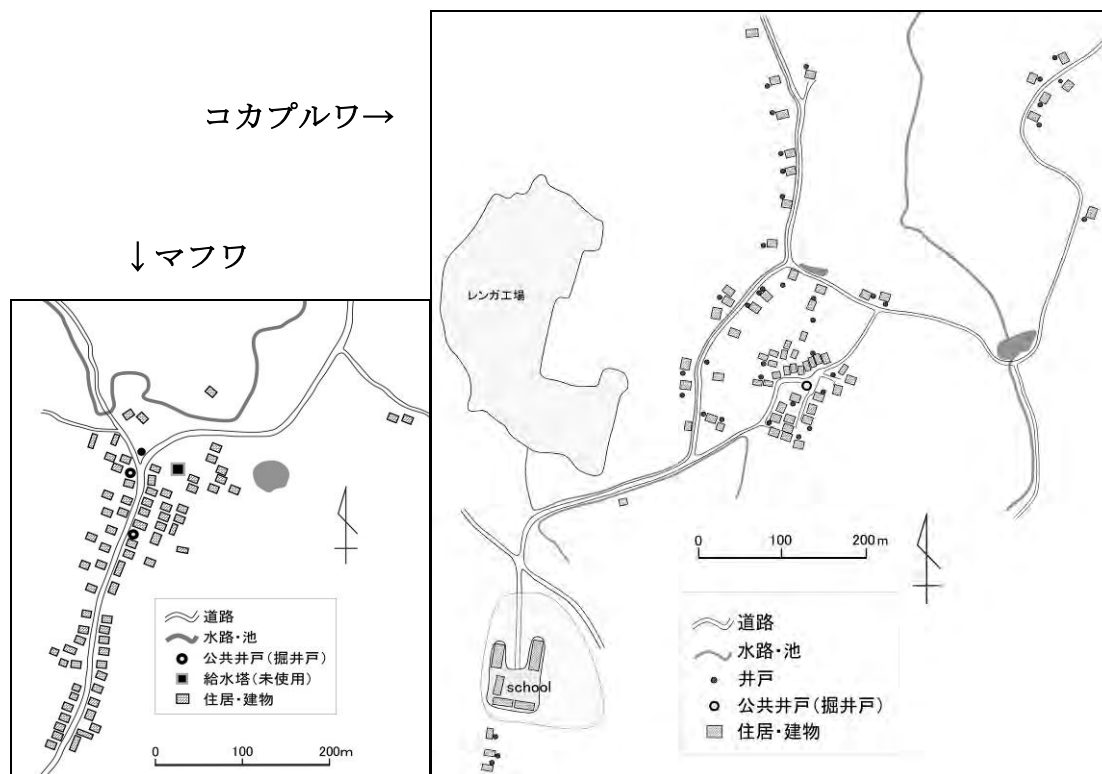


図 5.2.2 2014 年 3 月調査の集落（マフワ，ココプルワ）

5.2.2. 調査結果の概要

(1) 2012 年調査（聞き取り調査）

表 5.2.2 は調査した 25 の集落で聞き取り確認した（全ての井戸ではない）井戸の種類、設置年、深さ等について整理したものである。井戸の種類は、管井戸が 79、掘井戸（現地でイナーと呼んでいる手掘の伝統的井戸）が 18 箇所および水道が 3 箇所であった。井戸の深さは、掘井戸については、設置年が古いと思われるが、いつごろからあったという正確な設置年はわからない。聞き取りでは、100 年以上前からあったという回答が多く、深さについては回答が得られなかったが、現地で計測した。利用されている掘井戸は、5.25m（集落 25 のコティラハ Kothilaha）～8.2m（集落 27 のマナリ Manari）の深さ（井戸底）がある。管井戸については、得られた回答数 74 箇所のうち、60 フィート（18.3m）（30 井戸）～80 フィート（24.3m）（24 井戸）のものが多く、60 フィートと 80 フィートで全体の 73% を占めている（図 5.2.3）。

管井戸は近年の設置が比較的多く、10 年以内の設置が 52 箇所であり半数を超えている。1 年以内の設置も 18 箇所（全体で 18%、管井戸で 23%）あった（図 5.2.4）。

表 5.2.2 ワード別調査井戸の状況 (聞き取り調査による)

番号	Word(ワード・集落)	調査地点井戸調査内容(聞き取り)																					
		1			2			3			4			5			6			7			
		飲用	設置年	深さ	飲用	設置年	深さ	飲用	設置年	深さ	飲用	設置年	深さ	飲用	設置年	深さ	飲用	設置年	深さ	飲用	設置年	深さ	飲用
1	Pakthauli(バトカウリ)	○	40年前	35	45	○	55	16年前	x	56	11年前	40	35年前										
2	Atharahati(アサラチ)		4カ月前	45	(2.53)、5.25	x	45	15年前		40	40年以上前												
3	Jawa(ジャワ)	○	25年前	20	(3.32)、6.78	○	75	150年前	○	20	22年前	18	2年前										
4	Khokharpurwa(コカプルワ)		10年前	学校100	学校40	x	65	4カ月前	○	3.10)、5.30	120年前	150	1カ月前	75						x	65	12年前	
5	Suryapura(スリヤブラ)	○	4年前	18	45	○	55	5年前	水道														
6	Jamuniya(ジャムニヤ)	○	3年前	55	55	○	55	6年前															
7	Jamuhanwan(ジャムハンワン)			不明	不明	○	40	10年前	○	35	10年前												
8	Mahuwa(マフワ)	○	150年前	(4.95)、9.30	(3.25)、5.65	x	65	200年前															
9	Pipara(ピバラ)	○	7年前	60	(2.15)、2.55	○	55	150年前	○	55	10年前												
10	Paratikar(パラタイカル)	○	1年前	65	95	○	65	20年前															
11	Kachanhawa(カチヤンハワ)	○	22年前	82	69	x	69	20年前															
12	Kunawar(クナワル)			不明	不明	○	65	200年前	○	65	6カ月前	OF	8カ月前										
13	Pakthauli(バトカウリ)	○	9年前	65	不明	○	水道	6カ月前	x	65	10年前												
14	Dawagau(ダワガウ)	○	1年前	55	150以上	○	60	6年前															
15	Phulbariya(フルバリヤ)																						
16	Barar(バラ)																						
17	Mahuwa(マフワ)2																						
18	HathiBanahawa(ハチバナハワ)																						
19	Gobarhiya(ゴバリヤ)																						
20	Majhauni(マジャウニ)																						
21	Sarawai(サワール)	○	3年前	学校60	(6.55)、7.45	○	175	2012年2月	○	45	25年前												
22	Janapur(ジャンナクプル)	○	11年前	60~70	不明	○	55	6年前	○	45	12年前												
23	Hulasi(フラス)	○	30年前	45	45	○	45	9年前															
24	Shrinagar(シリナガル)	○	5年前	60	(2.55)、5.60	○	60~70	15年前	○	60~70	8年前	60~70	2年前	60~70	10年前	60~70	15日前						
25	Kothihaha(コチイラハ)		不明	(2.85)、5.25	60~70	○	45	2年前	○	45	40年前	45	25年前	45	15日前								
26	Soini(コイニ)	x	5年前	75	(2.15)、3.40		水道	6カ月前	x	70	4年前												
27	Manar(マナリ)	x	11年前	75	(5.42)、8.20	x	65	200年前	○	65	1年前	170	1カ月前										
28	Aharauli(アハラウリ)	OF	10年前	42	(3.45)、6.15	○	38	40年前															
29	Tilauli(ティラウリ)	OF	20年前	60	45	○		3年前															
30	Patani(パタニ)	○	6カ月前	65	(3.15)、5.85	○		150年前															
31	Tilakpur(ティラクプル)	○	8年前	65	(5.60)、7.58	x	55	不明	○	38	11年前	65	5年前										
51	P. para(ピパラ)の学校		3年前	学校45																			

深さ単位: フィート(1 ft = 0.3048 m) 表中の井戸種類: PUMP井戸 F INAR井戸 水道

INARの深さは実測、単位はm。()は水面までの深さ。INAR以外は聞き取りによる。単位はフィート

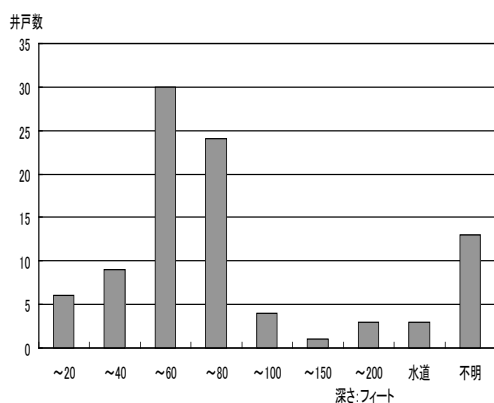


図 5.2.3 深さ別井戸数および水道の区分
(聞き取りによる)
(不明は井戸の深さが確認できないもの)

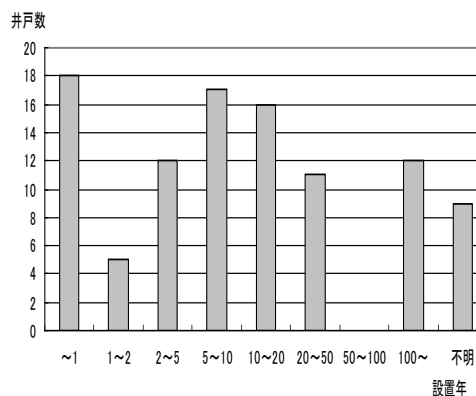


図 5.2.4 井戸等水利施設設置年
(聞き取りによる)
(不明は井戸の深さが確認できないもの)

(2) 井戸の深さ、設置年とヒ素被害の関係

図 5.2.5 は、管井戸 (79 本) の深さとその設置年について井戸ごとに示したものである。管井戸 (鉄管井戸) は 40 年ほど前から設置がみられ、それ以前は、掘井戸依存であったと思われる。40 年ほど前から普及し始めた管井戸は、最初は 20~40 フィート (6.1m~12.2 m) の深さの井戸が掘られた。次第に深い井戸が掘られるようになり、20 年前頃からは 50~70 フィート (15.2m~21.3m) の井戸が多く掘られ、現存する井戸は 50~70 フィートのものが多いになっている (2014 松尾他)。近年、80 フィート (24.4m) 以上の深さの井戸が、個人及び政府支援 (JICA, ENPHO, UNICEF など) によって掘られているが、一部にしか利用されていない状況である。

図 5.2.6 は、ヒ素の検出で飲用していないと回答があった 10 ヶ所の井戸の深さと設置年について示したものである。飲用されていない井戸は、45 フィート (13.3m) ~75 フィート (22.5m) の深さのもので、20 年以内の設置のものである。同様の深さと設置年のもので飲用しているものが存在することから一概には言えないが、45 フィート~75 フィートの深さの井戸でのヒ素被害があることがうかがえる。

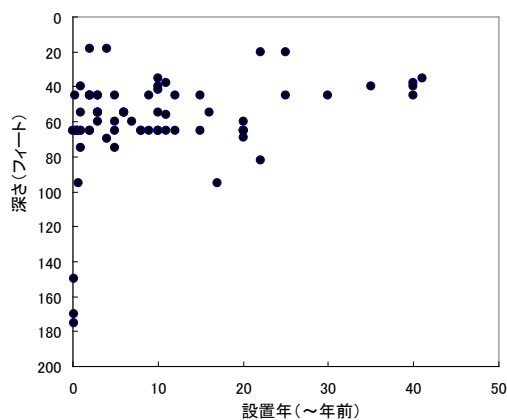


図 5.2.5 管井戸の深さと設置年の関係

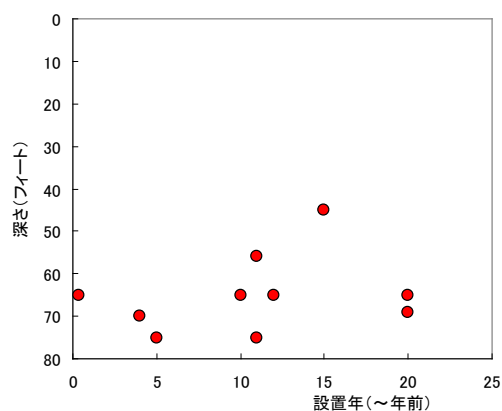


図 5.2.6 飲用に適さない井戸の深さと設置年の関係

2014年の調査におけるマフワ Mahuwa とコカプルア Khokharpurwa を井戸別に深さを示したのが図 5.2.7 である。マフワでは 55～65 フィート(16.8m～19.8m)の井戸が大部分で、50 フィート (15.2m) 以下がわずかにある程度である。そのうち約 30 フィートと 18 フィートの掘井戸(掘り井戸は実測、管井戸は利用者からの聞き取り)が 2 基含まれる。

コカプルアでは 65～75 フィート (19.8m～22.9m) が多いが、35 フィート (10.7m) 以下で 20 フィート程度の浅井戸の管井戸利用が多い浅井戸が得やすいということも特徴となっている。マフワとコカプルアでは利用する帯水層が 10 フィート (3m) ほどの違いがあるが、それは標高差約 5m があることや地層(帯水層)の分布状態の違いから相違があると思われる。なお、ヒ素濃度が高いのは、地域による差があるが、概ね住民の多くが利用している 50～75 フィート(15.2m～22.9m)の帯水層の地下水である。

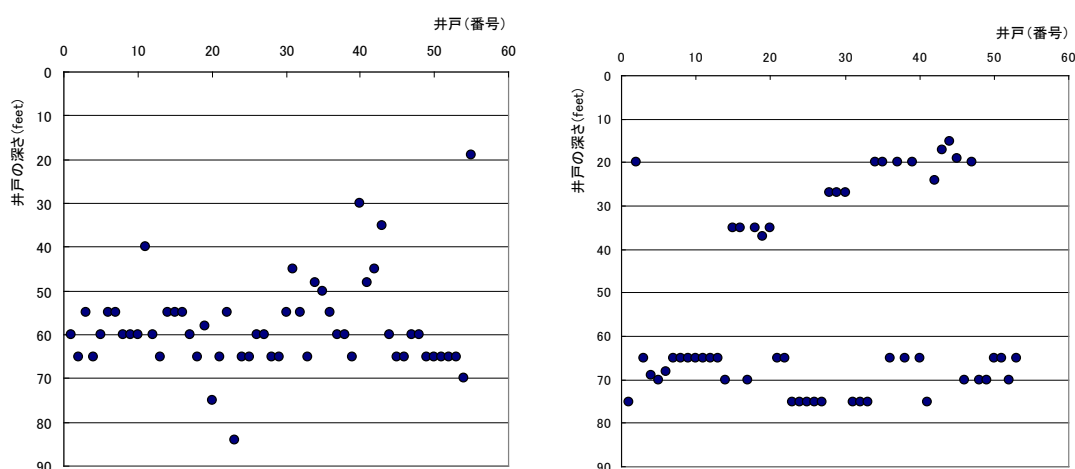


図 5.2.7 調査井戸別深さ マフワ Mahuwa (左), コカプルワ Khokharpurwa (右)

(3) 水利用の特色 (聞き取り, アンケートから)

調査地域における 2012 年および 2014 年の 2 回の現地の住民への聞き取り, アンケート調査による水利用の特色について, 以下に整理した結果概要を示す。

1) 第 1 回 (2012 年) 調査結果概要 (25 箇所の集落における調査による)

- ・ 調査地域 25 集落, 回収アンケート数は 117 件 (人)
- ・ 生活の水は, 主に井戸 (手押しポンプ) から得る
- ・ 水は比較的豊富で不便性は少ない。
- ・ 水を安心して飲む 54% (54 人), 不安 46% (46 人)。
- ・ 水はきれいで安心と感じる人が約半数 (47.3%・53 人)
- ・ 汚れ (汚染) を感じて不安を感じる人も比較的多い (32.1%・36 人)。
- ・ 水の味は美味しいと感じている人が比較的多い。
- ・ 水にヒ素が含まれているかは, 強く思う (12 人), 少し思う 68 人) 合わせて 69% がヒ素の不安を持っている。
- ・ ヒ素被害を知らない人も約 2% (24 人) いる。
- ・ 水はほとんどが生水で飲む。沸騰させて飲む人は 1 人。
- ・ ヒ素の病気あり (3 人), わからない (53 人)。
- ・ 雨水利用意識は少ない。水道, フィルターの要望が多い。
- ・ 水には恵まれて, 美味しい水があって不便はない様子である。

