

Bangladeshにおける安全な飲料水の選択行動分析

萩原良巳・柴田 翔*・萩原清子**・福島陽介***・酒井 彰****・高橋邦夫*****

* 京都大学大学院工学研究科

** 佛教大学社会学部

*** 国土交通省

**** 流通科学大学情報学部

***** 日本下水文化研究会

要 旨

近年、Bangladeshにおいて飲料水のヒ素汚染が問題となっている。また、Bangladeshは地理的立地条件から、洪水、渇水、塩害など多様な大災害が頻発し、経済的な貧しさもあってヒ素汚染に対して最も脆弱な地域として挙げられる。さらに導入されたる過装置なども適切な維持管理の欠如などから有効に機能していない例が多々見られる。本研究ではBangladeshにおける飲料水ヒ素汚染問題について、住民にとって受け入れられる代替案作成にあたり、現地の社会環境を把握し、飲料水を取り巻く状況のモデル化を目的とする。このため社会調査を実施し現地の飲料水利用状況を明らかにする。

キーワード: Bangladesh, ヒ素汚染問題, 社会調査, 水運びストレス, 共分散構造分析

1. はじめに

現在、Bangladeshにおいて地下水のヒ素汚染が問題となっている。ヒ素汚染された水を飲み続けると皮膚病やガンになり最悪の場合、死に至ることが分かっている。Bangladeshでは農村部の人口の97%が地下水を飲料水として利用している。Bangladeshは2007年11月にBangladesh南部を襲ったサイクロンのように洪水、渇水、塩害と多様な大災害を抱え、経済的にも世界の最貧国の一つとして挙げられている(萩原ら, 2003)。このため、自ら代替技術導入などの対策を行うことが難しくヒ素汚染問題に対して最も脆弱な地域の一つとして挙げられる。

Bangladeshでは池や川の表流水を飲料水として利用してきたが、1970年代以降より世界銀行や各国の援助によって人口増加や洪水による表流水汚染の感染症リスク回避を目的としてシャローチューブウェル(浅井戸)を導入し飲料水として利用してきた。ところが、1993年に地下水のヒ素汚染が発見されて飲料水のヒ素汚染が全国的な問題となった。

2000年までの調査によって国土の70%に及ぶ地域

にヒ素汚染が広がっていて、飲料水として利用される井戸の約30%がBangladesh政府の飲料水基準である0.05mg/L (WHO基準では0.01mg/L)を超えていることが分かった (Government of The People's Republic of Bangladesh, 2004)。

この対策として政府、世界銀行、海外NGOなどの機関は安全な飲料水供給のための代替技術を導入してきた。また近年、地下水のヒ素汚染問題はBangladesh国内で大きな社会問題となり、テレビや新聞、ラジオに大々的に取り上げられたことによりヒ素汚染問題は広く知れ渡り半ば常識となっている。

しかし、導入された代替技術は、メンテナンスの仕方が分からない、メンテナンスにお金が掛かる、ヒ素汚染問題は知っているが患者を見たことがない、味が悪いなど様々な理由で放置されていることが多い。また、家から水源までが遠く水運びが負担であるなど、ヒ素が人体に悪影響を及ぼすことを知りながらも家のすぐ近くにあるヒ素汚染された浅井戸を飲料水として利用している住民のように、導入された代替技術が有効に利用されていないことも多い。

このような状況からBangladeshにおける飲料水のヒ素汚染問題の軽減には、単にヒ素汚染除去技

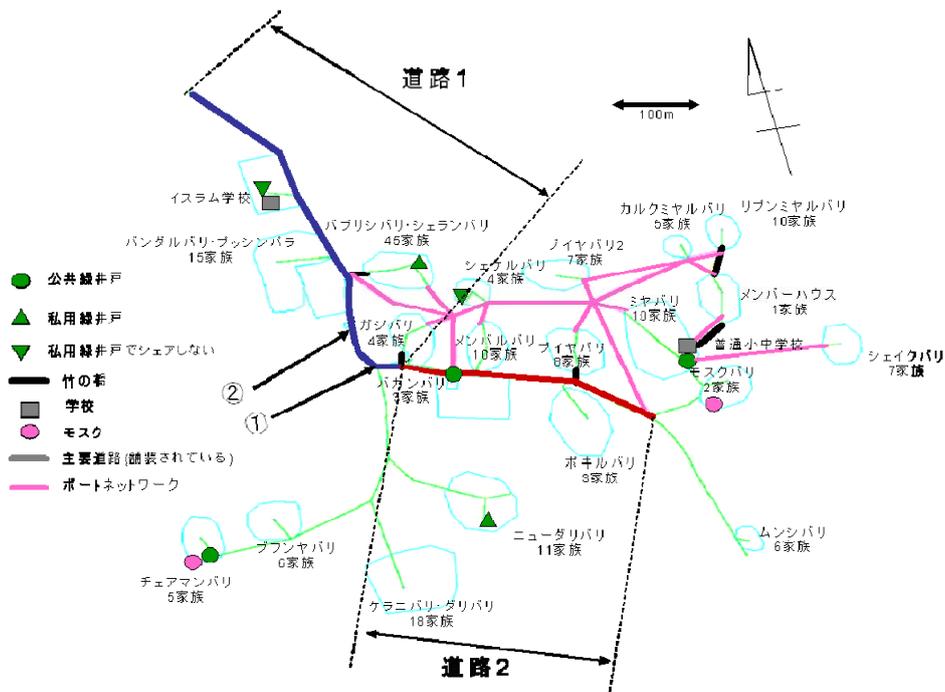


Fig.2 The map of Basailbogh

2.4 調査地の水利用について

バシヤイルボグ村ではヒ素汚染対策技術として、150mより深くヒ素に汚染されていない深層地下水を水源とする深井戸と、ヒ素除去フィルターのAIRP(arsenic iron removal plant)が利用されている。2007年9月時点で、公共の深井戸が3基、私用の深井戸が4基、私用のAIRPが2基の合計9つの水源が飲料水として利用されていた。公共の水源は誰でも利用できるが、私用の水源は所有者が利用を制限していることもあり、全体の25%に当たる30世帯が現在もヒ素に汚染された水を飲料水としている。各バリの使用水源についてTable 1に示す。

3. 単純集計と調査項目の関連分析

社会調査の結果について単純集計によって調査地の特徴を明らかにする。そして調査項目間の関連分析によって今後の分析に用いる代表項目を選出する。

3.1 単純集計結果の考察

バシヤイルボグ村はダッカ近郊の都市で農家よりもサービス業が多く、他の地方から移り住んできた世帯や数年で他の地方に移り住む世帯が多い。日本への出稼ぎに出る世帯も多く、トイレなどの設備が整った裕福な世帯も数多く見られた。また、ダッカ近郊ということもあり、村からすぐのマーケットには商店や病院があり物流も整っている。

集計結果から、調査地ではヒ素汚染問題と衛生問

題についての基本的な知識を持っていることが明らかになった。ヒ素汚染問題と衛生問題は新聞やテレビ、ラジオで取り上げられており、浅井戸がヒ素に汚染されていることや、排せつ物が表流水を汚染して感染症の原因となっているといった基本的な知識は常識となっている。

一方で、ヒ素汚染にどのような代替技術があるか、排せつ物をどうやって取り扱うか、生ごみのリサイクルなどの実際的な知識については世帯によって差があることも明らかになった。

飲料水の項目ではほとんどの世帯がヒ素汚染問題を心配していて現状の水環境に満足しておらず、安全な飲料水への欲求も高い。現在、安全とされている深井戸を使用しているも、その安全性を疑う世帯も多く、ヒ素汚染代替技術に費用、または労働でコストを負担しても良いと考えていることが明らかになった。

衛生に関する項目では飲料水と異なり世帯によって回答は大きく異なった。自由意見として飲料水は公共の問題で、衛生の、特にトイレについては個人の問題であるという意見が多く見られ、新しいトイレへの負担でもヒ素汚染代替技術より高額支払っても良いと回答する世帯が見られた。掃除の頻度などトイレの衛生状況は世帯によって異なり、現地住民の衛生の考え方は異なることが明らかになった。