- ・ ヒ素の害に対する周知活動も行われているが、ヒ素被害認識が徹底して理解されていない様子である。

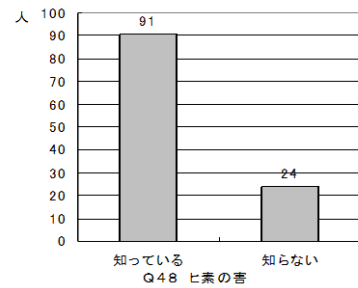
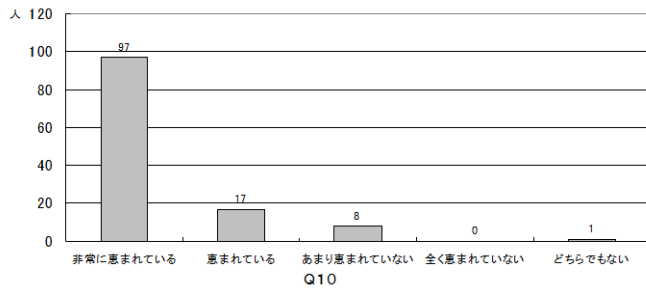


図 5.2.8 水に恵まれているかどうか

図 5.2.9 ヒ素の害に対する理解度

(2 図とも 2012 年 3 月、現地でのアンケート調査による)

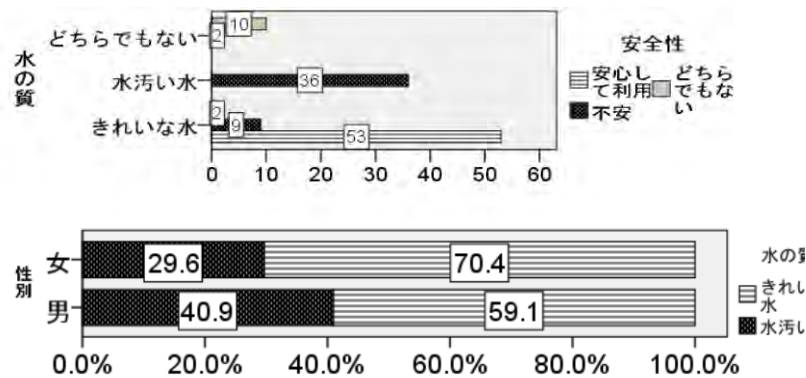


図 5.2.10 水の質と安全性について

2) 第 2 回 (2014 年) 調査結果概要 (マフワ, コカプルワの 2 集落調査による)

- ・ 男女比：男 52% (70 人), 女 48% (64 人)
- ・ 年齢別対象者：20～50 歳を中心にした年齢層。
- ・ 居住歴：30 年以上 47%, 20 年未満が 37.2% で人口増加している地域。
- ・ 就学歴：未就学 40% が多いが, 10 年～大学院までの就学 (9%) も比較的ある。
- ・ 利用井戸種類：イナー (INAR) 9 人 (6%), PUNP132 人 (91%)。
- ・ 自宅設置井戸：80% (115 人) が自宅に設置。
- ・ 井戸の敷設年数：5 年以内 - 55 (38%), 6～10 年 - 34 (23%) で近年の設置が多い。
- ・ 井戸の深さ：100 フィート以下で 60～70 フィートが多い。
- ・ 水利用には恵まれているが, 水質上不安であるという意識がある (図 5.2.11～図 5.2.13)。
- ・ 雨季・乾季の水利用の季節的違いは少ない (1, 2 回目)。
- ・ 25 集落調査では水はほとんどが生水で飲んでおり, 沸騰させて飲む人は 1 人あったが, 2 回目の 2 集落では 49 人 (33.8%) あった。
- ・ 水供給に対する要望は, 簡易水道設置 41 (82%) およびフィルター設置 82 (57%) が多い。
- ・ ヒ素の病気の経験者: 14 人 (9.7%) のうち半数の 7 人は医者に診てもらっていない。
- ・ フィルター使用: 49 (34%)。2 回目の調査では, フィルター使用が多いという印象

があった。なぜならば、1回目調査では全25集落でフィルター利用者は1人のみの回答であった。

3) 飲用水とヒ素被害に対する意識

2つの集落では、生活用水は、雨季・乾季の季節的違も少なく、水は井戸から得られることから、水には恵まれているという意識は強い(図5.2.11)。また、美味しいという回答も84%あった(図5.2.12)。しかし水質上不安であるという意識は約半数あった(図5.2.13)。

ヒ素の被害についても回答が得られた。ヒ素の病気の経験者が14人(9.7%)あり、そのうち半数の7人は医者に診てもらっていないということである。これは、これまでの生活上での習慣的なもの、近所に病院がないこと、経済的なこと、ヒ素に対する意識の問題等複雑に絡んでいると思われる。ただ、ヒ素除去フィルター使用者が49(34%)あったことから、ヒ素問題の啓蒙活動とその対策の手段の一つとして、フィルターの利用は浸透してきているものと思われる。なお、2012年1回目調査では全25集落でフィルター利用者は1人のみの回答であった。この結果の理由としては、2012年調査は各集落で3~7人(井戸利用者)へのアンケート数であり、数が少ない状況であったことから、フィルター利用者の該当者へのアンケートが結果的に得られなかった可能性があることや、マフワ、コカプルワの地域がヒ素の被害が出ていることから、飲み水への関心が比較的高い地域であると考えられる。それは、2012年1回目調査の25集落では水はほとんどが生水で飲んでおり、沸騰させて飲む人は1人だけであったが、今回の2集落では49人(33.8%)あったところにも水への意識の高さが窺える。

そうしたことから、この2集落では、簡易水道の設置41(82%)およびフィルター設置82(57%)の要望が高い数値を示していたことが、この地域が水供給への問題意識が高い地域であることが窺える。

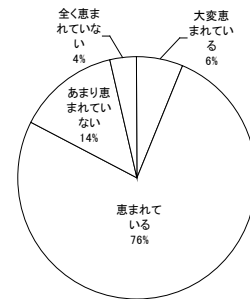


図 5.2.11 水の量について

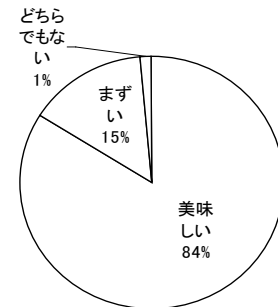


図 5.2.12 飲料水の美味さ

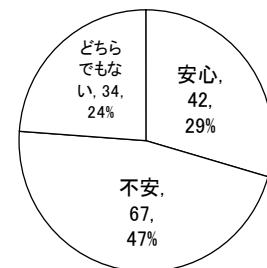


図 5.2.13 飲料水の安心度

参考文献

- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008a : ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査. 環境情報研究, No.16, 13-23.
- 中村圭三・大岡健三・Bhanu Bhakta Kandel 2008b : ネパールのテライ低地の井戸水利用に関する実態調査. 環境情報研究, No.16, 25-33.
- 松尾宏・中村圭三・谷地隆 2014 : ネパール・テライ低地農村の生活と水利用に関する研究. 敬愛大学総合地域研究, No.4, 110-126.
- 松尾 宏・中村圭三 2015 : ネパール・テライ低地における農村集落の水利用に関する研究. 敬愛大学国際研究, No.28, 33-49.

5.3 井戸の利用と形態に関する研究

5.3.1 利用井戸の分類

2012年3月および2014年8月に行った現地調査によって、各村々における水利用実態の概要を把握することができた。調査地域において住民が日常利用している水は、表5.3.1に示すように整理できる。住民の飲用生活用水は、ほとんどを井戸（地下水）に依存しており、地下水を各自で汲み上げて利用する井戸および電動ポンプを利用した水道がある。

利用されている井戸、水道等については、以下の様なものに整理できる（写真5.3.1～5.3.6）。水道は、水源である地下水を汲み上げ、給水塔に溜めて給水されている（写真5.3.1、写真5.3.2）。また、北部の山麓地域の伏流水からパイプを利用して引水し、複数の家に給水する形で利用しているものがあつた（写真5.3.3）。なお、日常の生活に密着しているのは、各家の内外および道路脇などに設置されている井戸である。その井戸には、現地でイナーと呼ばれる地上に開口部をもつ伝統的な掘り井戸（写真5.3.4）と地中に鉄管を打ち込んでポンプで汲み上げる管井戸がある（写真5.3.5）。管井戸には手押しポンプが取り付けられ、一部には小型モーターが取り付けられ揚水されているものもある（写真5.3.6）。

井戸の設置（敷設負担）は、個人で敷設したものが多いが、水質や敷設資金などの問題から、政府、赤十字、JICA支援（九大、ENPHO）などの支援により設置された井戸もある。

表 5.3.1 水利用施設の分類（聞き取りによる）

種類と利用形態		利用・設備・所有等の分類
井戸	種類	管井戸（手押しポンプ井戸、モーター付ポンプ井戸）、INAR（手で汲み上げる。手押しポンプ、モーター付もあり）
	井戸設置形態・負担	個人資金、政府、赤十字、JICA（ENPHO/九大）等の支援
	井戸水使用状況	個人使用、共有使用、その他（自由に利用）
水道	種類	外国（フィンランドほか）支援による給水塔が設置され、地下水を電動ポンプで汲み上げ、給水塔に溜めて給水する。
		山麓の伏流水から引水して利用（共同で給水）。



写真 5.3.1 水道用給水塔
（ゴイニ Goini）



写真 5.3.2 水道施設（ゴイニ）写真 5.1
の給水塔より配水される共同水場。利用
料金 70 ルピー/月、給水は 1 日約 2 時間



写真 5.3.3 山麓の伏流水からパイプで引水されている水道
(スリヤプラ Suryapura)



写真 5.3.4 煉瓦積の伝統的掘井戸
(コティラハ Kothiraha)



写真 5.3.5 一般的な管井戸
(マフワ Mahuwa)



写真 5.3.6 モーター付井戸
(コカプルア Khokharpurwa の学校)

5.3.2 掘井戸と管井戸利用の特色

掘井戸 (Inar, dug well) は、集落発生当初から利用されてきた自由地下水の浅井戸を利用したものであり、地表から垂直に掘って、地表に近い帯水層から地下水を汲み上げる開口部を持つ井戸である。現在残る井戸の設置年は不明であるが、100 年以上前より利用されているということである。水汲みの方法は、ロープを付けたバケツを井戸に落としてロープを引き上げるというもので、釣瓶竿や滑車などのかつて日本でみられたような水汲み手段の設備はない。

現在は、管井戸 (Tube well) の普及で、掘井戸は利用されなくなった集落もあるが、共同井戸として、日常利用されているところも少なくない。掘り井戸利用の特色について以下に整理した。

- ・ 水位が高く、水が得やすい (マフワ Mahuwa では掘井戸の利用が盛んであり、重要である)
- ・ 共同利用で雨季も乾季も自由に水が得られる。
- ・ 洗濯や農具等の洗いにも利用する。
- ・ 管を井戸中に入れ、管を通じて手押しポンプで汲み上げているケースも見られる。
- ・ 井戸は蓋がされていないものがあり、ゴミや汚れが入りやすく家畜の糞尿で汚染されやすい。

調査地域で現在使われる井戸は打ち込みによる管井戸が主であり、これらは各家で所有

しているものもあるが、多くは親族、近所との共同で利用されている。また、近所の人が自由に利用している井戸もあり、1軒の家で二つ所有している場合もある。その場合は、一つは飲料・炊事用として、もう一つはそれ以外の洗い物、水浴びなどに使っているなど、用途が別けられていることが多い。その背景には、井戸の汚染、ヒ素の検出の問題などが関係しており、かつて利用していた井戸が、検査でヒ素等の問題が出た場合、新しく掘削してそれを飲料用として使用し、それまで使用していた井戸は、飲用以外で使用する場合もみられる。なお、管井戸にはモーターが設置されるものがあるが、故障や電力供給の時間制限などの社会資本整備の問題もあり、モーター設置は利用上の必須条件とはなっていない。なお、掘り井戸や管井戸等の設備、利用状況について、整理したものを資料編に記載した。



コカプルワ Khokharpurwa
飲用に利用されている掘り井戸。足場が悪い状態で水を汲む女性。表面はコンクリートで修復されている。蓋はされていない。



マフワ Mahuwa
200年前から利用されているという井戸。水位：雨季の水位は地表から約1m



マフワ Mahuwa
共同の掘り井戸。パイプを挿入して手押しポンプで汲み上げ利用する。洗濯や農具など荒い物に利用される。



マフワ Mahuwa
左写真井戸の中の様子。濁った水を鉄管を通じて利用している。隣接する家中にも引かれている。

写真 5.3.7 掘り井戸の利用

参考文献

松尾宏・中村圭三・谷地隆 2014：ネパール・テライ低地農村の生活と水利用に関する研究。敬愛大学総合地域研究, No.4, 110-126.

松尾 宏・中村圭三 2015：ネパール・テライ低地における農村集落の水利用に関する研究。敬愛大学国際研究, No.28, 33-49.

5.4 ヒ素被害の実態に関する研究

2012年3月および2014年3月に行った現地における実態調査により明らかになったヒ素被害の状況について、利用井戸の特色と利用上の課題およびヒ素汚染のない安全な水を確保するための対策について整理した。

5.4.1 ヒ素汚染水の利用について

調査地域の管井戸より採取した地下水からは、多くの地点で水質基準（日本、WHOの基準値は10ppb、ネパール基準値：50ppbとなっている）を大きく超える100ppb～300ppbの高濃度のヒ素が検出されており、500ppbを超える高濃度井戸もみられる。住民が日常引用している水は、20～30年ほど前から普及してきた管井戸から揚水するヒ素溶出が多い40フィート～70フィート（12m～21m）の深さの帯水層の水の利用が多いことにあり、村民の多くがその水を飲み続けている状況にある。

調査地域のテライ低地は、標高が低い平野にあり米作を主とする農業地帯である。一年を通じて飲用水(地下水)は比較的得やすいこと、亜熱帯気候であり高温となることから水の摂取量も多く、乾季にはヒ素濃度が比較的高くなる。そうした水を現地の人々は管井戸が普及した頃から飲み続けている。ヒ素を含む水を長い期間飲み続けるとヒ素中毒となり、皮膚に色素が沈着したり、角化の症状が現れたりする（写真5.4.1）。そうした症状がさらに進むとガンになる危険性が高まることから、住民の健康に重大な影響を及ぼすヒ素を含んだ水を飲まない工夫やヒ素汚染井戸の情報と安心して飲める新たな水源の確保が必要である。

2012年調査の25集落では、ヒ素およびヒ素汚染について、井戸水にヒ素が含まれているという不安を持つ人が約7割（80人・71%）あった。なお、ヒ素被害を知らない人も約2割あった（24人・21%）。

ヒ素の病気の有無については、病気があるが3人、わからないが53人（47%）あった（図5.4.1）。日常使う水にヒ素が含まれていると思う人は、強く思う12人（11%）、少し思う68人（60%）あり、合わせて71%の人が不安を持っている（図5.4.2）。

ヒ素除去の手段として有効なフィルターの利用は、2012年1回目調査では全25集落で1件のみの回答であったが2014年調査のマフワ Mahuwa とコカプルワ Khokharpurwa では49件（34%）あった。フィルターの利用は浸透してきているものと思われるが、地域によって被害の状況、意識の違いがある。マフワ、コカプルワの地域ではヒ素の被害が出ていることから、飲み水への関心が比較的高い地域であると考えられる。