生活に関する項目では、金銭的に豊かだからと言って生活に満足しているとは限らず、生活の満足度には様々な要因があると考えられる。

Table 1 Source of water

| Options | Place | User |
|--------------------------------------|-------------------------|---|
| Public deep tube-well | Mosque at Chairman bari | Chairman bari, Bhunnya bari |
| | Roadside | Gazi bari, Began bari, Member bari, Bhniya bari, Pokir bari, sarjon Alir bari |
| | School | Mosque bari, Mia bari, Sheikh bari |
| Private deep tube-well (share) | Bhandari bari | Bhandari bari Baburshi bari |
| | Sarang bari | Sarang bari, Baburshi bari |
| | Ripon miar bari | Ripon miar bari |
| Private deep tube-well (not share) | Islam school | |
| | Sheikh bari | Sheikh bari |
| AIRP | Kerani bari | Kerani bari |
| Shallow tube-well (all families) | all baris | NewDhali bari, Bhunnya bariMunshi bari, Member house, Khaleq miar bari |
| Shallow tube-well (part of families) | allbaris | Bhandari bari, Sarjon Alir bari, Ripon miar bari |

3.2 調査結果のバリ毎の特徴

バリ毎の集計結果の比較から知識や満足度、心配に関する項目ではバリ間での差異は見られなかった。しかし、マイクロクレジットの利用や水源、水運び行動、トイレなど、普段の生活の中で関わりのある行動ではバリ毎に特色が見られた。パシヤイルボグでは親戚が集まってバリとなることが多く、日常生活では密接な関係があり、バリ毎で行動に特色があると考えられる。

3.3 調査項目の関連分析

χ^2 値をもとに 2 つの項目間の関連を調べるクラメールの関連係数によって、回答の類似傾向を明らかにし今後の分析に用いる代表項目を選出する。

クラメールの関連係数は独立な 2 組のグループ間の関連の度合いを調べるのに用いられる (Cramer, 1945)。クラメールの関連係数の詳細については付録 1 に示す。

$$\text{クラメールの関連係数 } V = [\chi^2 / \{N(q-1)\}]^{1/2} \quad (1)$$

χ^2 はカイ 2 乗値、 N はサンプル数、 q は 2 項目のカテゴリ数 (選択肢の数) の少ないほうの数である。

複数回答可の質問項目については、それぞれを独立の項目として分析する。5 段階評価の項目の 5・4 や 2・1 の評価は程度を表しており、ここでは一つの意見として考える。5・4 と 2・1 をまとめて、5・4 を「3」、3 を「2」、2・1 を「1」という 3 段階の評価とする。

関連係数について、5% 有意を基準としてサンプル数とカテゴリ数を考慮し、0.25 以上を関連があるとす。代表項目選出の基準を以下に示す

- ① 他の項目と関連がある項目
- ② 現地調査やバングラデシュの状況から重要と考

えられる項目

- ③ 単純集計において回答が分かれている項目

- ④ 似たような項目を選ぶ場合には、概念的に上回る項目

これより関連のある項目をグループ化して類似傾向の項目を除き、今後の分析に用いる代表項目を選出した。

4. 水運びストレスのモデル化

2005 年の事前調査 (福島, 2006) から、地元住民にとって飲料水の水運びが大きな負担となっていることを明らかにした。本章では 2005 年 12 月と 2007 年 12 月に行われた現地調査のデータを下に水運びストレスをモデル化し、水運びの負担を定量的に評価する。

4.1 水運びストレスについて

飲料水の水運びは、コルシと呼ばれる壺で一度に約 10~20 リットルの水を運ぶ。現地調査から、日々の飲料水の水運びは女性の仕事であり、大きなストレスとなっている。また、水運びストレスには、水を汲んで運ぶ肉体的ストレスと、宗教上の理由による精神的ストレスの 2 種類があることが分かった。イスラム文化では女性は親族以外の男性と会うことを嫌い、不特定多数の男性の視線にさらされることを精神的な負担と感じている。本研究ではこの 2 つのストレスを水運びストレスとしてモデル化する。

また、調査地は雨季になると水に浸かる場所が多く、乾季と雨季では状況が大きく異なるので、乾季と雨季の季節ごとに考える。

単純集計より飲料水の水運びに関する行動パターンは、ほとんどの世帯がバリ内で同じ行動をとる。しかし、同じバリ内でも深井戸の所有者と対立しており利用させてもらえず、浅井戸を利用している世帯のように、世帯間の関係によって飲料水の入手先

が異なることもある。

肉体的ストレスは水を運ぶ量によって異なり、各世帯の人数によって変化する。以上より、水運びストレスは世帯を1つの単位として、世帯の人数を肉体的ストレスのウェイトとして用いる。バリ単位でストレスを考えると、バリ毎に各世帯の計算結果を集計して考える。

4.2 調査区間の設定

バシャイルボグでは雨季に地表の大部分が水に浸かり、道路から離れたバリは移動にボートやバリと道路をつなぐ竹橋が必要となる。マーケットにつながる道路とその他の区間では通行量も異なる。また、モスク前は男性が集まるなど、村の中でも場所によって肉体的ストレスと精神的ストレスの感じ方は変化すると考えられる。このため、通行量や移動の特性を考慮し調査地域を7つの区間に分割する。

区間0：自分のバリ内

バリ(集落)内は基本的に親族から構成される集団が居住していて女性は自由に行動できる。

区間1：道路1 (Fig.1 参照)

バシャイルボグ村でもっとも人通りが多く、雑貨屋が立ち並び男性がお茶を楽しむ。道路はマーケットに抜ける道でリキシャ (バングラデシュでよく見られる三輪自転車のタクシー)、オートバイが頻繁に通行する。夕方には仕事を終えた男性や子供が集まり、すぐ傍の橋の漁師の獲物を見学するなど憩いの場となっている。ここに留まる女性の姿はあまり見かけられず、足早に立ち去ることが多い。

区間2：道路2 (Fig.1 参照)

舗装された道路で、まれにリキシャ、オートバイが通る。通行量は比較的多い。

区間3：その他の歩行区域

自分のバリ以外の他のバリ内、一部舗装された道路、全ての舗装されていない道路を含む。通行量、人通りは少ない。

区間4：アップダウン

乾季におけるバリの入り口の急勾配の坂道で、足元は不安定である。

区間5：ボート移動区間

水に浸かっているボートが無ければ移動できない。

区間6：竹橋移動区間

雨季に道路とバリをつなぐ竹の橋で非常に不安定であり、慎重に渡る必要がある。

区間7：モスク前

バシャイルボグには2箇所のモスクがある。普段から男性が集まり会話を楽しんでいる、女性

の姿はほとんど見かけない。

これらの区間における移動距離を以下のように定義する。

$$d_i : \text{区間 } i \text{ における移動距離 } (i = 0, \dots, 7)$$

以下では各区間の移動距離 d_i を用いて肉体的ストレスと精神的ストレスを考える。

4.3 肉体的ストレスの定義

肉体的ストレスは水を運ぶことによる各世帯の肉体的な負担を表す指標で、ここでは水運びの仕事量と定義して、以下のように示す。

仕事量

= 各世帯の人数 (人) \times 1人当りの1日の飲料水の重量 (kg 重) \times 水源までの移動距離 (m)

肉体的ストレスのモデル化において、以下のパラメータを設定する。

n : 世帯の人数

m : 1人当りの1日の飲料水の重量

α_i : 区間 i における肉体的ストレスの係数

d_i : 区間 i における移動距離

移動距離について簡単のため全ての世帯は各バリの中心から出発するとして、バリの中心を基準とする。このモデルでは歩行距離を実距離として用いて、各区間の特性を考慮してそれぞれの区間における肉体的ストレスの係数を $\alpha_i (i = 0, \dots, 7)$ と設定する。これより肉体的ストレスを(2)に定式化する。

$$P = \text{仕事量} \\ \text{肉体的ストレス} = n \times m \times \sum_{i=0}^7 \alpha_i d_i \quad (2)$$

4.4 精神的ストレスの定義

精神的ストレスは水を運ぶ際の精神的な負担を表す指標で、水運びに掛かる時間、すなわち、不特定多数の男性の目にさらされている時間と定義して以下のように示す。

水運びに掛かる時間

= 水源までの移動距離 (m) \div 歩行速度 (m/分)

+ 汲み上げに掛かる時間 (分)

精神的ストレスのモデル化において、以下のパラメータを設定する。

β_i : 区間*i*における精神的ストレスの係数
 d_i : 区間*i*における移動距離
 v_i : 区間*i*における歩行速度
 T : 汲み上げに掛かる時間
 β_w : 水源のある区間*w*における精神的ストレスの係数
 γ_i : 区間*i*における水汲み後の歩行速度の変化率