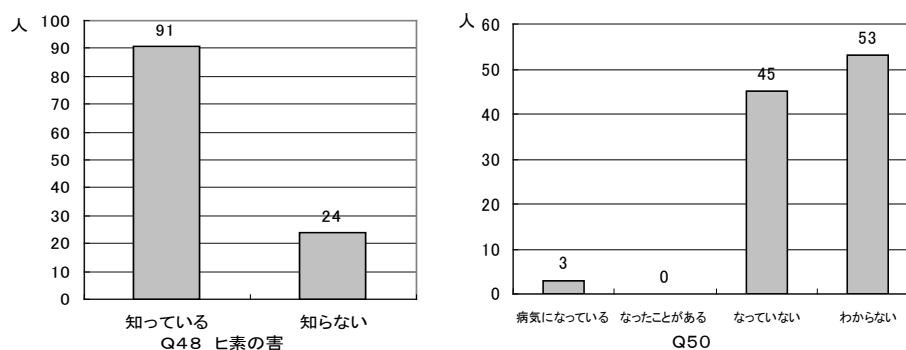


図 5.4.1 アンケート・ヒ素の病気について

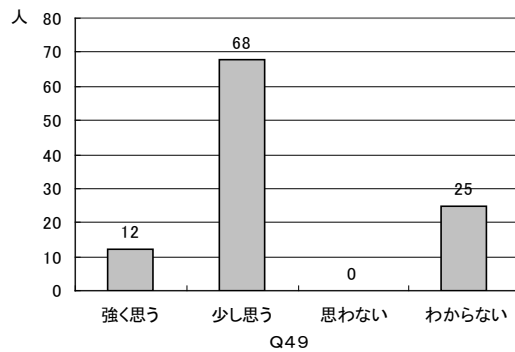


図 5.4.2 アンケート・日常使う水にヒ素が含まれるかどうか

また、飲用する水はほとんどが生水で飲んでおり、沸騰させて飲む人は1人だけであったが、2014年調査の2集落（マフワ、コカプルワ）での調査では49人（33.8%）あった。ヒ素被害以外の汚染対策として衛生的な飲み水を利用する上では沸騰させて飲むことも健康を守ることににおいては有効である。

井戸利用状況や井戸設備と設置場所の状況は様々であるが、井戸の設置場所が排水路の脇にあるもの、地上に出ている井戸の管周りがレンガや石を並べただけで、廃水が溜まっている井戸が多くみられる。そうした井戸は汚れた水が管穴を通じて地中にしみ込んでいく可能性があり、衛生上の問題を抱えているところが多い。したがって、井戸設備の設置・造作方法、排水の浸入を防ぐような構造を造るなど、井戸設備環境の改善の必要性がある。なお、井戸の設置状況や水利用・ヒ素被害の状況は、集落や住民の身分の差もあって、平等に水利用やヒ素汚染やヒ素対策の知識の差および経済的事情から問題のある水を利用する現状から逃れられない側面などもうかがえる。今後はいかに井戸環境を改善させていくかの方策についても地域の状況を考えながら井戸設置環境を改善していくことも必要である。

5.4.2 ヒ素被害の実態と課題

2014年調査では、マフワの集落において、2013年に30代と40代の男性2人がヒ素汚染水の飲用が原因で亡くなったという情報があった。その他、ヒ素被害の心配をする人々が、井戸利用、水質調査をする我々に対して「水が安全かどうか知りたい」「病気になっているので診て欲しい」など救いを求めてくる人々が多くみられた。

ヒ素の病気の有無については、2012年調査の25集落においては、病気があるとの回答が3人あったが、わからないとの回答が53人（47%）あったことから、健康診断等の医療・衛生上の対応がなされていない状況が感じられる。また、2014年3月のマフワとコカプルワの調査では、ヒ素の病気の経験者が14人（9.7%）あり、そのうち半数の7人は医者に診てもらっていないということである。

現在用いられているヒ素汚染対策としては、飲用水のヒ素除去フィルターの利用、代替水源確保等があるが、現状では一部でしか実施されていない状況にある。フィルター利用については、普及、利用が徹底していないと考えられる。なお、定期的な洗浄、砂等の入れ替え、メンテナンスが重要であるが、一旦故障すると使われなくなっている。

ヒ素汚染の回避や設備利用の有無などの違いは、水を利用する各家庭のこれまでの生活習慣的なものや経済状況、民族、カーストなどからくる貧富の差なども関係している。ヒ素中毒の認識があっても、近所に病院や医者がないことや貧困のため医者に診てもら

ことができないことやヒ素に対する意識の問題等が複雑に絡んでいると思われる。



ヒ素被害で皮膚病になったという兄弟（左：兄，10歳台半ば，右：弟・10歳前後）。皮膚に黒い斑点が出ている。子どもが心配で見て欲しいという母親からの相談で、写真を撮らせてもらった（ジャムニヤ Jyamuniya 集落）。



ヒ素の被害にあっているという男性（左：40歳代，右：50歳）。皮膚に黒い斑点（左は胸腹部分，右は手首から手の甲にかけて黒くなっている）。

写真 5.4.1 ヒ素汚染被害と思われる皮膚病患者

参考文献

- 国際協力機構（JICA）ネパール事務所 NGO-JICA ジャパンデスク(ネパール) 2012：
ネパール NGO ハンドブック・2011年. 45p.
- 谷 正和・筒井康美 2010：ネパール国ナワルパラシ郡パトカウリ村における飲料水砒素
汚染による健康被害と貧困の関係. 芸術工学研究, 13, 1-8.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008a：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査. 環境
情報研究, No.16, 13-23.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2010：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査とその
対策. 環境情報研究, No.17, 1-13.
- 松尾 宏・中村圭三 2015：ネパール・テライ低地における農村集落の水利用に関する研
究. 敬愛大学国際研究, No.28, 33-49.
- 松尾宏・中村圭三・谷地隆 2014：ネパール・テライ低地農村の生活と水利用に関する研
究. 敬愛大学総合地域研究, No4, 110-126.
- アジア砒素ネットワーク：ネパールの砒素汚染. ホームページ 2013年10月10日閲覧。
(http://www.asia-arsenic.jp/top/?page_id=311)

6. ヒ素汚染対策に関する研究

6.1 雨水利用に関する研究

調査地域は、亜熱帯モンスーン気候下にあり、雨季と乾季が明瞭に分かれる。年降水量約 1500mm (2013 年 : 1451mm) のおよそ 80%は、雨季である 6 月から 9 月の約 4 か月間に集中する。

降水中にはヒ素が全く含まれていないことから、同じガンジス川の下流域で同様の気候下であり、ヒ素汚染問題が深刻なバングラディッシュでは、雨水利用が実用化されている。

そこで、当調査地域におけるヒ素汚染対策の一手段として、2012 年 3 月に雨水利用実験装置 (写真 6.1.1) を、バルプリー小学校の校舎に設置した。同小学校には校舎が 2 棟あり、南向きの大校舎と東向きの小校舎が L 字型に配置させている。この実験装置を設置したのは、レンガ造りトタン葺の小校舎の南側である。この校舎は、東西 5.3m、南北 14m、床面積 74.2m²で、3 教室に区分され、高学年の児童が学んでいる。校舎の屋根の傾斜は東向きと西向きに分かれているため、2000L のプラスチック製タンク 2 基からなる雨水利用実験装置へは、両方の雨水を全て集水できるように配管した。初期降水は汚れているため、汚れを除去した後の清浄な雨水をタンクへ給水する装置と水位計 (写真 6.1.2, 6.1.3)、およびタンクの水抜き (写真 6.1.4) も設置した。二つのタンクは互いに下部で連結し、4000L まで貯水できるようにした。タンクにはそれぞれに蛇口をつけ (写真 6.1.5)、児童が利用しやすいように配慮した。

設置した雨水利用実験装置の仕組みと利用方法について、教職員の方々に説明して帰国した。



写真 6.1.1 バルプリー小学校の校舎に設置された雨水利用実験装置



写真 6.1.2 初期降水除去装置と水位計



写真 6.1.3 初期降水除去装置



写真 6.1.4 タンクの水抜き



写真 6.1.5 給水用蛇口

それから5か月後の2012年8月に訪れると、蛇口や水位計は壊され、利用されている形跡は全くなかった。修理し再度説明することを繰り返したが、その後も、この装置は適正に使用されることはなかった。

この地域では、雨水は汚いものであるという考え方が、根強くあるようである。論理的に説明を尽くしても、この考え方をを変えることは容易ではない。彼らには、沐浴の汚れた水の方が、雨水よりもきれいであると思えているようである。

多くの住民は、水に恵まれた地域であると認識している。しかし、これは地表水や地下水のことであり、その元となる雨水の実態については、理解されていない。

2014年8月20日に、現地において、調査結果報告会を開催した。会場には、学校の校長、教員、地元の有識者など約40人が集まった。この報告会でヒ素汚染対策としての雨水利用についても説明した。最後に参加者の希望するヒ素汚染対策について聞いてみると、雨水利用を希望する者は全くなかった。

ヒ素汚染対策の一方法としての雨水利用について、この地域で実現することの難しさを、改めて痛感した。

6.2 地下水汚染の評価

6.2.1 リスク評価の手法

地下水の飲用による健康影響は広くアジア各国で知られている。特に、沖積層におけるヒ素汚染の事例はバングラディッシュやインドなどでも多数の報告があり、今回の調査ではネパールのテライ低地でもヒ素の曝露による健康影響が疫学的に確認された。そこで、本研究ではヒ素による環境リスクを低減することを目的として、現地の住民が実際に受けている曝露とリスクを評価するための試みを行うことにした。

地下水汚染のような環境問題を客観的に評価するための手法として、曝露（化学物質を摂取する量）をもとにしたリスク評価のアプローチが重要である。この際利用されるのが曝露評価モデルであり、大きく分けるとスクリーニングモデル、サイトモデルおよび詳細型モデルの3つに分類される。そのうち、スクリーニングモデルは、曝露・リスクを基礎とした健康影響、生態系影響の定量評価、環境基準値や目標リスク設定のモデルであり、環境問題を科学的に評価する足がかりとなる。そのため、わが国特有の土壌特性や曝露ファクターを考慮したモデル開発が重要である。また、サイトモデルは土壌、水理条件や気候条件などのサイト特有のパラメータをもとに大気や地下水経路による有害化学物質の移動を考慮したモデルである。このモデルでは、スクリーニングモデルでは評価できない汚染源から離れた場所、すなわち空間的な曝露評価が可能となっている。

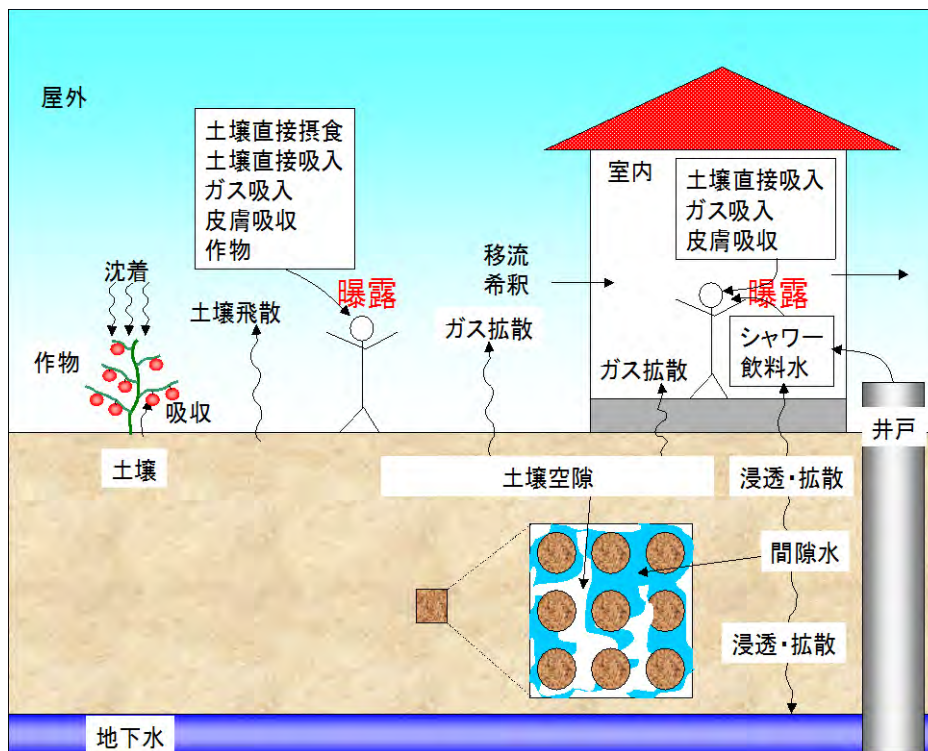


図 6.2.1 GERAS-1 の概念図

GERAS は、WINDOWS 上で動作するスクリーニング評価 (GERAS-1) およびサイト評価 (GERAS-2) 可能なシステムである。まず、評価対象化学物質を選択し、基礎パラメータの設定を行う。そして、サイト特有の土壌、曝露経路ならびにレセプター (曝露対象)

に関するパラメータ設定を行う。スクリーニング評価モデルである GERAS-1 (図 6.2.1) において考慮した曝露経路は、土壌の直接摂食、飲用水や農作物を摂取する経口曝露、土壌から大気へ蒸発した化学物質や飛散した土壌粒子を呼吸する吸入曝露および土壌との接触や飲用水との接触による皮膚吸収曝露となっている。これらのパラメータの設定が完了すると計算が行われる。本モデルでは、はじめに土壌における固体、液体（間隙水）および気体（土壌空気）を対象として化学物質のフガシティー容量の計算を行う。初期条件として居住地域における土壌からの有機塩素化合物の溶出値を与えることにより、土壌空気および土壌間隙水中の化学物質の濃度を算出する。この計算では土壌中の有機炭素量や pH および吸着などのファクターによりそれぞれの化学物質に対して異なった値が得られる。次に土壌の各相から大気や地下水への移動過程の計算を行い、そして、各種曝露媒体中（大気、作物、地下水など）の有機塩素化合物濃度が決定される。最後に曝露シナリオに基づいて、各媒体からヒトへの曝露量が算出される。

一方、サイトモデルである GERAS-2 (図 6.2.2) では、地下水および大気中の汚染物質が、地下水経路あるいは大気経路により移流・拡散し、汚染源から離れた場所（オフサイト）へ移行することを想定している。大気経路の移行はプリューム・パフモデルにより計算し、地下水経路では自然減衰や土壌への吸着を考慮した次元移流拡散モデルによりオフサイトの地下水濃度が決定される。そして計算された濃度に基づいて地下水経路および大気経路の曝露量が算出され、健康リスクが評価される。

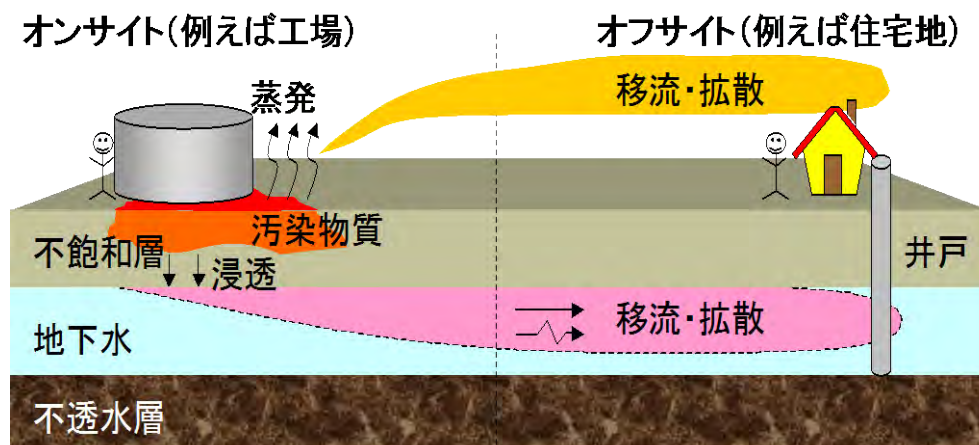


図 6.2.2 GERAS-2 の概念図

6.2.2 地下水汚染のオンサイト調査

(1) 水質の現地調査および簡易分析

テライ低地では現地において電源や標準液などの確保が困難である。そこで、現場における適用性や信頼性の高い簡易分析機器として、高精度型のヒ素分析キット (Quick II 481303, 図 6.2.3) および価数の判定が可能なフィールド用キット (廣中式簡易分別キット, 図 6.2.4) を使用した。前者の分析キットは現場での操作性に優れ、検出下限が 5ppb 以下であり、今回のような状況でも十分に活用できることが分かった。また、簡易分別キットは価数の判別が可能であり、採取した直後の地下水試料を用いることによりヒ素の化学形態に関する貴重な分析データを現場で取得することができる。

対象地域の井戸より採取した地下水中のヒ素を分析キットで検査したところ、かなりの地

点で 100～300ppb を超える高濃度でヒ素が検出された。WHO による基準値は 10ppb であり、これを数十倍程度超過している。地域全体のヒ素濃度の平均値は 150ppb 前後であり、最高値は 500ppm であった。この地域の平均的なバックグラウンドでも 50ppb を超過することが分かった。これらの測定値は、2013 年に ICP-MS を用いて実験室で精密に分析された値とほぼ同様であった。また、地下水中のヒ素の化学価数を分析したところ、表 6.2.1 に示すように三価のヒ素化合物が全体の 60～80% を占めることも分かった。酸化還元電位 ORP が -200mV 以下の還元的な地下水環境では、ほぼ全量が三価のヒ素であり毒性が強いことも判明した。また、還元性の強い地下水であっても汲み置きすることにより五価のヒ素の割合が増えて、相対的に毒性が低下することも分かった。さらに、バブリングなどにより地下水を酸化させることにより、さらに五価の割合が増加して、毒性を大幅に低下できることも判明した。



図 6.2.3 ヒ素の簡易分析キット（高精度）

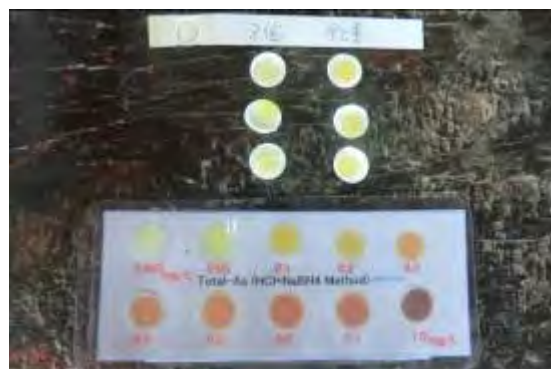


図 6.2.4 ヒ素の化学価数の測定キット

表 6.2.1 地下水中ヒ素の化学価数の測定結果

単位 ppb	全ヒ素	3 価	5 価	ORP(mV)
地下水 1 (還元性)	320	240	80	-240
地下水 2 (汲み置)	140	80	60	-180
地下水 3 (酸化後)	80	40	40	120

以上のように、現地において地下水を分析した結果、高濃度のヒ素が確認され、しかも毒性の高い三価の化学形態が大半を占めていることが判明した。これらの観測データに基づいて、現地の曝露条件の下で健康リスクの定量評価を実施する。

6.2.3 健康リスクの評価と低減方法

現地調査や聞き取り調査を行った結果、地下水中のヒ素による健康障害が生じている集落が数多くあり、地域全体でも健康リスクがきわめて高いことが判明した。先に示した GERAS を用いてリスク評価の試算では、人口 1 万人あたりで約 300 人の発ガン傾向の増加が予想され、疫学調査の結果と同様なリスクレベルとなっている。

図 6.5 は、汚染された地下水を長期間にわたり飲用し、土壌（堆積物）の上に居住している状態を想定して健康リスクを算定した結果をしめしたものである。現地で観測された 100～200ppb ($\mu\text{g/L}$) の地下水および 50ppb の土壌（堆積物）の条件では図 6.2.5 に示すように、 10^3 を超過する発ガンリスクとなることが分かった。平均的なリスク値は 3.4×10^{-3} と

As (+ 10 mg/kg)			
water content	compared with TDI %	oral cancer risk	inhalation cancer risk
0.01 mg/L	21.3	6.8*10 ⁻⁴	1.5*10 ⁻⁶
0.1 mg/L	199	6.4*10 ⁻³	1.5*10 ⁻⁶
0.5 mg/L	988	3.1*10 ⁻²	1.5*10 ⁻⁶
2 mg/L	1975	6.3*10 ⁻²	1.5*10 ⁻⁶
As (+ 0.01 mg/L)			
sediment content	compared with TDI %	oral cancer risk	inhalation cancer risk
10 mg/kg	21.3	6.8*10 ⁻⁴	1.5*10 ⁻⁶
50 mg/kg	27.5	8.8*10 ⁻⁴	7.3*10 ⁻⁶
100 mg/kg	35.3	1.1*10 ⁻³	1.5*10 ⁻⁵
200 mg/kg	50.9	1.6*10 ⁻³	2.9*10 ⁻⁵

図 6.2.5 汚染地下水の飲用による健康リスクの算定結果

推定され、上記のように人口 1 万人あたりで 300 人を超える住民が被害を受けている可能性がある。

そこで、現地で実施可能なヒ素対策として、地下水からのヒ素の除去方法、安全な井戸を作井するための方法などを検討した。いずれも多額の費用をかけることなく、比較的簡便に実施できる費用対効果の高い方法を対象とした。

ヒ素による健康リスクを低減するための方策は、大きく分類すると除去対策と曝露防止対策であり、それぞれの方策は以下のように整理することができる。いずれの方策も健康リスクを低減でき、現地の環境条件や社会文化的な側面を勘案しても実現可能性は高いと考えられる。

- (1) ヒ素除去対策
 - ・除去フィルター等の導入
 - ・汲み置き、酸化処理等による自然処理
- (2) 曝露防止対策
 - ・代替水源の確保（雨水、淡水等）
 - ・曝露経路の遮断（帯水層の選択、井戸構造の改善）

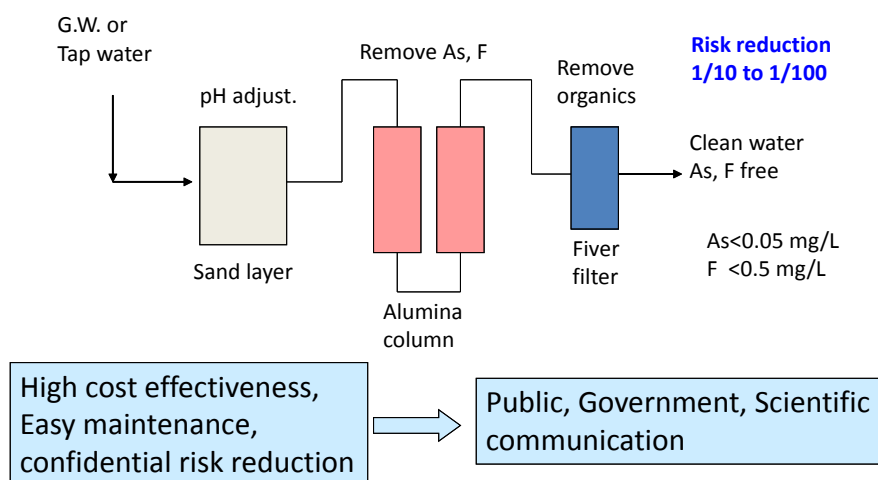


図 6.2.6 ヒ素除去のためのフィルターシステムの概要

現地において導入可能なヒ素の除去フィルターのイメージを図 6.2.6 に示す。砂層による濾過のプロセスと反応性の鉄、アルミナ等の吸着、沈降等のプロセスを併用したものであり、比較的安価かつ容易に設置できる特長を有している。定期的なメンテナンスが必要であるが、効果的に機能すれば原水中のヒ素濃度を 1/10 程度まで低減することが可能である。

このほか、ヒ素を含む地下水の自然処理や曝露経路の遮断も現地で実施できる有効な方法であると考えられ、これらの詳細については次節以降で述べることにする。

6.2.4 まとめ

ナワルパラシにおける地下水汚染の調査結果に基づいて、ヒ素の摂取による健康リスクの定量的な評価を実施した。その結果、現地の易学調査と同等のリスクレベルが確認され、きわめて深刻な健康影響を生じる可能性が示唆された。そこで、現地で実施可能なヒ素対策として、地下水からのヒ素の除去方法、安全な井戸を作井するための方法などを検討した。いずれも多額の費用をかけることなく、比較的簡便に現地で実施できる費用対効果の高い方法である。これらの方法を普及させるため、以下では基礎的な試験や評価を実施し、その効果や適用可能性について検討を進める。

6.3 鉄共沈法試験結果

6.3.1 ヒ素の自然的な挙動

地下水中のヒ素は主に無機態で存在していると考えられている。前述のように、還元的な環境条件では三価のヒ素が多く、酸化環境になると五価のヒ素に移行する。ヒ素の毒性は三価の方が数倍程度高いため、現位置で五価に酸化することができればリスク軽減の効果は大きい。また、2 価鉄が多く存在する地下水では、鉄との共沈作用によりヒ素を効果的に除去することも可能である。さらに、砂などの濾過剤を用いることにより、荷電した微粒子を吸着させてヒ素を物理的に除去することも可能である。

まず、ヒ素濃度が高いとされる現地の井戸から採取した地下水を用いて、自然に放置した場合のヒ素の濃度変化を調べてみた。図 6.3.1 はボトルに採取した地下水中のヒ素濃度の時間経過を示したものである。キャップをした密閉状態とキャップを外した開放状態について調べたところ、いずれも 12 時間程度でヒ素濃度は半減することが分かった。わずかな沈殿物が見られたことから、鉄の共沈作用により水中からヒ素が除去されたと考えられる。24 時間の経過で約 30% までヒ素濃度が低下したが、その後の低下速度は緩やかであった。この間、地下水の ORP は採取直後の -240mV より 12 時間後には +200mV まで変化した。この実験結果から、汲み上げた井戸水を半日程度静置した後に飲用することで確実に健康リスクを低減出来ることが分かった。

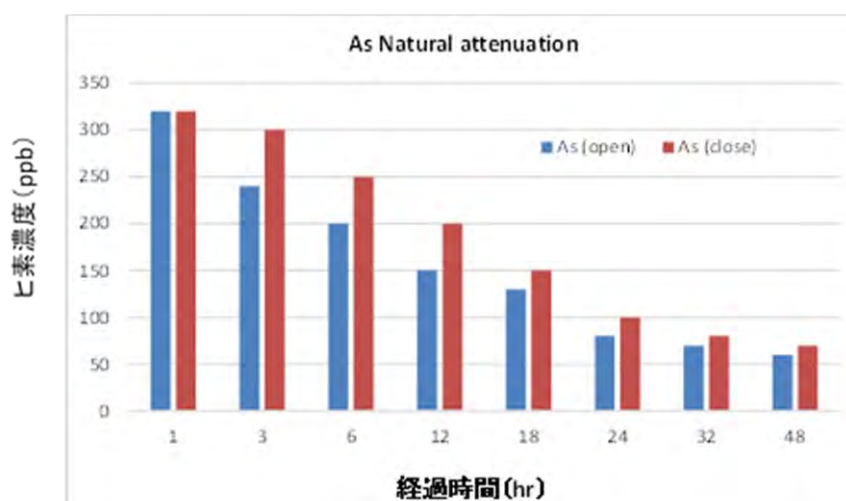


図 6.3.1 自然放置状態での地下水ヒ素の低減

6.3.2 ヒ素の除去効果

次に、砂、アルミ粉末、鉄粉およびその組み合わせを用いて、地下水中のヒ素の除去効果（共沈、吸着等反応）を調べる実験を行った。その結果を表 6.3.1 および図 6.3.2 に示す。いずれも初期のヒ素濃度は 320ppb 程度であった。ビーカー中に汚染地下水 100ml と粗砂を一定量入れて 3 分間攪拌したところ、放置後 1 時間では 120ppb となり砂の効果は大きいことが分かった。2.5~10g 程度の鉄粉を用いた場合では、10~30ppb までヒ素濃度が低下し、満足すべき除去効果が認められた。いずれの条件でも、砂やアルミ粉、鉄粉の量が多いほど除去効果が大きいことも分かった。これらの実験結果から、砂や鉄を活用することにより現地で効果的にヒ素を除去できることが実証された。実際に現地ではヒ素除去フィルター（写真 6.3.1, 図 6.3.2）が多数導入されている。現地で入手可能な川砂と鉄釘を敷き詰めた手作りの装置であり、社会受容性

の高いヒ素除去手法であるといえる。砂や鉄の量，地下水の滞留時間，さらには定期的なメンテナンスを確実に実施することにより，簡便にヒ素を除去できることが実験的にも確認された。

表 6.3.1 砂，鉄およびアルミナによる地下水中ヒ素の除去の効果

使用量	50g	25g	10g	2.5g
砂	80	100	160	200
アルミナ	160	160	160	130
鉄粉	30	30	80	100
砂+鉄粉	0	10	20	30
砂+アルミナ	20	25	50	70
処理無し	320	320	320	320

ヒ素濃度 ppb

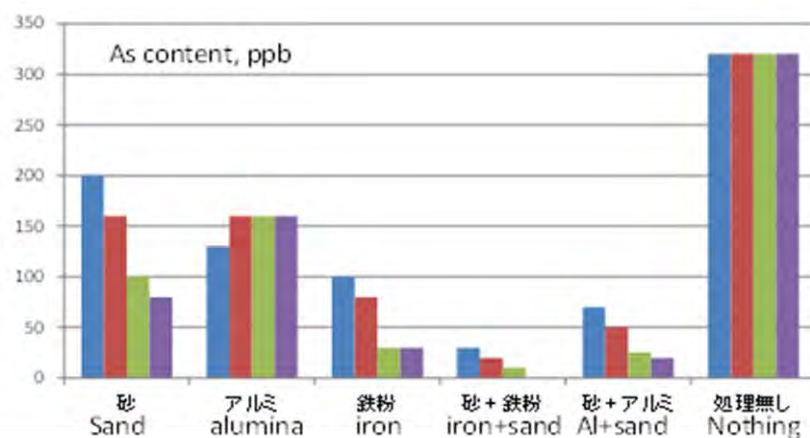


図 6.3.2 共沈試験によるヒ素の低減



写真 6.3.1 ヒ素除去フィルター



図 6.3.2 ヒ素除去フィルター内の鉄釘

6.3.3 井戸の構造および帯水層の選択

現地で使用されている井戸は、比較的浅い掘井戸のほか、深度が 20m 程度のハンドポンプを有するチューブウェル（管井戸）と呼ばれる井戸である。掘井戸は地表から自由地下水が見える開放型の構造である。大腸菌や硝酸性窒素などの汚染が危惧されるが、水質が酸化的環境条件であるためにヒ素の濃度は一般的に低い。一方、チューブウェルではヒ素の濃度が高いものも多く、検査されないままに使用されるケースがほとんどである。掘削の費用を抑えるために、掘削を進めていって最初に当たった良好な帯水層内にスクリーンを設置して仕上げを行っている。図 6.3.3 は、帯水層の構造および井戸深度とヒ素濃度の関係を示したものである。