肉体的ストレス同様、移動距離について簡単のため全ての世帯は各バリの中心から出発するとして各バリの中心を基準とする。現地調査によって精神的ストレスは人の多さや通行量によってその度合いは異なることが明らかになった。そこで、人通りの多さや通行量による特性を考慮して、それぞれの区間における精神的ストレスの係数を β_i ($i=0, \dots, 7$) と設定する。区間によって歩きやすさが異なるとして、それぞれの区間における歩行速度を v_i ($i=0 \dots 7$) とする。また、水運び前の空のコルシと、水が入り重量のあるコルシでは、歩行速度が遅くなることが観察および実地体験から明らかになった。そこで、水運び後の歩行速度は変化率 γ_i を用いて $\gamma_i v_i$ ($0 < \gamma_i < 1$) とする。汲み上げに掛かる時間を T ，そこに掛かる精神的ストレスの係数を β_w (w は井戸が位置する区間) とする。これより精神的ストレ

スを(3)のように定式化する。

精神的ストレス M = 時間

$$= \sum_{i=0}^7 \beta_i d_i / v_i + T \beta_w + \sum_{i=0}^7 \beta_i d_i / \gamma_i v_i \quad (3)$$

4.5 モデルのパラメータの設定

肉体的ストレスと精神的ストレスの構成要因をまとめて Table 2 と Table 3 に示す。

① 世帯の人数 n

アンケート調査の質問項目「(1.7) Constituent of the family」の結果を用いる。

② 1人当りの1日の飲料水の重量 m

ヒアリングから1人当たり1日約2リットルの水を汲むことが一般的であるようだった。

③ 区間 i における肉体的ストレスの係数 α_i

区間 0, 区間 1, 区間 2, 区間 3, 区間 7 はほぼ平坦な道で歩行速度は変化せず，

$$\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_7 = 1$$

とする。

区間 4 のアップダウンでは坂の上り下りは平坦な道よりも歩数が多くなる。アップダウンの距離を測り平坦な道での歩数と比べたところ、アップダウンでは平坦な道より約3倍ほど歩数が多くなってい

Table 2 Parameter of physical stress

| | Area | Distance | Physical stress | | |
|---|---------------|----------|-----------------|-------|-------------|
| | | | family number | water | coefficient |
| 0 | own baris | d_0 | n | m | α_0 |
| 1 | Road1 | d_1 | | | α_1 |
| 2 | Road2 | d_2 | | | α_2 |
| 3 | Others | d_3 | | | α_3 |
| 4 | Up down | d_4 | | | α_4 |
| 5 | Boat | d_5 | | | α_5 |
| 6 | Bamboo bridge | d_6 | | | α_6 |
| 7 | Mosque | d_7 | | | α_7 |

Table 3 Parameter of psychlogical stress

| | Area | Distance | Psychological stress | | | |
|---|---------------|----------|----------------------|----------|------|-------------------------|
| | | | coefficient | velocity | time | coefficient of velocity |
| 0 | own baris | d_0 | β_0 | v_0 | T | γ_0 |
| 1 | Road1 | d_1 | β_1 | v_1 | | γ_1 |
| 2 | Road2 | d_2 | β_2 | v_2 | | γ_2 |
| 3 | Others | d_3 | β_3 | v_3 | | γ_3 |
| 4 | Up down | d_4 | β_4 | v_4 | | γ_4 |
| 5 | Boat | d_5 | β_5 | v_5 | | γ_5 |
| 6 | Bamboo bridge | d_6 | β_6 | v_6 | | γ_6 |
| 7 | Mosque | d_7 | β_7 | v_7 | | γ_7 |

る。これより $\alpha_4=3$ とする。

区間 5 のボート移動区域では、コルシはボートに置いて移動する。コルシを置いたくらいではボートを漕ぐ負担は変わらず、また住民はボートの扱いには慣れておりボートを漕ぐことに特別な負担はないと考えられる。このため、ボート上では肉体的ストレスは感じないとして $\alpha_5=0$ とする。

区間 6 の竹橋移動区域では、観察から足場が不安定な竹橋を渡るのは通常の 4 倍ほど時間が掛かっていた。これより時間距離として実距離の 4 倍と、すなわち竹橋を渡るのは通常歩行の 4 倍の仕事量が掛かると仮定して $\alpha_6=4$ とする。

④ 区間 i における精神的ストレスの係数 β_i

交通量、人の多さによって以下の 4 段階に分かれると仮定する。

$$\beta_0 < \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 < \beta_2 < \beta_1 = \beta_7$$

ヒアリング調査から区間 0 の自分のバリ内は主に親戚で構成されており、女性はその中なら精神的な負担を受けずに行動できるので $\beta_0=0$ とする。すなわち、自分のバリ内にある水源に水運びに行くときの精神的ストレスは 0 となる。現地でのヒアリング調査と観察から道路 1 とモスク前は明らかに人だかりが多く、道路 2 は道路 1 とその他の地域の間程度の人の多さを確認できた。区間 3、区間 4、区間 5、区間 6 はほとんど人と会うことはなく、

$$\beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 1$$

とする。

区間 2 の道路 2 はマーケットのある主要道路につながっていることもあり、比較的にキシャやオートバイの交通量も多く、人通りも多い。ヒアリング調査では出来れば通りたくないとなり $\beta_2=1.5$ とする。

区間 1 の道路 1 はマーケットのある主要道路につながっていて、交通量も多く数件の店が並び男性が集まる場所になっている。区間 6 のモスク前も男性が集まる場所になっていて、いつも男性が談笑している。このため、ヒアリング調査では、人が多いので通りたくないとなり、 $\beta_1 = \beta_7 = 2$ とする。

⑤ 区間 i における歩行速度 v_i

現地の女性と一緒に歩いた著者自身の歩行速度は平坦な道でおおよそ 60m/分であった。バングラデシュの女性は普段はサリーを着ているので、ズボンより歩幅が狭く歩行速度はやや遅くなる。区間 0、区間 1、区間 2、区間 3、区間 7 はほぼ平坦な道なので歩行に問題はなく、

$$v_0 = v_1 = v_2 = v_3 = v_7 = 60\text{m/分}$$

とする。

④より区間 4 のアップダウンは通常より 3 倍の時間が掛かっているとして、

$v_4=20\text{m/分}$ とする。同様に、区間 6 の竹橋移動区域は $v_6=15\text{m/分}$ とする。

区間 5 のボート移動区域では GPS によって大まかに速度を測定して $v_5=60\text{m/分}$ とする。

⑥ 汲み上げに掛かる時間 T

井戸に来る→コルシを軽くすすぐ→水を汲むという一連の行動は、現地体験と現地観察からおおよそ 30~60 秒ほど掛かっていた。ここでは $T=40$ 秒 $=0.67$ 分とする。

⑦ 区間 i における水運び後の歩行速度の変化率 γ_i

どのような人も水運び後は約 10~20kg の水を運ぶと考えて、 γ_i は世帯によらず一定とする。

区間 5 のボート移動区域を除いた全ての区間で同じ変化率とする。現地体験と観察から変化率は $0.5 \leq \gamma_i \leq 1.0$ である。すなわち、水を持ったときの歩行速度は通常より遅くなるが、2分の1より小さくなることはないことを示している。ここでは、水がこぼれない様に通常速度より少し遅めに歩いていたことより、

$$\gamma_0 = \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = \gamma_6 = \gamma_7 = 0.8$$

とする。

区間 5 のボート移動区域ではコルシはボートに置いて移動するので、水運び前後で速度は変わらないので $\gamma_5=1$ とする。

以上のパラメータの設定から肉体的ストレスと精神的ストレスの式は以下のように記述できる。

肉体的ストレス

$$P = 2n(d_0 + d_1 + d_2 + d_3 + 3d_4 + 4d_6 + d_7) \quad (4)$$

精神的ストレス

$$M = 0.0375(2d_1 + 1.5d_2 + d_3 + 3d_4 + 0.89d_5 + 4d_6 + 2d_7) + 0.66\beta_w \quad (5)$$

肉体的ストレスは各バリの中心からそれぞれの水源までのストレスを計量しており、移動距離の部分は各世帯ともにバリ内では同じ値となる。この値は各バリから水源までの移動距離を示している。

この移動距離を、

$$D = (d_0 + d_1 + d_2 + d_3 + 3d_4 + 4d_6 + d_7) \quad (6)$$

としてバリ間の水源までの移動距離を比較する。肉体的ストレスでは各世帯が水運び行動にどれだけ肉体的負担が掛かっているかを表している。一方、移動距離はバリから水源までどれだけ距離があるかを表し他のバリとの比較に用いる。

4.6 水運びストレスの計量と考察

単純集計ではほとんどの世帯がバリ内で同じ行動を取ることから、バリ単位で水運びストレスを考える。バリ内で異なる行動を取る世帯については個別に示す。

各バリから水源までのルートは乾季、雨季ともにヒアリングによって確認したところのバリも最短のルートを辿っていることが明らかになった。そこで、各バリからそれぞれの水源までは最短のルートを通ると仮定し移動距離 D と精神的ストレス M の計算結果について、乾季の結果を Table 4 に、雨季の結果を Table 5 に示す。

計算結果は上段に移動距離 D を下段に精神的ストレス M を示している。移動距離は 10m 以下を四捨五入、精神的ストレスは小数点以下を四捨五入で示している。Table 4, Table 5 について 1 世帯でも浅井戸を利用しているバリは○で示している。それぞれのバリについて現在利用している水源の計算結果は色付きで示しており、浅井戸を利用しているバリは精神的ストレスが最小となるバリを示している。

注1) ブフンヤバリは 2007 年 9 月のアンケート調査ではモスク前の深井戸を利用していたが、2007 年 12 月の調査では浅井戸の方が安全

で味も良いという理由でバリ内の浅井戸を利用している。

注2) バンドルバリ・プッシンバラはバリ内に私用深井戸があるが、所有者と対立している数世帯は利用させてもらえず浅井戸を利用している。

注3) バブリシバリでは隣接するシェランバリの私用深井戸を私用しているが 1 世帯だけバンドリバリの私用深井戸を利用している。

注4) リプンミヤルバリはバリ内に私用深井戸があるが、所有者と対立している数世帯は利用させてもらえず浅井戸を利用している。

注5) シェイクバリでは 4 世帯は学校横の深井戸を利用しているが、残りの 2 世帯は浅井戸を利用している。

注6) シェケルバリでは私用深井戸を所有者が独占しているので、残りの家庭は道路沿いの深井戸を利用している。

移動距離と精神的ストレスの計算結果について考察する。

乾季ではバブリシバリの 1 世帯とポキルバリ、シェケルバリを除いた全てのバリが移動距離と精神的ストレスが最小となる水源に水運びに行っている。バブリシバリは注 3、シェケルバリは注 6 の理由でそれぞれの水源に水運びには行っていない。ポキルバリは道路沿いの深井戸と学校横の深井戸の間に位置している。移動距離と精神的ストレスは道路沿いの深井戸の方が少しだけ大きい、道路沿いのバリと仲が良いので道路沿いの深井戸を利用している。

雨季ではバブリシバリの 1 世帯と、シェケルバリ、ポキルバリ、メンバルバリ、ブイヤバリ 2 以外のバリは精神的ストレスが最小の水源に水を汲みに行っている。バブリシバリ、シェイクバリ、ポキルバリは乾季と同様の理由で、メンバルバリとブイヤバリ 2 は共にシェイクバリが最もストレスの小さい水源だが私用深井戸のため利用していない。

ミヤバリ、メンバーハウス、リプンミヤルバリ、カルクミヤルバリ、シェイクバリ、ブイヤバリ 2、シェケルバリのボート移動区域は肉体的ストレスの係数を 0 としているため、乾季に比べると雨季の移動距離はかなり小さくなっている。

バブリシバリ、シェランバリ、ガジバリ、バガンバリ、メンバルバリ、ブイヤバリ、ポキルバリでは竹橋移動区域の肉体的ストレスの係数から、雨季の方が移動距離は大きい。

ニューダリバリ、カルクミヤルバリや雨季のメンバルバリとブイヤバリ 2 のように近くに水源があっても、公共ではなく私用の水源なら利用していない。これは所有者が他のバリの住民に水源を使わせるの

Table 4 Result of stress model (dry season)

| Stress model(dry season) | name of bari | number of famil | number of person | Public deepu tube-well | | | Private deep tube-well(Share) | | | Private deeptube-well(not share) | | AIRP |
|--------------------------|--------------|-----------------|------------------|------------------------|----------|--------|-------------------------------|--------|------------|----------------------------------|--------|------|
| | | | | Mosque | Roadside | School | Bhandari | Sarang | Ripon miar | Islam school | Sheikh | |
| Kerani bari | 10 | 46 | 270 | 310 | 590 | 470 | 430 | 790 | 560 | 490 | 20 | |
| | | | 10 | 13 | 27 | 23 | 19 | 34 | 30 | 21 | 0 | |
| Chairman bari | 4 | 14 | 30 | 420 | 710 | 580 | 540 | 910 | 670 | 600 | 300 | |
| | | | 1 | 18 | 32 | 28 | 24 | 39 | 35 | 26 | 11 | |
| OBhunnya bari | 1 | 11 | 100 | 330 | 620 | 490 | 450 | 820 | 580 | 510 | 210 | |
| | | | 4 | 15 | 29 | 25 | 21 | 36 | 32 | 23 | 8 | |
| ONewdhali bari | 5 | 20 | 340 | 320 | 600 | 480 | 430 | 740 | 570 | 500 | 250 | |
| | | | 13 | 14 | 28 | 24 | 20 | 33 | 31 | 22 | 9 | |
| OBandhari bari | 14 | 73 | 550 | 280 | 560 | 30 | 170 | 760 | 190 | 460 | 480 | |
| | | | 26 | 19 | 32 | 0 | 7 | 39 | 10 | 26 | 23 | |
| OBaburshi bari | 16 | 76 | 490 | 220 | 500 | 160 | 10 | 700 | 250 | 400 | 420 | |
| | | | 22 | 14 | 27 | 7 | 1 | 35 | 15 | 21 | 19 | |
| Sarang bari | 10 | 53 | 490 | 220 | 500 | 160 | 10 | 700 | 250 | 400 | 420 | |
| | | | 22 | 14 | 27 | 7 | 0 | 35 | 15 | 21 | 19 | |
| Gazi bari | 5 | 16 | 410 | 110 | 390 | 300 | 250 | 590 | 380 | 290 | 340 | |
| | | | 17 | 7 | 20 | 18 | 14 | 27 | 25 | 14 | 13 | |
| Began bari | 2 | 8 | 410 | 20 | 280 | 290 | 240 | 960 | 330 | 180 | 340 | |
| | | | 19 | 2 | 14 | 20 | 15 | 39 | 23 | 8 | 15 | |
| Member bari | 3 | 16 | 470 | 80 | 280 | 350 | 300 | 480 | 390 | 180 | 400 | |
| | | | 20 | 4 | 12 | 21 | 17 | 20 | 25 | 6 | 17 | |
| Bhuiya bari | 3 | 15 | 550 | 180 | 200 | 430 | 380 | 400 | 470 | 210 | 480 | |
| | | | 25 | 8 | 8 | 26 | 22 | 15 | 30 | 8 | 22 | |
| Pokir bari | 4 | 20 | 660 | 270 | 250 | 540 | 490 | 450 | 580 | 320 | 590 | |
| | | | 30 | 13 | 10 | 31 | 27 | 17 | 35 | 13 | 27 | |
| OMunshi bari | 5 | 22 | 750 | 360 | 270 | 630 | 580 | 470 | 670 | 430 | 680 | |
| | | | 35 | 18 | 10 | 35 | 31 | 18 | 39 | 19 | 31 | |
| Mosque bari | 2 | 9 | 660 | 270 | 70 | 540 | 490 | 270 | 580 | 340 | 590 | |
| | | | 31 | 14 | 2 | 32 | 27 | 10 | 35 | 15 | 27 | |
| Mia bari | 5 | 23 | 740 | 340 | 60 | 610 | 560 | 260 | 650 | 410 | 660 | |
| | | | 33 | 15 | 1 | 33 | 29 | 8 | 37 | 17 | 29 | |
| OMember house | 1 | 7 | 770 | 370 | 90 | 640 | 590 | 140 | 670 | 440 | 690 | |
| | | | 35 | 18 | 3 | 36 | 32 | 5 | 39 | 19 | 32 | |
| ORipon miar bari | 7 | 35 | 890 | 500 | 290 | 770 | 720 | 10 | 810 | 570 | 820 | |
| | | | 40 | 23 | 11 | 41 | 36 | 0 | 44 | 24 | 36 | |
| OKhaleque miar bari | 3 | 19 | 880 | 490 | 280 | 760 | 710 | 150 | 800 | 560 | 810 | |
| | | | 40 | 23 | 11 | 41 | 36 | 6 | 44 | 24 | 36 | |
| OSarjon Alir bar | 6 | 22 | 840 | 440 | 200 | 710 | 660 | 400 | 730 | 510 | 760 | |
| | | | 38 | 21 | 7 | 38 | 34 | 15 | 41 | 22 | 34 | |
| OBhuiya bari 2 | 7 | 23 | 840 | 350 | 160 | 710 | 670 | 370 | 750 | 510 | 760 | |
| | | | 38 | 17 | 6 | 38 | 35 | 14 | 42 | 22 | 34 | |
| Sheikh bari | 4 | 19 | 580 | 180 | 320 | 450 | 400 | 520 | 490 | 10 | 500 | |
| | | | 26 | 9 | 15 | 27 | 23 | 22 | 30 | 0 | 23 | |