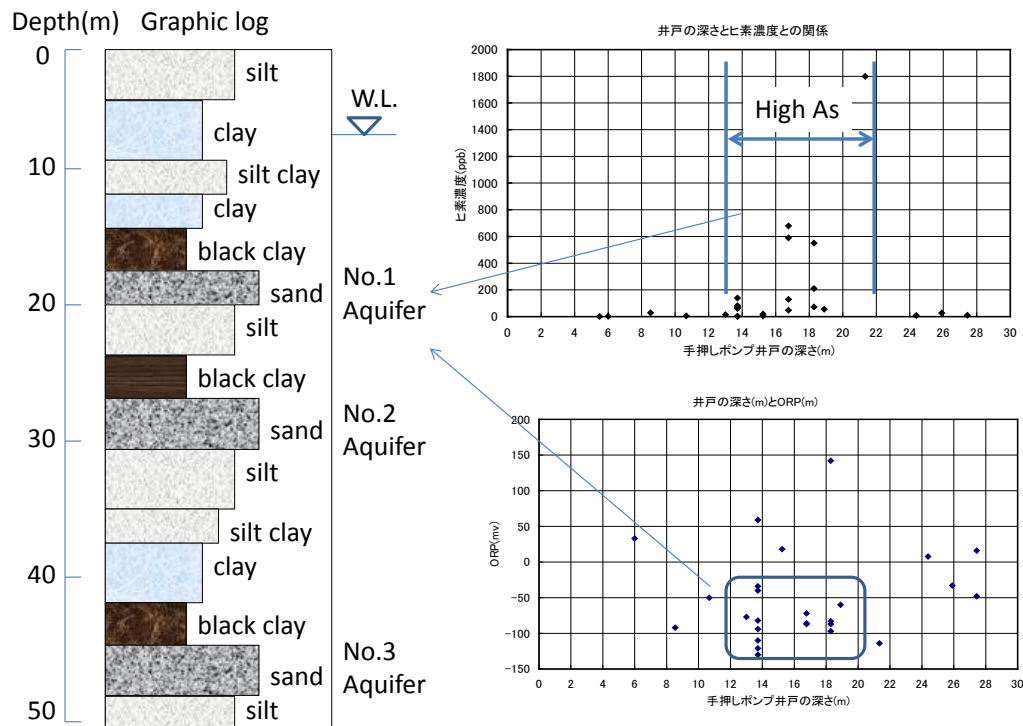


図 6.3.3 帯水層の構造および井戸深度とヒ素濃度の関係

この地域の井戸のほとんどは 13~22m の範囲にあり、いずれもヒ素の濃度が高い傾向にある。しかも、第 2 帯水層の地下水は還元環境条件にあり、低温でおいしい水と考えられてきた。経済的な観点のみで開発されてきた簡易な井戸の多くが、ヒ素に汚染された地下水を供給し続けたという皮肉な現実がある。したがって、この地域においては第 2 帯水層までの浅部の地下水には高濃度のヒ素が含まれる可能性が高く、安全な帯水層を選択するとともに、帯水層間の地下水の移動を防止する方策の導入も重要である。

このような実態が解明されつつある現在では、安全な地下水を見出すための方法としてより深部の第 3 帯水層の地下水を開発の対象にすること、使用前には必ずヒ素検査キットでヒ素の濃度レベルを調べることを指導している。また、汚染された地下水が混入しないように、浅部の帯水層からの地下水をシールするような井戸構造の仕上げについても検討課題として取り上げられている。これらのヒ素対策は、現地では貧困、宗教およびカースト制度等の課題もあって、なかなか一般には普及していないのが現状である。

そのため、筆者らはネパールの NPO や自治体の関係者と協力して、研究成果の報告会を現地で開催してヒ素対策の普及に努めている。このような環境教育を通じて、社会受容性および費用対効果の高い適用可能な対策手法を採用して現地の住民が積極的に導入できるような持続可能な仕組みを作ること、さらには住民自らが率先して対策の立案にあたるなどの住民参加型の取り組みを進めている。

6.3.4 まとめ

今回の現地調査は、限られた経費と期間にも拘わらず上記のような多くの研究成果を得ることができた。現場でしか分かり得ない科学的な現象や現地に特有な社会環境的な要素を踏まえて、経済状態や生活実態などを考慮に入れた総合的な観点から合理的な解決策を検討する必要性を痛感している。

これまでに、ヒ素を含有する地下水の実態を把握するとともに、ヒ素の健康リスクを低減するための対策について検討してきた。今後は、これらの実証的な成果をもとに、より具体的な対策や解決策について検討をすすめることが重要である。基礎的な研究分野では、地層や帯水層におけるヒ素の移動性や化学形態などの動態の解明、ヒ素による健康影響と地質環境との関わりについての基礎データの集積、さらには安価なヒ素除去方式の開発などの取り組みを行う。

現地では住民参加型のヒ素対策をさらに進めることが肝要である。そのためには、まずはヒ素の基礎知識を有し対策にも精通している人材の育成と普及が重要である。現地の NPO や自治体の関係者と連携して多くの人材を広く社会に輩出すべく、今後も協力活動を継続していく。さらには、現実的な対応として、本格的な代替水源の確保や農業などの産業と連動した事業に向けて、国際協力事業団 JICA などとの協力も欠かせない。

参考文献

- 川辺能成・駒井武 2008：地圏環境リスク評価システム GERAS の開発。Green Report, 11-12.
- 駒井 武・大岡健三・濱田浩美・松尾 宏・中村圭三 2015：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染と地質環境の関係。第 23 回環境地質学シンポジウム講演論文集, 153-158.
- 駒井 武・中村健吾・大岡健三・成澤昇・松尾 宏・中村圭三 2013：ネパール・テライ低地における地球科学的特徴と数理統計解析。第 25 回環境地質学シンポジウム講演論文集, 78-85.
- 国際協力事業団 2010：ネパール国ナワルパラシ郡における地域社会のヒ素汚染対策事業報告書。
- 未永和幸・筒井康美・谷正和 2012：ネパール・ナワルパラシ群の地下水ヒ素汚染状況と帯水層特性。第 17 回アジア地下水ヒ素汚染フォーラム講演要旨, 19-22.
- 中村圭三・大岡健三・駒井武 2008：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染調査。環境情報研究, No.16, 14-23.
- ENPHO, 2004：The State of Arsenic in Nepal –2003. prepared by Environment and Public Health Organization (ENPHO) for National Arsenic Steering Committee (NASC).
- Gurung, K., H. Ishige and M. Khadka 2005：Geological and geochemical examination of arsenic contamination in groundwater in the Holocene Terai Basin, Nepal. Env. Geol., 49, 98-113.

6.4 今後の対策

6.4.1 水利用の現状と課題

人々の生活で最も重要である飲み水に大きな問題を抱えているのが、このテライ地方の調査地域の村々である。この地域が抱えている根本的問題解決には多くの課題を抱えている。その最も大きな問題とは、ヒ素を含んだ水を今も飲み続けているということにある。2012年に行った25の各集落および2014年調査のマフワ Mahuwa やコカプルワ Khokharpurwa の2つの集落でもそれは同様であり、子どもから年配者まで年齢、性別に関係なく問題のある水が利用され続けて（飲まれ続けて）いる。

ヒ素は、日本のヒ素濃度の基準値 10ppb に対し、ネパールでの基準値はその5倍の 50ppb となっていて高い基準であるが、調査地域のナワルパラシの集落でのヒ素濃度は、最高 1800ppb、最低 1.2ppb、平均 168.4ppb の調査記録もある（中村ほか、2009）。高濃度のヒ素は、深さ約 60 フィート（20m）前後の地層部分の帯水層に存在し、そのヒ素を含む地下水を飲み続けることで、住民の健康に重大な影響をおよぼすことになり、そうしたヒ素汚染井戸の情報を把握し、その危険な水を飲まないで、安心して飲める新たな水源の確保が必要である。

これまで日本の JICA や海外およびネパール政府支援によるヒ素汚染に関する啓蒙活動や給水塔（写真 6.4.1）、管井戸の提供が行われてきたが、住民の生活用水（飲み水）を十分に満たす解決策にはまだ至っていない。

現地での調査によると、40年ほど前頃から掘られてきたヒ素濃度の高い 50～70 フィート（15.2m～21.3m）前後の深さの井戸が多く、そこから汲み揚げる井戸水を飲んでいるという現状にある。したがって、今後もヒ素汚染起による疾病が起こる可能性を持っているということにつながる。なお、ヒ素汚染が少ない帯水層の水を飲んでいるところでは、ヒ素被害の危険性はなくなるが、マフワでの利用が多かった浅井戸の掘井戸（INAR）の水や各ポンプ井戸（管井戸）の設置箇所の衛生環境上の問題など、飲み水としてはヒ素以外の不衛生的井戸環境による汚染の問題を抱えている（写真 6.4.2）。



写真 6.4.1 マフワ Mahuwa に建設中の給水塔



ジャワ Jawa

井戸の周りに煉瓦を敷いて足場を確保，排水が悪く，汚れた水が溜まっている。



プルバリヤ Pulubariya

井戸水の排水がされず，足元に汚れた水が溜まったままで子供が利用し飲んでいる。



シリナガル Shrinagar

排水溝の脇に設置された管井戸．煉瓦を管の回りに置いただけの不衛生の井戸多い。



コカプルワ Khokharpurwa

井戸の周りに排水が溜まって汚れている．こうした井戸が多くみられる。



マフワ Mahuwa

管井戸の脇に排水溝があるが，泥が溜まって排水できず，腐ったにおいがする状態。



パラティカル Paratikar

足場の煉瓦が沈んで，井戸管の周りに汚れた水が溜まり，小鳥が水飲みに来ている。

写真 6.4.2 不衛生な飲用井戸の設置状況

6.4.2 支援井戸の利用と課題

ヒ素汚染対策として、給水塔（タンク）・水道が政府（外国支援）によって建設されているが、電力事情の問題で現地では停電も多く、いつでも電動ポンプが動かせる状態ではない。なお、給水塔から引かれた水は、集落内の道路脇に水汲みの水道施設が設置され、共同で利用されている。水道利用代金は70ルピー/月/軒程度かかる。負担できない家は使わない。また、時間給水があるため、通常利用するには不便である。さらに維持費や水道料金の有無によっては、既存の井戸水を利用して、水道の水を使わない家も出てくる。したがって、現状ではこれまでの自前の井戸や公共井戸の依存は続くものと思われる。

2012年、2014年調査での村民の要望の中では、給水塔・水道の設置希望が多いことがわかったが、給水塔の建設は、現状の問題を早急に解決する手段とはいえない。それは、建設コストが高く、設置後の管理、給水時間、水道料金負担などの未解決な課題があるからである。実際、現在建設中のマフワ Mahuwa の給水塔（写真 6.4.1）は政府資金（外国支援）で800万ルピー（約850万円）の建設費を要している。なお、水道給水施設については未完成であるが、今後の給水計画は、村民から基金として集金し、一定の募金が集まった段階で政府支援が得られ、計画実施されるという。給水のための水道配管工事は集落で調整し、住民が配管工事等の設置作業を行う予定である（2014年8月調査段階）。

JICA 支援（九大・ENPHO）による活動が2010年10月～2012年3月に実施され、井戸の設置やヒ素汚染対策掲示物等設置およびヒ素対策についての住民への情報提供と住民の活動とヒ素問題への理解等について支援が行われた。支援は一定の効果をもたらしたものといえるが、ヒ素濃度不明や利用されずに放置されたままの井戸もある。また、壁絵やポスターでヒ素対策等が啓発されていたが、劣化や汚れで見えにくくなっているものがある（写真 6.4.3）。

支援活動終了後のフォローアップの必要性、設置後放置された井戸や見えにくくなった掲示板等の修繕などの問題が残されている。

これまで、ヒ素汚染およびヒ素汚染回避等について住民へ情報提供が行われてきたと考えられるが、今回我々による聞き取り、アンケート調査では、ヒ素汚染について未だよく理解されていないという結果も表れた（図 5.4.1, 図 5.4.2）。また、ヒ素汚染回避対策としてのフィルター利用の問題を含めて、毎日飲む安全な水を確保するには未だ至っていない状況である。

現状の井戸利用を見たとき、支援等により設置された井戸ポンプについては、維持管理が徹底しておらず、簡単な部品を交換しないまま使用が困難になっている井戸もみられた。また、耐久性のある質のよいポンプも少ないものと思われ、井戸ポンプが壊れ放置されている井戸もみられた。このように、一部では小額の部品交換ですむような些細な事（写真 6.4.4）にも日頃から注意を向けていくことや住民自らの行動で修繕・交換する姿勢が見られないような感覚があり、人々の生活・習慣のあり方、考え方の改善も重要な課題であると考えられる。



コカプルワ Khokharpurwa
家の壁面に描かれたヒ素被害の身体（皮膚病）
を示す周知活動（2012年3月）。



コカプルワ Khokharpurwa
人家の入り口付近の壁面に下げられた
ヒ素被害周知用ポスター（2012年3月）。



ピパラ Pipara 南部の小学校 ↑
小学校の外壁面に描かれたヒ素被害の
周知活動壁絵。色が落ちてカビが生えて
内容がわからない（2014年8月）



サラワル Sarawal
上の写真も劣化して見えにくくなった JICA
支援の壁絵（2014年8月）

写真 6.4.3 支援活動によるヒ素被害に対する啓蒙の壁絵、ポスター



写真 6.4.4 井戸ポンプの部品（交換用パッキン）

←ポンプ内部に挿入する消耗品パッキン（Washer）は日本円でわずか 50 円であるが、パッキンの劣化で水が出にくくなっても、交換せずにポンプ使用を全て放棄されてしまうことが多い。

せっかく支援して設置された井戸も維持管理の責任が曖昧で誰も修理せずに放置されてしまう。地元利用者に一部でも費用を負担させ自分たちのポンプという認識があれば自己責任で改善できると思われる。

6.4.3 今後の対策

以上のような問題、課題があることを踏まえると、これからの水（飲用）対策としては、井戸の構造改善や安全な地下水の飲用指導、曝露リスクの防止などのヒ素による健康リスクの回避を実施していくとともに、生活習慣や設備設備に対する意識の改革の必要性があると考えられる。そのためには、まずは現状で多くみられる井戸水源より 50 フィートほど深い 100～150 フィート程度の深さで、安全な水が得られる井戸を掘削して利用することが望ましい。経済的理由等で個々の家庭で設置が難しい場合、各村に数箇所の井戸を掘って共同で使用する施設・仕組みが必要である。ネパールおよびテライ地方では電力事情が悪いことから、井戸は手動で汲み揚げ、共同で利用できる仕組みをつくることなどが比較的 low コストで実用的、早急にできる方法であろう。そうした中で、さらに費用負担の面での利用者負担の考えと、共同利用意識を持たせ住民参加型の仕組みをつくり出す必要性があり、維持管理がしっかりした水利用システムの構築を図っていくことが重要と考える。以下に対策として有効であろうと思われる事項を整理した。

(1) 生活用水の確保

- ・汚染井戸の存在と利用について、利用しない（飲まない）井戸の周知を徹底する。
- ・適切な水源（井戸）の調査を行い、ヒ素のない安全な水が得られる 100～150（30m～50 m）フィート程度の深さの井戸を村に数箇所掘って、水源を確保する。
- ・低コストで設置可能な井戸の掘削と汚染帯水層からの水（ヒ素、その他）流入阻止シーリングの徹底した井戸の整備する。
- ・飲用として安全な水の確保ができる共同井戸の改善、新たな設置を行う。
- ・学校や公共施設には、子ども達が安全な水を飲むことができる井戸を早急に確保する（写真 6.4.6）
- ・安全な水の確保ができるまでは、簡易・安価なヒ素除去装置の利用を考え、フィルター普及と利用を徹底させ、定期的なメンテナンスの重要性を徹底させる。
- ・簡易フィルターの普及とメンテナンスの徹底を図る。現状で学校では子ども（生徒）たちは汚染された井戸水を直接飲んでいる（写真 6.4.5）。
- ・生活環境改善策の一つとして、水利用衛生環境対策とそのための組織づくりを行う。
- ・受益者負担の原則を考慮した住民参加型の仕組みづくりと組織運営を行い、設備維持システムの構築と組織リーダーの養成を進めていく。

(2) 取水施設の基本的改善

- ・水の飲み方の工夫（白湯、汲み置きの水を飲む工夫）
- ・井戸周りの衛生と汚さないための工夫
- ・ヒ素汚染井戸の周知・ヒ素汚染の水を飲ませない工夫。特に子どもたちへ周知。
- ・診療施設および医者への巡回検診を勧める。
- ・既存の掘井戸の活用を図る（一部の集落では利用価値が高いものとなっているが、衛生上の問題がある。）

(3) その他

- ・JICA 支援活動の効果検証・特に井戸の現状把握（ヒ素汚染有無・水質）とその他課題抽出し、改善策・対策を検討。

- ・ヒ素汚染を含めた水質汚染水対策，井戸環境改善に向けた活動を行っていくための地域住民リーダー人材の育成.
- ・村民の生活水準の向上のための，住民による持続可能な仕組み作りや住民参加型の取り組み等の推進.
- ・通常の食事で，デトックス（detox・解毒）作用のある食物の栽培普及.
体内のヒ素の解毒作用のあるものとして有効なセレンウム（セレン）が多く含まれる食物を栽培し，毎日の食事で摂取する食習慣を身に付けるよう指導推進して行く.
- ・雨季以外の新たな農業水利の確保による米の二期作等の農業生産性の向上等を考慮した生活水準向上のための農業生産システムの検討.
- ・余剰農業用水の生活用水利用，飲用水への転用利用の検討.