Table 5 Result of stress model (rainy season)

| Stress model(rainy season) | name of bari | number of famil | number of person | Public deepu tube-well | | | Private deep tube-well(Share) | | | Private deeptube-well(not share) | | AIRP |
|----------------------------|--------------|-----------------|------------------|------------------------|----------|--------|-------------------------------|------------|------------|----------------------------------|--------|------|
| | | | | Mosque | Roadside | School | Bhandari | Sarang | Ripon miar | Islam school | Sheikh | |
| Kerani bari | 10 | 46 | 270 | 310 | 590 | 490 | 490 | Impossible | Impossible | Impossible | 20 | |
| | | | 10 | 13 | 27 | 23 | 21 | Impossible | Impossible | Impossible | 0 | |
| Chairman bari | 4 | 14 | 30 | 420 | 710 | 580 | 600 | Impossible | Impossible | Impossible | 300 | |
| | | | 1 | 18 | 32 | 28 | 26 | Impossible | Impossible | Impossible | 11 | |
| OBhunnya bari | 1 | 11 | 100 | 330 | 620 | 490 | 510 | Impossible | Impossible | Impossible | 210 | |
| | | | 4 | 15 | 29 | 25 | 23 | Impossible | Impossible | Impossible | 8 | |
| ONewdhali bari | 5 | 20 | 340 | 320 | 600 | 480 | 490 | Impossible | Impossible | Impossible | 250 | |
| | | | 13 | 14 | 28 | 24 | 22 | Impossible | Impossible | Impossible | 9 | |
| OBandhari bari | 14 | 73 | 550 | 280 | 560 | 30 | 150 | Impossible | Impossible | Impossible | 480 | |
| | | | 26 | 19 | 32 | 0 | 7 | Impossible | Impossible | Impossible | 23 | |
| OBaburshi bari | 16 | 76 | 550 | 280 | 560 | 220 | 10 | Impossible | Impossible | Impossible | 490 | |
| | | | 25 | 17 | 30 | 10 | 1 | Impossible | Impossible | Impossible | 22 | |
| Sarang bari | 10 | 53 | 550 | 280 | 560 | 220 | 10 | Impossible | Impossible | Impossible | 480 | |
| | | | 25 | 17 | 30 | 10 | 0 | Impossible | Impossible | Impossible | 22 | |
| Gazi bari | 5 | 16 | 430 | 130 | 410 | 320 | 330 | Impossible | Impossible | Impossible | 360 | |
| | | | 17 | 7 | 21 | 19 | 17 | Impossible | Impossible | Impossible | 14 | |
| Began bari | 2 | 8 | 410 | 20 | 280 | 290 | 300 | Impossible | Impossible | Impossible | 340 | |
| | | | 19 | 2 | 14 | 20 | 18 | Impossible | Impossible | Impossible | 15 | |
| Member bari | 3 | 16 | 470 | 80 | 280 | 350 | 360 | Impossible | Impossible | 70 | 400 | |
| | | | 20 | 4 | 12 | 21 | 19 | Impossible | Impossible | 3 | 17 | |
| Bhuiya bari | 3 | 15 | 610 | 220 | 260 | 490 | 500 | Impossible | Impossible | Impossible | 540 | |
| | | | 28 | 11 | 11 | 29 | 27 | Impossible | Impossible | Impossible | 25 | |
| Pokir bari | 4 | 20 | 690 | 300 | 280 | 570 | 580 | Impossible | Impossible | Impossible | 620 | |
| | | | 31 | 14 | 11 | 32 | 30 | Impossible | Impossible | Impossible | 28 | |
| OMunshi bari | 5 | 22 | 750 | 360 | 270 | 630 | 640 | Impossible | Impossible | Impossible | 680 | |
| | | | 35 | 18 | 10 | 35 | 33 | Impossible | Impossible | Impossible | 31 | |
| Mosque bari | 2 | 9 | 660 | 270 | 70 | 540 | 550 | 170 | Impossible | Impossible | 590 | |
| | | | 31 | 14 | 2 | 32 | 30 | 13 | Impossible | Impossible | 27 | |
| Mia bari | 5 | 23 | 740 | 340 | 60 | 610 | 620 | 80 | Impossible | 60 | 660 | |
| | | | 33 | 15 | 1 | 33 | 31 | 8 | Impossible | 8 | 29 | |
| OMember house | 1 | 7 | 740 | 340 | 60 | 600 | 620 | 120 | Impossible | 80 | 660 | |
| | | | 35 | 18 | 3 | 35 | 34 | 5 | Impossible | 11 | 32 | |
| ORipon miar bari | 7 | 35 | 410 | 20 | 120 | 80 | 50 | 10 | Impossible | 40 | 340 | |
| | | | 32 | 15 | 11 | 18 | 14 | 0 | Impossible | 11 | 28 | |
| OKhaleque miar bari | 3 | 19 | 400 | 10 | 110 | 70 | 40 | 30 | Impossible | 30 | 330 | |
| | | | 30 | 15 | 10 | 17 | 13 | 3 | Impossible | 9 | 27 | |
| OSarjon Alir bar | 6 | 22 | 690 | 300 | 20 | 570 | 600 | 160 | Impossible | 140 | 620 | |
| | | | 37 | 20 | 6 | 38 | 37 | 11 | Impossible | 16 | 34 | |
| OBhuiya bari 2 | 7 | 23 | 410 | 20 | 120 | 130 | 50 | 40 | Impossible | 40 | 340 | |
| | | | 27 | 10 | 7 | 18 | 10 | 6 | Impossible | 6 | 24 | |
| Sheikh bari | 4 | 19 | 400 | 10 | 110 | 120 | 40 | 30 | Impossible | 10 | 330 | |
| | | | 22 | 5 | 10 | 13 | 5 | 11 | Impossible | 0 | 19 | |

を嫌がることと、利用者も私用の水源は使いたがらないことが理由として考えられる。

乾季と雨季の比較では、乾季は道路沿いの竹橋を利用してのバリのストレスが大きくなり、雨季ではボートを利用するバリのストレスが小さくなり、

季節によって差があることが明らかになった。水運びストレスのモデル化により一部を除いたほとんどのバリが精神的ストレスの値が最小となる水源を利用していることが明らかになった。また、ヒ素に汚染された浅井戸の水を利用しているバリは比較的ス

Table 6 2005–2007 physical stress

| Physical stress | numebr of family | number of person | 2005(dry) | 2007(dry) | 2005(rainy) | 2007(rainy) |
|---------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| Kerani bari | 10 | 46 | 12420 | 920 | 12420 | 920 |
| Chairman bari | 4 | 14 | 420 | 420 | 420 | 420 |
| Bhunnya bari | 1 | 11 | 1100 | 1100 | 1100 | 1100 |
| New Dhali bari | 5 | 20 | 5000 | 5000 | 5000 | 5000 |
| Bhandari bari | 14 | 73 | 12410 | 5690 | 10950 | 5190 |
| Baburshi bari | 16 | 76 | 1390 | 1210 | 1570 | 1390 |
| Sarang bari | 10 | 53 | 530 | 530 | 530 | 530 |
| Gazi bari | 5 | 16 | 1760 | 1760 | 2080 | 2080 |
| Began bari | 2 | 8 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| Member bari | 3 | 16 | 1280 | 1280 | 1280 | 1280 |
| Bhniya bari | 3 | 15 | 2400 | 2400 | 3300 | 3300 |
| Pokir bari | 4 | 20 | 5400 | 5400 | 6000 | 6000 |
| Munshi bari | 5 | 22 | 5940 | 5940 | 5940 | 5940 |
| Mosque bari | 2 | 9 | 630 | 630 | 630 | 630 |
| mia bari | 5 | 23 | 1380 | 1380 | 1380 | 1380 |
| Meber house | 1 | 7 | 630 | 630 | 420 | 420 |
| Ripon miar bari | 7 | 35 | 10150 | 5390 | 4200 | 530 |
| Khaleque Miar bari | 3 | 19 | 5320 | 2850 | 2090 | 570 |
| sarjon Alir bari | 6 | 22 | 4400 | 4400 | 440 | 440 |
| Bhuiyan-Bhuiya bari | 7 | 23 | 3680 | 3680 | 2760 | 2760 |
| Sheikh bari | 4 | 19 | 2910 | 2910 | 190 | 190 |

Table 7 2005–2007 psychological stress

| psychological stress | numebr of family | number of person | 2005(dry) | 2007(dry) | 2005(rainy) | 2007(rainy) |
|----------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|
| Kerani bari | 10 | 46 | 0 | 100 | 0 | 100 |
| Chairman bari | 4 | 14 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Bhunnya bari | 1 | 11 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| New Dhali bari | 5 | 20 | 65 | 65 | 65 | 65 |
| Bhandari bari | 14 | 73 | 95 | 266 | 95 | 266 |
| Baburshi bari | 16 | 76 | 22 | 29 | 22 | 29 |
| Sarang bari | 10 | 53 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gazi bari | 5 | 16 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Began bari | 2 | 8 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Member bari | 3 | 16 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Bhniya bari | 3 | 15 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Pokir bari | 4 | 20 | 56 | 56 | 56 | 56 |
| Munshi bari | 5 | 22 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Mosque bari | 2 | 9 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| mia bari | 5 | 23 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Meber house | 1 | 7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Ripon miar bari | 7 | 35 | 44 | 77 | 44 | 77 |
| Khaleque Miar bari | 3 | 19 | 33 | 33 | 30 | 30 |
| sarjon Alir bari | 6 | 22 | 42 | 42 | 36 | 36 |
| Bhuiyan-Bhuiya bari | 7 | 23 | 42 | 42 | 49 | 49 |
| Sheikh bari | 4 | 19 | 27 | 27 | 15 | 15 |

トレスの値が大きいことが示された。

ポキルバリの様に移動距離と精神的ストレスが大きくても水運びに行くバリがあれば、メンバーハウスのように公共井戸が近くにありストレスが小さくても水運びに行かないバリもあり、飲料水の選行動には水運びストレスだけが影響しているわけではないと考えられる。

4.7 調査地における2005年から2007年におけるストレスの変化

2005年の調査では合計7つの深井戸が飲料水として利用されていた。2007年の調査ではリブンミヤルバリとバンドルバリ・プッシンバラで新たに2基の私用深井戸が、ケラニバリでは2基の私用AIRPが導入され、所有者と一部を除くバリの住民が利用している。2005年と2007年の肉体的ストレスと精神的ストレスの比較をそれぞれTable 6, Table 7に示す。

2005年の乾季ではケラニバリ、バンドリバリ、リブンミヤルバリは肉体的ストレス、精神的ストレス共に他のバリよりも非常に大きい値となっている。

雨季も同様に、リブンミヤルバリがボートを利用するので肉体的ストレスの値が小さいものの、ケラニバリ、バンダリバリは肉体的ストレス、精神的ストレス共に非常に大きい値となっている。

これらのバリでは2005年から2007年の間に裕福な世帯が深井戸やA I R Pの費用を全て負担して導入し、ストレスの値は大きく減少した。2005年のストレス上位3つのバリが代替技術を導入したということで、計算されたストレスの値の大きさが現地の状況を良く表現していると考えられる。一方でストレスが比較的大きいムンシバリでは代替技術を導入せず、浅井戸を飲料水として利用し続けている。ムンシバリは貧しい世帯が多く、調査でも「ヒ素は心配だが代替技術を導入するだけのお金がない。」という意見が得られた。

水運びストレスをモデル化しストレスを定量的に評価することで水運びストレスが安全な飲料水を利用するかの選択行動に影響していることが明らかになった。すなわち、ストレスの値が大きければ、水運びが面倒で安全な飲料水を利用せずヒ素汚染された浅井戸の水を利用する。一方で代替技術の導入については経済的な状況などの社会環境を考慮する必要があると考えられる。

5. 現地の飲料水利用状況の構造化

これまでの調査では様々な機関によって導入された代替技術の多くは有効に利用されず放棄されていることが明らかになった。前章ではその理由の一つと考えられる水運びストレスをモデル化し定量的に評価した。この結果、水運びストレスの値は安全な飲料水を利用するか、すなわち代替技術を利用するかの選択行動に影響していることを示したが、代替技術を導入するかには飲料水を取り巻く状況を考慮する必要があることを示した。

これらの状況は本質的には、現地住民の潜在的なヒ素汚染に対する意識や生活状況に起因するものではないかと考えられる。すなわち、多くの住民は経済的に困窮しているためヒ素汚染に対する対策を持たず、また、ヒ素による中毒症状は数10年後に表れるためヒ素に対する不安感を持ちにくいのではないかと考えられる。

本章ではこの飲料水利用状況について共分散構造分析を用いて構造化し、飲料水を取り巻く状況について解釈する。

5.1 共分散構造分析について

共分散構造分析は多変量解析法の1つであり、代表的な多変量解析の一般化とも言われている。多様な

潜在変数(latent variables)をモデルシステム内に定義可能であり、複雑な要素が絡み合った現象に構成概念(construct)を導入して分析するのに適したモデルである。

構成概念とは「その存在を仮定することにより、複雑に込み入った現象を比較的単純に理解することを目的とした概念」を指し、それを表現するために導入された直接観測不可能な変数を潜在変数と呼ぶ。

共分散構造分析は構造方程式と測定方程式の2種類によって構成されている。構造方程式は潜在変数間の因果関係を示す式で、測定方程式は多くの潜在変数とその観測変数の間の関係を表現するものである。

構造方程式だけを取り出すと同時方程式やパス解析の一般形であること、測定方程式だけを取り出すと因子分析の一般形であることが示され、パラメータの特定化に応じて様々な多変量解析を構造方程式モデルの枠組みの中で行うことができる。

本研究ではまず観測変数に外生変数と内生変数の2群が存在するM I M I C(multiple indicator multiple cause)モデルを用いて潜在変数を構造化する。次いで、MIMICモデルによって構造化した潜在変数を多重指標モデル(multiple indicator model)でつなげ潜在変数間の関係をモデル化する。

5.2 潜在変数の設定

現地の飲料水を取り巻く状況を示す潜在変数として、水運びの負担を示す【水運びストレス】、経済状況の苦しさを示す【経済困窮度】、ヒ素や健康への不安を示す【社会不安感】を設定する。

以下の記述では潜在変数を【】、観測変数を「()」(()内は項目番号)で表す。また、質問項目は乾季と雨季の両方で調査している項目があるが、3.3の代表項目の選出より、雨季よりも乾季の方が他の項目と関連がある項目が多かったことから、今後の分析は乾季の質問項目を代表項目として用いる。水運びストレスは3.6の計算結果を5段階にカテゴリ化した。分析に用いる質問項目の単純集計結果をTable 8に示す。

潜在変数【水運びストレス】は入力観測変数として「(2.11)アクセスしやすいか」「肉体的ストレスモデル」、出力観測変数として「(2.5)水量は十分か」「(2.11)精神的ストレスを感じるか」を用いて構成する。

潜在変数【経済困窮度】は入力観測変数として「(1.6.3) ビジネスマンか」「(1.10)マイクロクレジットを利用しているか」、出力観測変数として「(4.1)生活に満足しているか」「(4.5)生活に安心はあるか」を用いて構成する。

潜在変数【社会不安感】は入力の変数として「(1.7)世帯人数」「(2.17)ヒ素が人体に有毒であること知っているか」、出力の変数として「(2.6)現在の飲料水を不安に思うか」「(2.18)ヒ素について家族の健康に関心はあるか」を用いて構成する。