写真 6.4.5 ピパラのバルプリ小学校で使われているヒ素除去フィルタープラスチック製のバケツを利用したようなもので，鉄釘（上層）と砂（下層）が入っている．教職員は使っているが，生徒達にはフィルターの利用がされていない．生徒のためのヒ素除去フィルター等の安全な水の確保が必要。



写真 6.4.6 安全な水の確保として行った事例
2014 年 8 月に我々調査チームが掘削設置したヒ素のない井戸．深さ 35m掘削し，ポンプを取り付けて学校へ寄付した（コカプルワの学校の校門前に設置）.

7. ま と め

本研究では、2011年度から2015年度までの5カ年にわたり、ネパールで地下水ヒ素汚染が最も深刻なテライ低地中央部のナワルパラシ Nawalparasi 郡パラシ Parasi において、気象・気候、地下水動態および水質、地下水と地質構造との関係、住民に関する生活実態調査、ヒ素汚染対策等について、総合的に調査研究した。

7.1 気象・気候に関する研究

モンスーン気候帯に位置する当地域においては、6月中旬から9月中旬までモンスーン季となり、年降水量の90%以上がこの時期に集中する。モンスーン季直前の4月後半以降はプレモンスーン季で、連日晴天が続いて年間で最も気温が高く、40℃以上の日も出現する。全天日射量の増加、気温の上昇、相対湿度の低下により、この時期の蒸発量は、最も高い値を示す。モンスーン季后12月半ばまではポストモンスーン季で、晴天で穏やかな天候が続く。北側にシュワリク山地が迫っているため、プレモンスーン季およびポストモンスーン季には、夜間に山の斜面を下降する北寄りの山風、日中に山の斜面を上昇する南寄りの谷風が卓越する。

亜熱帯地域における住宅の室内温熱環境の季節的な特徴を実証的に明らかにするために、屋根素材が異なるトタン、カワラ、コンクリート屋根の3住宅で観測した。モンスーン季では、降水や高湿度の影響により、他の季節よりも、夜間気温の低下、日較差が共に小さい。また、最も高温なトタン室内と最も低温なカワラ室内との気温差は日中に顕著であった。これは、熱容量の他に、保水による昇温抑制が強いカワラ屋根と保水不可能なトタン屋根との温度差を反映したものと考察された。非モンスーン季では、日の出以降気温の上昇が急激で、日較差が大きい傾向が見られ、特にトタン室内で顕著であった。夜間の気温は、コンクリート室内で最も高く、他の室内との差が大きい。これらの要因として、日中には屋根面の受熱、夜間には屋根面からの放熱の効果が認められた。

7.2 ヒ素に関する水文学的研究

ヒ素汚染の実態と季節変動に関する調査を行った。この地域の帯水層は5m～6m付近の第1帯水層（浅層地下水）、12-23m付近の第2帯水層、30-50m付近の第3帯水層に分類できる。第1帯水層のヒ素濃度は10～100ppbと相対的に低く、また、第3帯水層は0～10ppbと極めて低い濃度であった。一方、第2帯水層では10～1000ppbの濃度を示しこの地域の汚染された地下水は第2帯水層に限定されている。

地下水のORPはほとんど負の値で、地下水は還元状態にある。ヒ素濃度の高い地下水では Fe^{2+} の濃度が高く、還元状態からのヒ素の溶出を説明することができる。調査対象地域は地下水流動が極めて遅いと考えられることから、多くの溶存イオンが還元状態で滞留していると考えられる。雨季よりも乾季の方が10-12%程度ヒ素濃度は高くなる。最高濃度の井戸では1,048ppbが観測され、多くの井戸で500ppbを超える値が得られた。ヒ素による広範囲の地下水汚染を確認して、その水平方向および垂直方向の分布を明らかにした。この地域の地下水の水位・流動、ヒ素濃度は、雨季と乾季、さらには年度によっても大きく変動している。

これらのことから、ヒ素による地下水汚染のメカニズムや帯水層と汚染との関わりなどの新たな知見を得ることができた。

7.3 ヒ素に関する地形・地質学的研究

ナワルパラシのヒ素汚染地域における地質状況を把握し、ヒ素濃集のメカニズムを解明することを目的として、数カ所において深度 20m から 50m 程度の観測井戸を掘削して堆積物試料を採取した。採取した地下水および堆積物の各種試料について、含有する重金属成分を中心に化学分析を実施し、地質状況と地下水中のヒ素濃度との関わりを詳しく調査した。帯水層を構成する堆積物（細粒砂、粗粒砂）のヒ素の含有はきわめて少量であり、いずれも 1 mg/kg 程度であった。ヒ素は帯水層の間のシルト粘土層に多く含有し、XRF による含有量は 10~20mg/kg であった。一般環境と比べて特段の高濃度とは考えられないが、砂層と比べると数倍の含有量を示した。帯水層と難透水層を構成する化学組成に差異があることから、堆積した沈積粒子の母岩が異なることが推察される。XRD による定性的な解析結果によれば、シルト粘土層には粘土鉱物や緑泥石のような風化鉱物が含まれ、帯水層には石英や長石のような造岩鉱物が多く含有することも分かった。これらのことから、ヒ素は堆積物の沈積プロセスにおいて、シルト粘土層に集積し、それが地下水汚染の起源となっていることが考えられる。これらのことから、ヒ素は帯水層間のシルト粘土層に濃集され、嫌氣的な地質環境において地下水中に高濃度で溶出する可能性が示唆された。

本研究で得られたこれらの知見は、井戸の構造改善や安全な地下水の飲用指導、曝露リスクの防止など、今後ヒ素の対策や健康リスクの回避を実施する上で、有益な科学的な情報を与えるものである。

7.4 住民の生活実態に関する研究

住民の生活で最も重要な飲み水に大きな問題を抱えているのが、このテライ地方の調査地域の村々の持つ問題であり、問題解決の課題を抱えている。2012 年に 25 のワードおよび 2014 年にはヒ素被害が大きい 2 つの集落マフワとコカプルワで聞き取り、アンケート調査を行い、飲用の水利用について実態を調査した。調査地域は、雨季、乾季を通じて水（飲用）水が得やすいところである。そこでの最も大きな問題がヒ素を含んだ水を今も飲み続けているということにある。

現地では、40 年ほど前から掘られている 50~70 フィート（15.2m~21.3m）の深さの井戸が多く、そこはヒ素が多く含まれる帯水層であることから、今後もヒ素汚染の問題が起こる可能性を持っている。浅井戸の掘井戸（INAR）の水は、ヒ素の汚染はないが、飲み水としてはヒ素以外の不衛生で他の汚染の問題を抱えている。

ヒ素汚染の被害については、これまで日本の JICA や海外およびネパール政府支援によるヒ素汚染に関する啓蒙活動や井戸の提供が行われてきたが、住民の生活用水（飲み水）確保の解決策にはまだ至っていない。また、ヒ素汚染対策として、深い帯水層から汲み上げる給水塔（タンク）と水道が政府（外国支援）によって建設されているが、電力事情や維持管理などの課題が残る。村民の要望でも、給水塔・水道の設置希望が多いことがわかったが、給水塔の建設は、現状の問題を早急に解決する手段とはいえない。それは、建設コストが高く、設置後の管理、給水時間、水道料金負担などの未解決な課題があるからである。

また、ヒ素被害患者でも医者に診てもらっていないことやヒ素の病気についてまだ理解されていないこともあり、そのことが問題を大きくしていることにある。その背景には、地主制度の土地問題、カーストや民族からくる差別と貧困なども住民の生活とヒ素被害に関係していると思われ、今後の検討課題でもある。

7.5 ヒ素汚染対策に関する研究

ナワルパラシにおける地下水汚染の調査結果に基づいて、ヒ素の摂取による健康リスクの定量的な評価を実施した。地圏環境リスク評価システムGERAS(川辺,2008)を用いた地下水飲用の健康リスク診断によると、発ガンリスクでは $1.5\sim 7.5\times 10^{-3}$ と推算された。生涯にわたってこの汚染水を飲用したとすれば、人口10万人あたり150~750人の発ガン傾向の増加が見積もられる。現地NPO(ENFO, 2004)やJICAなどが実施した疫学調査でも同程度の健康リスクが報告されており、きわめて深刻な状況と判断される。

そこで、現地で実施可能なヒ素対策として、地下水からのヒ素の除去方法、安全な井戸を作井するための方法などを検討した。

砒素濃度が高いとされる現地の井戸から採取した地下水のヒ素濃度は、自然に放置した場合に、12時間程度で半減、24時間の経過後に約30%まで低下した。この間、地下水のORPは採取直後の-240mVより12時間後には+200mVまで変化した。この実験結果から、汲み上げた井戸水を半日程度静置した後に飲用することで確実に健康リスクを低減出来ることが分かった。

砂、アルミ粉末、鉄粉およびその組み合わせを用いて、地下水中の砒素の除去効果を調べた実験結果から、砂や鉄を活用することにより現地で効果的に砒素を除去できることが実証された。実際に、現地で入手可能な川砂と鉄釘を詰めた砒素除去フィルターが多数導入されている。砂や鉄の量、地下水の滞留時間、さらには定期的なメンテナンスを確実に実施することにより、簡便に砒素を除去できることが実験的にも確認された。

今後は、これらの実証的な成果をもとに、より具体的な対策や解決策について検討をすすめることが重要である。基礎的な研究分野では、地層や帯水層におけるヒ素の移動性や化学形態などの動態の解明、ヒ素による健康影響と地質環境との関わりについての基礎データの集積、さらには安価なヒ素除去方式の開発などの取り組みを行う。

現地では住民参加型のヒ素対策をさらに進めることが肝要である。そのためには、まずはヒ素の基礎知識を有し対策にも精通している人材の育成と普及が重要である。現地のNPOや自治体の関係者と連携して多くの人材を広く社会に輩出すべく、今後も協力活動を継続していく。さらには、現実的な対応として、本格的な代替水源の確保や農業などの産業と連動した事業に向けて、国際協力事業団JICAなどとの協力も欠かせない。

資料 井戸調査および地域の状況写真

資料 1 井戸の形態と利用状況 (2012年井戸調査より・・編集:松尾)

5.3 井戸の利用と形態に関する研究 関連資料

堀井戸 1

井戸番号 25-1 集落名 : Shrinagar(シリナガル) 調査日 : 3/3 10時48分
位置 : 北緯 27度 30分 745秒 東経 83度 43分 450秒 設置年 : 100年~150年前
井戸(施設)の種類 : INARP 深さ : 備考参照 飲用以外に利用
備考 : 井戸枠高 0.15m, 水面まで 2.85m, 井戸底 5.25m



井戸番号 21-2 集落名 : Sarawal(サラワル) 調査日 : 3/3 12時12分
位置 : 北緯 27度 30分 160秒 東経 83度 43分 691秒 設置年 : 100年以上前
井戸(施設)の種類 : INAR 深さ : 備考参照 飲用以外に利用
備考 : 井戸枠高 0.30m, 水面まで 6.55m, 井戸底 7.45m



井戸番号 3-2 集落名 : Jawa(ジャワ) 調査日 : 3/4 9時05分
位置 : 北緯 27度 32分 779秒 東経 83度 42分 779秒 設置年 : 150年前
井戸(施設)の種類 : INAR 深さ : 水面まで 3.32m, 井戸底まで 6.78m
寺の前にある井戸。30年前から使っていない。近いうちに利用できるようにするらしい



堀井戸 2

井戸番号 4-4 集落名：Khokharpurwa(コカプルワ) 調査日：3/4 14時35分
位置：北緯27度32分617秒 東経83度44分006秒 設置年：120年前
井戸（施設）の種類：INAR 深さ： 飲用○
蓋を設置予定ということであったが、2014年調査時（2年後）にはまだ蓋は無かった



井戸番号 8-1 集落名：Mahuwa(マフワ)
位置：北緯27度31分234秒 東経83度44分010秒 調査日：3/5 12時00分
井戸（施設）の種類：INAR 深さ：備考参照 設置年：150年前
備考：傍にこの井戸を利用したポンプがある。他にもホースで配水されている。コンクリート板で塞がれる。外径2.8m, 内径2m, 井戸枠高0.95m, 水面まで4.95m, 井戸底9.30m



井戸番号 8-2 集落名：Mahuwa(マフワ)
位置：北緯27度31分505秒 東経83度44分112秒 調査日：3/5 12時08分
井戸（施設）の種類：INAR 深さ：備考参照 設置年：200年前
備考：蓋なし、6本の木を組んだものを（腐食しつつある）枠の上に載せている。外径2.1m, 内径1.5m, 井戸枠高0.26m, 水面まで3.25m, 井戸底5.65m



JICA 支援 (九州大学/ENPHO) 井戸

井戸番号 21-3 集落名 : Sarawal(サラワル) 調査日 : 3/3 12時30分
位置 : 北緯 27 度 30 分 765 秒 東経 83 度 43 分 765 秒 設置年 : 2012 年 2 月
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 175 フィート 飲用○
備考 : 九大, ENPHO, JICA 支援 (B-26 Model TubeWell のプレートあり).
2014 年調査では利用されていなかった



井戸番号 4-5 集落名 : Khokharpurwa(コカプルワ) 調査日 : 3/4 14時40分
位置 : 北緯 27 度 32 分 629 秒 東経 83 度 44 分 020 秒 設置年 : 1ヶ月前
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 150 フィート 飲用○
工事中, 水が出ない (出にくい)



井戸番号 27-5 集落名 : Manari(マナリ) 調査日 : 3/6 11時15分
位置 : 北緯 27 度 31 分 628 秒 東経 83 度 42 分 542 秒 設置年 : 1ヶ月前
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 170 フィート 飲用
備考 : ENPHO/KYUSHU による. まだ使えない. 2014 年調査では利用されていなかった.



共同の井戸（赤十字支援）

井戸番号 1-3 集落名：Patkhauri(パトカウリ)
位置：北緯 27 度 33 分 246 秒 東経 83 度 43 分 584 秒
井戸（施設）の種類：PUMP 深さ：55 フィート
赤十字の支援設置. 150~200 人が利用する.