Table 8 Grand total of answers in survey

| item | sample |
|---|--------|
| 1.6 Main occupation of householder and/or family members who support family budget | |
| 3) Businessman | 30 |
| 1.7 Constituent of family | |
| 1~4 | 64 |
| 5~7 | 35 |
| 7~ | 18 |
| 1.10 Do you (or your some of family members) join Microcredit? | |
| yes | 61 |
| no | 53 |
| 2.5 Do you think current drinking water is enough during dry season? | |
| 5(enough) | 85 |
| 4 | 22 |
| 3 | 3 |
| 2 | 4 |
| 1(not enough) | 2 |
| 2.6 Do you think your current drinking water is safe? | |
| 5(safe) | 68 |
| 4 | 8 |
| 3 | 8 |
| 2 | 5 |
| 1(not safe) | 27 |
| 2.11 collecting water at during dry season | |
| How is the accessibility is drawing to collect water for you? | |
| 5(easily accessible) | 61 |
| 4 | 23 |
| 3 | 9 |
| 2 | 18 |
| 1(hardly accessible) | 5 |
| Is drawing collecting water a psychological burden for you? | |
| 5(a lot) | 25 |
| 4 | 14 |
| 3 | 6 |
| 2 | 25 |
| 1(not at all) | 46 |
| 2.17 Do you know the fact that arsenic is harmful to your health? | |
| 5(yes) | 102 |
| 4 | 11 |
| 3 | 0 |
| 2 | 1 |
| 1(no) | 2 |
| 2.18 Are you concerned with your, your son's or daughter's health with regard to arsenic in the future? | |
| 5(concerned) | 85 |
| 4 | 20 |
| 3 | 5 |
| 2 | 5 |
| 1(no problem) | 1 |
| 4.1 Are you satisfied current life? | |
| 5(yes) | 20 |
| 4 | 41 |
| 3 | 10 |
| 2 | 11 |
| 1(no) | 33 |
| 4.5 Are you at ease with yourself in your daily life? | |
| 5(yes) | 19 |
| 4 | 35 |
| 3 | 18 |
| 2 | 27 |
| 1(no) | 16 |
| Physical stress(dry season) | |
| 5 | 10 |
| 4 | 9 |
| 3 | 7 |
| 2 | 19 |
| 1 | 73 |

5.3 MIMICモデル

設定した潜在変数について最尤推定法によるMIMICモデルで構造化する。

最尤推定法では各変量は多次元正規分布に従い、その分散共分散行列が正則のとき標本分散共分散行列はWishart分布に従う。Wishart分布については付録2に示す(竹村, 1991)。

共分散構造分析のモデルの検定にはp値, RMSEA, GFI, AGFIを採用した。これらは一般に広く用いられている検定方法であり、その評価基準を以下に示す。

(1) p値

「計測誤差が有意である」という帰無仮説をある水準 α でモデルを採択あるいは棄却する値で、本研究では0.05以上でモデルを採択する。

(2) RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation)

モデルによって規定される分布とデータから計算される真の分布との乖離(構造誤差)を1自由度あたりの量として示した値で0.05以下が望ましいとされている。

(3) GFI (Goodness of Fit Indicator)

サンプル数に依存しない適合度の高さとして用いられ、経験的に0.9以上が望ましいとされている。

(3) AGFI (Adjusted Goodness of Fit Indicator)

GFIは自由度が小さくなると見かけ上の適合度が改善されるという性質があり、自由度の影響を修正した適合度指標として用いられ、GFI=0.1以上が望ましいとされている。

【水運びストレス】【経済困窮度】【社会不安感】のMIMICモデルをそれぞれFig. 3, Fig. 4, Fig. 5に示す。全てのモデルにおいて適合度は良好であった。

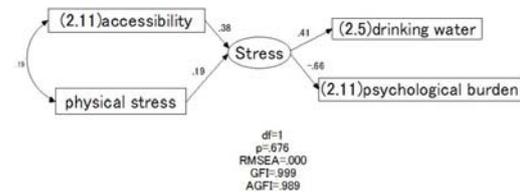


Fig. 3 MIMIC model (Stress)

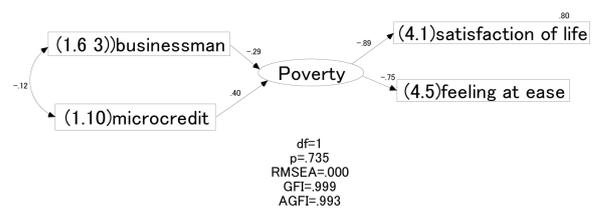


Fig. 4 MIMIC model (Poverty)

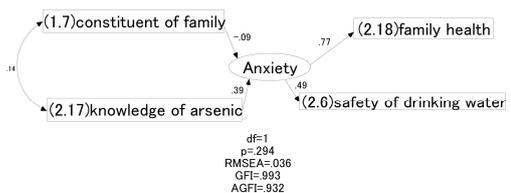


Fig. 5 MIMIC model (Anxiety)

【水運びストレス】はアクセスのしやすさと肉体

的ストレスが正の影響を及ぼし、その結果、水量に正、精神的ストレスを感じるかに負の影響を及ぼしている。水源までアクセスがしやすいほど水量に満足し、精神的負担を感じなくなることが分かる。

肉体的ストレスは正の影響を与えているが、実際に計算したストレスが現地住民のストレスの感じ方に与える影響は小さいことが分かった。これは水源が遠く水運びストレスの値は大きいにもかかわらず特に負担を感じないと回答している世帯や、逆に家のすぐそばに水源があっても水運びが面倒で負担を感じる世帯があり、ストレスの感じ方はばらつきがあると考えられる。

【経済困窮度】はビジネスマンであるかどうかを負の影響、マイクロクレジットの利用が正の影響を及ぼし、その結果、生活の満足度と安心に負の影響を及ぼす。現地では自分で商売を営むビジネスマンは比較的裕福で、貧しい世帯はマイクロクレジットを利用しており、経済的に苦しい世帯は生活に満足しておらず安心を感じていない。現地調査でもマイクロクレジットの返済が負担となっているという意見が得られた。

【社会不安感】はヒ素の有毒性の知識が正の影響を及ぼし、ヒ素について家族の健康に関心があるかと現在飲んでいる飲料水の安全性に正の影響を及ぼす。世帯人数の係数の値は小さく不安感にはほとんど影響を与えていない。ヒ素に関する知識があり不安感が高い世帯は家族の健康に関心があり、結果として安全な飲料水を利用し、現在飲んでいる飲料水を安全と感じていると考えられる。

5.4 多重指標モデル

5.3 MIMICモデルで構造化した潜在変数を用いて、【水運びストレス】を最終到達とした多重指標モデルで現地の飲料水利用状況を構造化する。これは【経済困窮度】と【社会不安感】の潜在変数の値によって【水運びストレス】を構成したモデルである。この結果をFig. 6に示す。適合度は良好であった。計算結果より、【経済困窮度】と【社会不安感】は【水運びストレス】に正の影響を及ぼす。すなわち経済的な苦しさが高まるほど、不安が高まるほど水運びのストレスを感じるようになることが分かる。

これは4.7で示したように、裕福な世帯は自ら代替技術を導入するなど状況改善を図ることができる。しかし、その余裕のない貧しい世帯では現状のままである。また、不安を感じる、すなわち安全な飲料水を利用し、ヒ素に関心のある世帯は水運びストレスを面倒と考えていると解釈できる。

以上のバシヤイルボグにおける飲料水利用状況のモデル化から、「(2.5)水量は十分か」「(2.11)精神的ストレスを感じるか」を出力とする【水運びストレス】は【経済困窮度】【社会不安感】が影響していることを明らかにした。現地の飲料水を取り巻く状況は、社会環境に起因する経済的な苦しきや不安感も影響している。このため、ヒ素汚染問題軽減の代替案作成にはヒ素汚染の代替技術だけでなく、貧困やヒ素に対する不安のような社会問題にも取り組む必要があると言えよう。