調査日：3/4 11 時 25 分
設置年：16 年前
飲用○



公共場の井戸

井戸番号 51-1 集落名：.Pipara(ピパラ) の学校
位置：北緯 27 度 31 分 01 秒 82 東経 83 度 44 分 07 秒 05
井戸（施設）の種類：PUMP 深さ：65 フィート
BALRUPRI（バルプリー）スクール

調査日：3/3 16 時 15 分
設置年：3 年前
飲用，その他



井戸番号 27-1 集落名：Manari(マナリ)
位置：北緯 27 度 31 分 795 秒 東経 83 度 42 分 501 秒
井戸（施設）の種類：PUMP 深さ：75 フィート

調査日：3/6 10 時 47 分
設置年：11 年
飲用×

備考：VDC の施設（集会所）にある。隣の病院にも配水されている。ヒ素が高いといわれている。DVC 施設に来た子どもたちがそのまま水を飲んでいた。



山からの引水利用

井戸番号 5-3 集落名 : Suryapura(スリヤプラ) 調査日 : 3/4 16時00分
位置 : 北緯 27 度 32 分 667 秒 東経 83 度 44 分 413 秒 設置年 : 1 年前
井戸 (施設) の種類 : 水道 深さ : 引水利用 飲用○
山から引いてきている水. 水道代は 20 ユニット=50 ルピー/月



管井戸 (コンクリートで流しを造ってある)

井戸番号 24-4 集落名 : Shrinagar(シリナガル) 調査日 : 3/3 9時45分
位置 : 北緯 27 度 30 分 948 秒 東経 83 度 43 分 231 秒 設置年 : 8 年前
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 60~70 フィート 飲用○
備考 : モーター設置 (3 年前)



井戸番号 12-4 集落名 : Kunawar(クナワル) 調査日 : 3/6 14時35分
位置 : 北緯 27 度 32 分 112 秒 東経 83 度 41 分 269 秒 設置年 : 8 ヶ月前
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 95 フィート 飲用 (フィルター使用)
備考 : 12-2 の敷地内. 家族(6 人)が使用.



管井戸（井戸周りに煉瓦を敷いたもの）

井戸番号 3-4 集落名： Jawa(ジャワ)
位置：北緯 27 度 32 分 928 秒 東経 83 度 42 分 973 秒
井戸（施設）の種類：PUMP 深さ：20 フィート
11 人で利用している。

調査日：3/4 9 時 25 分
設置年：22 年前
飲用以外



井戸番号 3-5 集落名： Jawa(ジャワ)
位置：北緯 27 度 32 分 990 秒 東経 83 度 42 分 968 秒
井戸（施設）の種類：PUMP 深さ：18 フィート
15 人が利用している。

調査日：3/4 9 時 50 分
設置年：2 年前



煉瓦で囲った井戸

井戸番号 1-1 集落名： Patkhauri(パトカウリ)
位置：北緯 27 度 33 分 264 秒 東経 83 度 43 分 545 秒
井戸（施設）の種類：PUMP 深さ：35 フィート
パトカウリは自然堤防上にある集落

調査日：3/4 11 時 10 分
設置年：40 年前
飲用○



排水溝沿いに設置された井戸

井戸番号 2-1 集落名 : Atharahati(アサラチ)
位置 : 北緯 27 度 32 分 943 秒 東経 83 度 43 分 586 秒
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 45 フィート
政府で設置した.

調査日 : 3/4 10 時 05 分
設置年 : 4 ヶ月前
飲用○



井戸番号 24-5 集落名 : Shrinagar(シリナガル)
位置 : 北緯 27 度 30 分 795 秒 東経 83 度 43 分 206 秒
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 60~70 フィート
備考 : この集落には 65 軒ほどの家がある. 井戸は 1 万ルピーで掘った.

調査日 : 3/3 10 時 10 分
設置年 : 2 年前
飲用○



井戸番号 11-1 集落名 : Aharauli(アハラウリ)
位置 : 北緯 27 度 32 分 383 秒 東経 83 度 42 分 923 秒
井戸 (施設) の種類 : PUMP 深さ : 82 フィート
備考 : 25 家族で使っている. ヒ素が無いといわれ, 周辺の人も飲み水に使っている.

調査日 : 3/6 15 時 10 分
設置年 : 22 年前
飲用○



不衛生な井戸

井戸番号 6-3 集落名：Jamuniya(ジャムニヤ) 調査日：3/4 16時58分
位置：北緯27度31分911秒 東経83度44分499秒 設置年：6年前
井戸（施設）の種類：水道 深さ：55フィート 飲用○
砒素の病気？父（50歳，子14歳の足裏が黒い



井戸番号 10-3 集落名：Paratikar(パラティカル) 調査日：3/6 16時23分
位置：北緯27度32分685秒 東経83度42分065秒 設置年：20年前
井戸（施設）の種類：PUMP 深さ：65フィート 飲用○その他利用
備考：20~27家族が共同使用．水が出ないところが多いので，井戸がないところが多い．



使われていない堀井戸

井戸番号 9-2 集落名：Pipara(ピパラ) 調査日：3/5 11時20分
位置：北緯27度31分266秒 東経83度43分981秒 設置年：約150年前
井戸（施設）の種類：堀井戸 深さ：水面まで2.15，井戸底まで2.55m
備考：7年前まで使用（2012年調査時）．開口部は地面より低い．草木に覆われている．



資料2 集落の風景・生活（写真）

風景



水牛の水浴びをする牛飼い



干草、稲藁などを運ぶ運搬用牛車 牛は農耕，運搬に欠かせない



草を食べさせながら移動する水牛と飼い主



牛糞を頭に乘せ川を渡っていく女性. 川向こうに牛糞の干し場がある.
川の水位は膝くらいで，容易に渡っている
(8月乾季で，流れが少なく滞留している.)



牛糞（燃料用）干し場



家の壁を利用する牛糞干し

生活



結婚式用の料理を沢山つくっている



家の庭先で菜種干し 3月



米を煎っている。日本でもたべたことのある
(米菓子として売られている)



庭先で干草を食べる牛 煉瓦積の家



収穫した菜種を頭に載せて自宅（作業場）へ
運ぶ女性。



収穫乾燥して積んだ菜種を牛2頭をまわし
ながら踏ませて脱穀する。

家屋



細い丸太を利用した壁. 入り口部分に設けられている. 住居部分は土壁,瓦屋根



竹と土を使った壁の伝統的家屋. 屋根は素焼きの瓦. 伝統的家屋は窓が小さい.



コカプルワの村長の家



マフワの村長の家. 壁は煉瓦積塗壁



藁屋根, 土壁の伝統的家屋



煉瓦モルタル壁とトタン屋根の家



トタン屋根, 土壁の家



完成したコカプルワの高校. 階上支柱鉄筋がむき出し, 2階を増築するものと思われる。

子ども・少年



調査していると集まってきた子ども達



家の土間で泥で遊ぶ子ども



OK バジさんと子ども達 (マフワにて)



マフワ集落の北端にある大木. 大木の下・日陰で休憩する人もある



おやつ 炊いた餅米を鍊った物



裸足でバレーボールを楽しむ少年達 (ネパールではバレーボールが人気)



バルプリ小学校の子ども達



ホーリー (春を祝う祭り). 顔に赤い色を塗って遊ぶ子ども達 2012年3月

あとがき

ヒマラヤの山中で日本のリンゴ栽培に成功しているジョムソムでの農業気象観測の後、大岡健三氏とともにテライ低地におけるヒ素汚染調査協力者のカンデル氏とチトワンのバラトブルで出会ったのは、2007年の夏のことであった。彼は敬愛大学留学生の従兄で、地元の大学講師やボーディングスクールを経営する、地元教育界の若手名士であった。

彼の家に1泊した後、彼が手配してくれたタクシーと一緒に乗り込み、カトマンズで入手した1/2.5万分の1地形図を頼りにナワルパラシの現地に向かった。ここは一面に水田が広がるネパールの穀倉地帯で、集落が散在する。東西6km、南北10kmの範囲を調査地域と定め、地域内30集落の水質について測定するとともに、サンプリングした水は日本国内で精密分析のために持ち帰った。以後、2008年3月、2009年8月にも同様な調査を実施し、ネパールのヒ素濃度基準である50ppbをはるかに超え、10~20倍にも達する高濃度のヒ素井戸分布、井戸の深さによるヒ素濃度の変化、季節変化などが明らかになった。

これらの研究成果を基に申請した科研費基盤研究(B)海外学術調査が2011年度に採択され、5年間の調査研究が始まった。これまでの調査では、1集落1サンプルの水質調査が中心であったが、科研費研究では、ヒ素汚染地域の「大気」、「水」、「土」、「人」さらに「対策」についての総合的に調査を開始した。

第1回目の2012年3月の調査では、大量の調査機材を輸送しなければならなかったが、どのようにすれば確実に送ることができるのか大変苦労した。2007年に雨量計をカトマンズとポカラの郵便局宛に送ったことがあった。その時、カトマンズではバンダ（ストライキ）の真最中で、受け取ることができなかった。ポカラでは到着までに3か月を要した。このような経験から、JICAに送り、無事受け取ることができた時には本当に感激した。また、現地の治安にも注意を払った。調査地域はインド国境に近く治安が心配であった。2007年の調査時には、タクシーのドライバーから、日本人のみで行動することを強く注意された。こんなこともあり、在ネパール日本大使館を通じて現地の警察に「現地調査実施」の届け出をした。また、現地の宿泊所にも注意を払った。国境に近いバイラワよりも山側のプトワルの方が安全だと聞き、周囲がコンクリート製の塀で囲まれ、ガードマンが常駐するホテルを宿泊所にした。カトマンズから現地への移動には、2-3台のハイエースなどを使用した。充分整備された自動車を手配したにもかかわらず、途中でブレーキが故障したり、タイヤが擦り減っていたりと故障も相次いだ。

2012年ごろには、バンダがかなり頻繁に行われていた。カトマンズ市内から出られなかったり、途中で通行止めに遭ったり、またある時は、準備してホテルから出ようとしたところ、バンダで道路には自動車が1台も走っていないということもあった。その時には、研究協力者のハリさんのお父さんのお力添えをいただき、パトカーの先導で調査現場に向かったことも懐かしい思い出となった。

ネパール国内における総合的な気象観測は、カトマンズ、ポカラで行われているのみであり、我々は、テライ低地で総合気象観測をするために、この地に気象ステーションを設置した。設置に当たっては、危機管理に細心の注意を払い、周囲がコンクリート製の塀で囲まれ、門扉が施錠されるバルプリ小学校校庭の一角に設置させて頂いた。気象ステーションでは、2年半にわたって連続データを収集することができた。

調査期間中、ネパール人の時間感覚には閉口した。朝9時に井戸屋さんと約束しても、実際に来たのは昼ごろということもしばしばあった。彼らは自動車を持たずどこまでも自

転車で移動する。井戸掘りのための鉄管などの資材も自転車で運んで来るので、時間もかかるようだ。地質構造調査のためのボーリングは、地元のこの井戸屋さんに頼んだ。鉄管をテコの原理を使った竹竿の先で上下させながら、ほぼ1日で20mは掘り進んだ。最高気温が40℃にも達する炎天下で、地質調査班は、掘り出される粘土や砂の状況を、終日チェックし続けた。

最初の調査段階では、全ワード(集落)を対象として水質、生活実態調査を実施したが、やがて特色ある2ワードを抽出し、コカプルワとマフワの全世帯調査を実施した。両ワードの全ての井戸について、設置年、深さ、水質、利用状況などについて調べ、詳細な聞き取り調査も実施した。

調査中に、予想もしない事実を知った。コカプルワでは、2013年に7人の方が毒蛇にかまれて死んだということであった。我々は、ヒ素被害について調査してきたのであるが、もう一つの別な問題があることを初めて知った。毒蛇の被害に遭う家は、土壁の粗末な家だそうだ。ヒ素汚染の被害は、不衛生な井戸の利用とも関係し、どちらも貧困と深く結びついているものと考えられる。

2014年8月に最後の現地調査を実施し、8月20日に、マナリの集会場にて現地報告会を開催した。10時開会であったが、この時点では来場者は1人であった。10時半になって2-3人。11時でも5人ほどであった。その後増えだし、ようやく開会できたのは11時半であった(参加者約40人)。これもネパール時間である。北隣のバルパ県で国際支援活動を20年にわたって実施して来たOKバジこと垣見一雅氏に「基調講演」をお願いし、「バルパにおける飲料水の確保」について講演頂いた。

その後、我々の調査結果の報告に入り、下記の事項について、詳しく報告した。

- ① 井戸は、汚水の近くに設置しない。排水が井戸に浸み込まないような構造にする。
- ② 深さ45~75フィートの井戸水のヒ素濃度が高い傾向にある。ヒ素濃度が高い場合には、これよりも深く掘り下げる。
- ③ 水質基準50ppbを、大きく上回る(1000ppb以上)ものもある。乾季には、雨季よりヒ素濃度が高まる。
- ④ ヒ素除去フィルターの使用により、ヒ素濃度は数分の一に減少する。
- ⑤ 雨水には、ヒ素は全く含まれていない。

これらの報告の後で、住民から活発な質疑があり、ヒ素濃度の低い深層の地下水を汲みあげ、簡易水道として利用するオーバーヘッドタンク方式を、参加者全員が希望していることが分かった。このタンクの設置には、高額な費用がかかるため、実現は難しい。そこで、費用を抑えて同等の効果が期待できる方法について、現地の人々の意向を取り入れながら、その実現の道を模索していくことが、今後の重要な課題となろう。

今回の海外調査は、奇しくも2011年の東日本大震災後に始まり、2015年のネパール大震災で終わる結果となった。この間の現地調査実施にあたっては、在ネパール日本大使館、JICAカトマンズ事務所、ネパール気象台、NPO ENPHO、バルプリ小学校、コカプルワ高校などの諸機関のご協力を頂いた。特にJICAの遠藤昭雄氏には、現地までお越し頂き、また気象台のRamchandra Karki氏には、全天日射計の設置、気象データの提供などご援助いただいた。また、地質調査実施に先立ち、NISSAKUカトマンズ事務所のGam Prasad Gurung氏からは、パラシにおける深さ80mまでのボーリングデータの提供を受けた。その他に、現地における多数の方々の協力を受け、無事調査を終了することができた。ここに記して、衷心より厚く御礼申し上げる次第である。

研究課題・研究組織

研究種目	基盤研究（B）海外学術調査
研究課題名	「ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染の実態とその対策に関する研究」
課題番号	23401006
研究期間	平成 23（2011）年度～平成 27（2015）年度
研究経費	2011 年度 6,240,000 円 (直接経費 4,800,000 円、間接経費 1,440,000 円) 2012 年度 4,030,000 円 (直接経費 3,100,000 円、間接経費 930,000 円) 2013 年度 3,770,000 円 (直接経費 2,900,000 円、間接経費 870,000 円) 2014 年度 3,770,000 円 (直接経費 2,900,000 円、間接経費 870,000 円) 2015 年度 650,000 円 (直接経費 500,000 円、間接経費 150,000 円) 合計金額 18,460,000 円 (直接経費 14,200,000 円、間接経費 4,260,000 円)

研究代表者

中村圭三 敬愛大学国際学部国際学科・教授
〒263-8588 千葉県千葉市稲毛区穴川 1-5-21
e-mail : knakamura@u-keiai.ac.jp

研究分担者

駒井 武：東北大学大学院環境科学研究科・教授
松尾 宏：敬愛大学国際学部・非常勤講師
大岡健三：敬愛大学総合地域研究所・客員研究員
谷地 隆：敬愛大学総合地域研究所・客員研究員
松本 太：敬愛大学国際学部・非常勤講師

研究協力者

成澤 昇：(株)環境地質研究所・代表
西田茂博：元駿台予備校講師
Shrestha Rosan：敬愛大学国際学部国際学科卒業生
Ghimire Hari Prasad：千葉大学大学院人文社会研究科・大学院生

海外研究協力者

Dr. Suman K. Shakya：Environment and Public Health organization (ENPHO)
Dr. Makhan Maharjan：ENPHO
Bhanu Bhakta kandel：Birendra multiple college (Tribhuvan University)
Gam Prasad Gurung：Self-reliant society service center
Ramanand Pandey：Staff of the field work
Jit Bahadur Chaudhary：Staff of the field work

執筆者一覧

はしがき 中村圭三

1. まえがき

- 1.1 中村圭三 (敬愛大学国際学部・教授)
- 1.2 中村圭三
- 1.3 中村圭三

2. 気象・気候学的研究

- 2.1 中村圭三・松本太 (敬愛大学国際学部・非常勤講師)
- 2.2 中村圭三・松本太
- 2.3 松本太・中村圭三

3. ヒ素に関する水文学的研究

- 3.1 駒井武 (東北大学大学院環境科学研究科・教授)
- 3.2 駒井武

4. ヒ素に関する地形・地質学的研究

- 4.1 大岡健三 (敬愛大学総合地域研究所・客員研究員)
- 4.2 大岡健三
- 4.3 駒井武・大岡健三・成澤昇 ((株)環境地質研究所)
- 4.4 駒井武・大岡健三・成澤昇

5. 住民の実態調査に関する研究

- 5.1 谷地隆 (敬愛大学総合地域研究所・客員研究員)
B.B.Kandel (Birendra multiple college (Tribhuvan University))
中村圭三・大岡健三・松尾宏 (敬愛大学国際学部・非常勤講師)
- 5.2 松尾宏
- 5.3 松尾宏・B.B.Kandel
- 5.4 松尾宏

6. ヒ素汚染対策に関する研究

- 6.1 中村圭三
- 6.2 駒井武
- 6.3 駒井武
- 6.4 松尾宏

7. まとめ 中村圭三

資料編 松尾宏

あとがき 中村圭三

その他研究情報 中村圭三

(編集：松尾、中村、大岡)

現地調査の概要

【2011 年度】 調査期間：2012 年 2 月 25 日～3 月 11 日

地下水の動態とその利用の実態を把握するとともに、ボーリング調査を行い、ヒ素の濃集メカニズムを明らかにするための調査を開始した。また、ヒ素汚染対策として、雨水利用を推進するための調査研究もあわせて実施した。

その具体的内容は、次の通りである。

(1) 調査地域における気象・気候とヒ素汚染の実態およびその原因に関する調査

① 気象・気候に関する調査

気温・相対湿度・風向・風速・降水量・日射などの基本的気象要素を 30 分ごとにルーチン観測するための気象ステーションをピパラの小学校校庭に設置した。

② 地下水動態および水質調査

調査地域内の約 20 集落において、地下水の水位の異なるポンプ井戸および開放井戸各 1 について、それぞれの地下水位・水温・pH・RpH・EC・ORP・DO・簡易ヒ素濃度などについて現地で測定した。また、ヒ素やその他の成分については、サンプリングの後、イオンクロマトグラフ、および ICPM-8500 で分析した。

③ 地質構造に関する調査

調査地域内 3 か所で地下約 20m のボーリングを行い、ヒ素濃度と地質・地下水環境との関係を調査した。(研究分担者:駒井武, 戸田真夏研究協力者:大岡健三)

(2) ヒ素汚染された地下水を利用している住民を対象とした実態調査

調査地域内の約 20 集落において、各集落で 5～6 人に対し、飲料水・生活用水等についての意識、井戸の利用形態・対策等に関する聞き取り調査を実施した。

(3) ヒ素汚染対策

前述の小学校の校舎に雨水利用装置を設置し、雨水を利用したヒ素汚染対策の研究に取り組む。

【2012 年度】 調査期間：2012 年 8 月 15 日～8 月 31 日

前年度に引き続き、地下水の動態とその利用の実態を把握するとともに、ボーリング調査を行い、ヒ素の濃集メカニズムを明らかにするための調査を実施した。また、ヒ素汚染対策として、雨水利用を推進するための調査研究もあわせて実施した。

その具体的内容は、次の通りである。

(1) 調査地域における気象・気候とヒ素汚染の実態およびその原因に関する調査

① 気象・気候に関する調査

ピパラのバルプリ小学校校庭に設置した気象ステーションにより、気温・相対湿度・風向・風速・降水量・日射などの基本的気象要素を 30 分ごとにルーチン観測し、解析した。

② 地下水動態・水質および地質構造に関する調査

調査地域内の約 20 集落において、地下水の水位の異なるポンプ井戸および開放井戸各 1 について、それぞれの地下水位・水温・pH・RpH・EC・ORP・DO・簡易ヒ素濃度などについて現地で測定した。また、ヒ素やその他の成分については、サンプリングの後、イオンク

ロマトグラフ，および ICPM-8500 で分析した。また，地質構造に関しては，平成 23 年度に引き続き，調査地域内数か所に観測井戸を掘削し，ヒ素濃度と地質・地下水環境との関係を調査した。

(2) ヒ素汚染された地下水を利用している住民を対象とした実態調査

2011 年度に調査地域内の約 20 集落において，飲料水・生活用水等についての意識，井戸の利用形態・対策等に関する聞き取り調査を実施した。2012 年度には，その結果について解析した

(3) ヒ素汚染対策

雨水を利用したヒ素汚染対策の研究に取り組んだ。平成 23 年度に設置した雨水利用装置の改修および新規実験装置を設置した。

これらの成果については，日本地理学会秋季大会，春季大会で発表した。これらの成果については，日本地理学会秋季大会（神戸大学），春季大会（立正大学・熊谷）で発表した。

【2013年度】 調査期間：2014年2月24日～3月10日

本年度も地下水の動態とその利用の実態を把握するとともに，ボーリング調査を行い，ヒ素の濃集メカニズムを明らかにするための調査を実施した。また，ヒ素汚染対策として，雨水利用を推進するための調査研究もあわせて実施した。

その具体的内容は，次の通りである。

(1) 調査地域における気象・気候とヒ素汚染の実態およびその原因に関する調査

① 気象・気候に関する調査

ピパラのバルプリ小学校校庭に設置した気象ステーションにより，気温・相対湿度・風向・風速・降水量・日射などの基本的気象要素を30分ごとにルーチン観測し解析した。また，屋根・壁面の素材の異なる3種類の家屋において，室内気候に関する観測を実施した。

② 地下水動態および水質調査

調査地域内の2集落(Mahuwa, Khokharpuruwa)において，全てのポンプ井戸および開放井戸について，それぞれの地下水位・水温・pH・RpH・EC・ORP・DO・簡易ヒ素濃度などについて現地で測定した。また，ヒ素やその他の成分については，サンプリングの後，イオンクロマトグラフ，およびICPM-8500で分析した。

③ 地質構造に関する調査

調査地域内の2カ所(Patkhaulii, Dewagau)に観測井戸を各1掘削し，ヒ素濃度と地質・地下水環境との関係について調査した。

(2) ヒ素汚染された地下水を利用している住民を対象とした実態調査

調査地域内の2集落(Mahuwa, Khokharpuruwa)において，全ての世帯を対象として飲料水・生活用水等についての意識，井戸の利用形態・対策等に関する聞き取り調査を実施した。

(3) ヒ素汚染対策

雨水利用，鉄共沈，その他によるヒ素汚染対策の研究に取り組んだ。

これらの成果については，日本地理学会秋季大会（福島大学），春季大会（国士舘大学），社会地質学会で発表した。

【2014年度】 調査期間：2014年8月13日～9月1日

最終調査を実施し、これまでの調査結果について再確認をするとともに、現地およびカトマンズにて調査結果報告会を開催した。また、現地において、ヒ素汚染対策を実施した。

本研究では、前述の目的を達成するために、ネパール国テライ低地のナワルパラシ郡パラシの東西約6km、南北約10kmの地域において、雨季である8月中旬から下旬にかけての期間に、下記の調査を実施した。

(1) 調査地域における気象・気候とヒ素汚染の実態およびその原因に関する調査

① 気象・気候に関する調査

気温・相対湿度・風向・風速・全天日射量・降水量・蒸発量および屋内気候観測。

② 地下水流動に関する調査

特色ある2ワード(Mahuwa, Khokharpuruwa)および調査地域全域における、ヒ素濃度、水収支調査。

③ 地質構造に関する調査

観測井戸掘削(3箇所)、ヒ素濃度と地質・地下水環境との関係調査。

(2) ヒ素汚染された地下水を利用している住民を対象とした実態調査

Mahuwa, Khokharpuruwa および調査地域全域における、住民生活、井戸水利用等に関する意識調査。

(3) ヒ素汚染対策

雨水利用、鉄共沈、その他によるヒ素汚染対策の研究に取り組んだ。

(4) 調査結果報告会

現地およびカトマンズにおいて、調査結果報告会を開催した。

これらの成果については、日本地理学会秋季大会(富山大学)、第24回環境地質学シンポジウム(日本大学)で発表した。

研究成果の発表

雑誌論文

- 大岡健三・駒井 武・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本 太・谷口智雅 2013：
ネパール・テライ低地の砒素汚染と上流域の関係。環境地質学論文集，23, 147-152.
- 駒井 武・大岡健三・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本 太・谷口智雅 2013：
ネパール・テライ低地における砒素汚染と地質環境の関係。環境地質学論文集，23,
153-158.
- 中村圭三・松尾 宏・大岡健三 2014：ネパールの自然環境に適した産業・生活、その変
容と現代的課題について。敬愛大学国際研究，No.27, 1-17.
- 中村圭三・松本太・濱田浩美・駒井武・大岡健三・谷地隆・松尾宏・谷口智雅・戸田真夏
2014：ネパール・テライ低地における気候環境調査。法政地理，No.46, 17-24.
- 松尾宏・中村圭三・谷地隆（2014）：ネパール・テライ低地農村の生活と水利用に関する
研究。敬愛大学総合地域研究，4, 110-126.
- 濱田浩美・中村圭三・駒井武・大岡健三・谷口智雅・谷地隆・松本太・戸田真夏・松尾宏・
ギミル ハリ プラサド 2014：ネパール・テライ低地における地下水砒素汚染。千葉
大学教育学部研究紀要，62, 385-392.
- 大岡健三・駒井 武・成澤昇・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本 太 2014：
ネパール・テライ低地の砒素汚染と周辺地質。環境地質学論文集，24, 45-50.
- 駒井 武・大岡健三・中村圭三・濱田浩美・成澤昇・松尾 宏・谷地 隆・松本 太 2014：
ネパール・テライ低地における砒素汚染の現地調査と対策。環境地質学論文集，24,
51-56.
- 駒井 武・中村圭三・ネパール調査チーム 2014：ネパールにおけるひ素地下水汚染の現
地調査（速報）。環境管理，Vol.50, No.11, 22-26.
- 中村圭三・松本 太 2014：ネパール・テライ低地における気候環境の現地調査。環境管
理，Vol.50, No.11, 27-31.
- 中村圭三・松本 太・駒井 武・松尾 宏・谷地 隆・大岡健三 2015：ネパール・テラ
イ低地中央部ナワルパラシにおける全天日射量・降水量・蒸発量観測結果（2013）。敬
愛大学総合地域研究，No.5, 43-49.
- 松尾 宏・中村圭三 2015：ネパール・テライ低地における農村集落の水利用に関する研
究。敬愛大学国際研究，No.28, 33-49.

学会発表

- 中村 圭三・駒井 武・濱田浩美・大岡健三・谷口智雅・谷地 隆・松本 太・戸田真夏・
松尾 宏：ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染の実態とその対策に関する研究。日
本地理学会秋季学術大会（神戸大学），2012年10月6・7日。
- 松尾 宏・谷地 隆・中村 圭三・駒井 武・濱田浩美・大岡健三・谷口智雅・松本 太・
戸田真夏：ネパール・テライ低地における農村集落の水利用に関する研究。日本地理
学会秋季学術大会（神戸大学），2012年10月6・7日。
- 濱田浩美・中村 圭三・駒井 武・大岡健三・谷口智雅・谷地 隆・松本 太・戸田真夏・
松尾 宏：ネパール・テライ低地における乾季の地下水ヒ素汚染。日本地理学会秋季
学術大会（神戸大学），2012年10月6・7日。
- 濱田浩美・中村 圭三・駒井 武・大岡健三・谷口智雅・谷地 隆・松本 太・戸田真夏・
松尾 宏：ネパール・テライ低地における地下水ヒ素汚染 ―乾季と雨季の水質変化。

- 日本地理学会春季学術大会 (立正大学), 2013年3月29日.
- 中村 圭三・駒井 武・濱田浩美・大岡健三・谷口智雅・谷地 隆・松本 太・戸田真夏・松尾 宏: ネパール・テライ低地におけるヒ素汚染の実態とその対策に関する研究(2). 日本地理学会春季学術大会 (立正大学), 2013年3月30日.
- 松尾 宏・中村圭三・谷地隆・Bhanu Bhakta Kandel: ネパール・テライ低地における農村集落の水利用に関する研究 (2). 日本地理学会春季学術大会 (立正大学), 2013年3月30日.
- 戸田真夏・谷口智雅・岡安聡史: ネパール・テライ低地, パラシ東方の地形—地形図と空中写真による研究. 日本地理学会春季学術大会 (立正大学), 2013年3月29・30日.
- 濱田浩美・中村圭三・駒井 武・大岡健三・谷口智雅・谷地 隆・松本 太・戸田真夏・松尾 宏: ネパール・テライ低地における雨季の地下水ヒ素汚染. 日本地理学会春季学術大会 (立正大学), 2013年3月29・30日.
- 谷口智雅・濱田浩美・Bhanu Bhakta Kande・岡安聡史: ネパール・テライ低地ナワルパラシにおける開放井戸と地下水利用. 日本地理学会春季学術大会 (立正大学), 2013年3月29・30日.
- 中村圭三・松本 太・濱田浩美・駒井 武・大岡健三・谷地 隆・松尾 宏・谷口智雅・戸田真夏: ネパール・テライ低地における気象観測結果 (2012年度). 日本地理学会秋季学術大会 (福島大学), 2013年9月28・29日.
- 駒井 武・大岡健三・中村圭三・濱田浩美・成澤 昇・松尾 宏・谷地 隆・松本 太: ネパール・テライ低地における砒素汚染と地質環境の関係. 社会地質学会 (産業技術総合研究所), 2013年11月30日.
- 大岡健三・駒井 武・成澤 昇・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本 太: ネパール・テライ低地の砒素汚染と上流域の関係. 社会地質学会 (産業技術総合研究所), 2013年11月30日.
- 松本 太・中村圭三・浜田浩美・谷地 隆・駒井 武・大岡健三・松尾 宏・谷口智雅・戸田真夏: ネパール・テライ低地における住居の屋内温熱環境. 日本地理学会春季学術大会 (国士舘大学), 2014年3月27・28日.
- 松尾 宏・中村圭三・谷地隆・Bhanu Bhakta Kandel: ネパール・テライ低地における農村集落の水利用に関する研究 (3). 日本地理学会秋季学術大会 (富山大学), 2014年9月20・21日.
- 松本 太・中村圭三・浜田浩美・谷地 隆・駒井 武・大岡健三・松尾 宏: ネパール・テライ低地中央部ナワルパラシにおける住居の屋内温熱環境 (2). 日本地理学会秋季学術大会 (富山大学), 2014年9月20・21日.
- 中村圭三・松本 太・濱田浩美・駒井 武・大岡健三・谷地 隆・松尾 宏: ネパール・テライ低地中央部ナワルパラシにおける全天日射量・降水量・蒸発量観測結果 (2013). 日本地理学会秋季学術大会 (富山大学), 2014年9月20・21日.
- 大岡健三・駒井 武・成澤 昇・中村圭三・濱田浩美・松尾 宏・谷地 隆・松本 太: ネパール・テライ低地の砒素汚染と周辺環境. 第24回環境地質学シンポジウム (日本大学), 2014年11月28日.
- 駒井 武・大岡健三・中村圭三・濱田浩美・成澤 昇・松尾 宏・谷地 隆・松本 太: ネパール・テライ低地における砒素汚染の現地調査と対策. 第24回環境地質学シンポジウム (日本大学), 2014年11月28日.

2015年12月

平成23~27年度科学研究費補助基盤研究（B）23401006

ネパール・テライ低地における
ヒ素汚染の実態とその対策に関する研究
研究成果報告書

**Current Status of Arsenic Contamination and its
Countermeasures in Terai Lowland, Nepal**

代表 中村圭三（敬愛大学国際学部教授）

敬愛大学国際学部

電話：043-251-6363 FAX:043-251-6407

E-mail:knakamura@u-keiai.ac.jp

nepalkenkyu@gmail.com