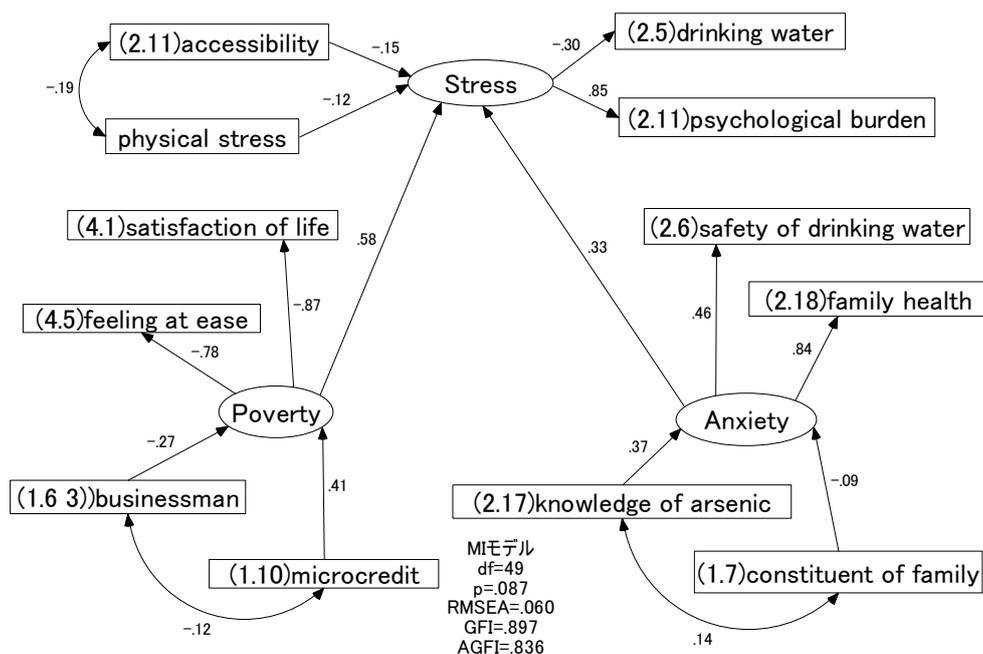


Fig. 6 MI model

6. おわりに

本研究ではバングラデシュにおける飲料水ヒ素汚染問題軽減を考えるにあたり、現地の社会環境を把握し、飲料水を取り巻く状況をモデル化することを目的として社会調査を実施し分析を行った。社会調査と単純集計により現地の飲料水の利用状況を把握し、飲料水ヒ素汚染問題への関心は高く半数以上の住民が代替技術の導入を求めていることが分かった。そして質問項目の関連分析によって分析に用いる代表項目を選出した。

水運びストレスのモデル化により、水運びストレスを定量的に評価したところ、現地の状況をよく表現していることが分かった。すなわち、水運びストレスが安全な飲料水を利用するかの選択行動に影響を及ぼしていることが明らかになった。

共分散構造分析による飲料水利用状況の構造化により、現地の飲料水を取り巻く状況は貧困や不安感も影響しており、ヒ素汚染問題の代替案作成にはこれらも考慮する必要があることを示した。

今後の課題としては、まず安全な飲料水を利用するかの選択行動の構造化が挙げられる。そして、本研究で明らかになった貧困や不安感といった社会環境に起因する問題を取り入れた代替案の作成が必要であるだろう。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご協力いただいた方々にこの場を借りて感謝いたします。日本下水文化研究会の高村哲氏（ノームプランニング）、保坂公人氏（五十音設計株式会社）、Md. Tofayel Ahmed氏、また、坂本麻衣子准教授（長崎大学）、そしてMd. azahar Ali Paramanil氏をはじめとするSPACEのスタッフの皆様には調査の全面的な協力と貴重なお助言を頂き感謝いたします。そして皆様の協力がなければ本論文はなしえなかったことを重ねて銘記いたします。

参考文献

- 竹村彰通：多変量推測統計の基礎，共立出版，1991.
 萩原良巳・萩原清子・Bilqis,Amin,Hoque、山村尊房・畑山満則・坂本麻衣子・宮城島一彦：バングラデシュにおける災害問題の実態と自然・社会特性との関連、京都大学防災研究所年報、第46号 B,pp.15-30, 2003
 萩原良巳・坂本麻衣子：コンフリクトマネジメントー水資源の社会リスク，勁草書房，2006

萩原良巳：環境と防災の土木計画学，京都大学学術出版，2008

福島陽介・萩原良巳・畑山満則・萩原清子・山村尊房・酒井彰・神谷大介：バングラデシュにおける飲料水ヒ素汚染に関する社会調査とその分析、環境システム論文集、pp21-28,2004

福島陽介：バングラデシュにおける飲料水ヒ素汚染軽減のための計画論的研究，京都大学工学研究科修士論文，2006

Cramer, H (1945): Mathematical Methods of Statistics, Almqvist and Wiksells.

Government of The People's Republic of Bangladesh (2004): National Policy for Arsenic Mitigation 2004 and Implementation Plan for Arsenic Mitigation in Bangladesh.

付 録

付録 1 クラメールの関連係数について

標本の n 個の個体が2つの変数（定量的であってもなくても良い）によって、Table 9に示した型の2元表に分割されたものとする。

Table 9 contingency table

| 変数 | 1 | 2 | ... | s | 合計 |
|-----|---------------|---------------|-----|---------------|--------------|
| 1 | v_{11} | v_{12} | ... | v_{1s} | $v_{1\cdot}$ |
| 2 | v_{21} | v_{22} | ... | v_{2s} | $v_{2\cdot}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| r | v_{r1} | v_{r2} | ... | v_{rs} | $v_{r\cdot}$ |
| 合計 | $v_{\cdot 1}$ | $v_{\cdot 2}$ | ... | $v_{\cdot s}$ | n |

この種の表を分割表といい、しばしば2つの変数が独立であるという仮説を検定する必要が生ずる。無作為にとられた個体が表の i 行、 j 列に属する確率を

p_{ij} で表わす。

このとき、独立性の仮説は

$$p_{ij} = p_{i\cdot} \cdot p_{\cdot j} \quad \sum_i p_{i\cdot} = \sum_j p_{\cdot j} = 1$$

となるような $r + s$ 個の定数 $p_{i\cdot}$ と $p_{\cdot j}$ が存在するという仮説と同値である。この仮説によれば、2つの変数の結合分布は $r + s - 2$ 個の未知のパラメータを含んでいる。なぜならば最後の関係によって $r + s$ 個の定数の2つ、たとえば $p_{r\cdot}$ と $p_{\cdot s}$ は残りの

$r + s - 2$ 個によって表わされるからである。

この問題に χ^2 検定を適用するためには

$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{(v_{ij} - np_{i\cdot}p_{\cdot j})^2}{np_{i\cdot}p_{\cdot j}} \quad (7)$$

を計算しなければならない。ここで、和は rs 個のクラス全部にわたってとるものとする。なお、これらの2式はいまの場合には

$$\sum_i \left(\frac{v_{ij}}{p_{i\cdot}} - \frac{v_{\cdot j}}{p_{\cdot\cdot}} \right) = 0 \quad (i=1, \dots, r-1)$$

$$\sum_j \left(\frac{v_{ij}}{p_{\cdot j}} - \frac{v_{i\cdot}}{p_{\cdot\cdot}} \right) = 0 \quad (j=1, \dots, s-1)$$

となる。これらの方程式の解は

$$p_{i\cdot} = \frac{v_{i\cdot}}{n}, \quad p_{\cdot j} = \frac{v_{\cdot j}}{n}$$

であり、結局推定量としては単に周辺頻度から計算した頻度比を用いればよい。これらの推定量を $p_{i\cdot}$ と

$p_{\cdot j}$ に代入すれば、 χ^2 の式は次のようになる。

$$\chi^2 = n \sum_{i,j} \frac{(v_{ij} - v_{i\cdot}v_{\cdot j}/n)^2}{v_{i\cdot}v_{\cdot j}} = n \left(\sum_{i,j} \frac{v_{ij}^2}{v_{i\cdot}v_{\cdot j}} - 1 \right) \quad (8)$$

また、 χ^2 は観測度数と期待度数とのずれを定量化する測度として用いられ、

$$\chi^2 = \sum_{i,j} \frac{(v_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (9)$$

とも表される。ただし、 E_{ij} は期待度数で、

$E_{ij} = np_{i\cdot}p_{\cdot j}$ である。すなわち、2つの変数が独立

ならば $p_{ij} = p_{i\cdot}p_{\cdot j}$ となり、観測度数と期待度数は

一致し $\chi^2 = 0$ となる。

一方、変量

$$\phi^2 = \frac{\chi^2}{n} = \sum_{i,j} \frac{(v_{ij}/n - (v_{i\cdot}/n)(v_{\cdot j}/n))^2}{(v_{i\cdot}/n)(v_{\cdot j}/n)} \quad (11)$$

は属性相関係数のひとつであるK. Pearsonによって導入された平均自乗コンティンジェンシイ (Mean Square Contingency) ϕ^2 である。 $\phi^2 = 0$ となるのは

変数が独立のとき、またそのときに限る。一方、不等式 $p_{ij} \leq p_{i\cdot}$ および $p_{ij} \leq p_{\cdot j}$ を用いて、上の式か

ら $q = \min(r, s)$ とすれば、 $\phi^2 \leq q - 1$ であることがわかる。これと上式より

$$0 \leq \frac{\phi^2}{q-1} = \frac{\chi^2}{n(q-1)} \leq 1$$

となる。大きいほうの限界1は各行の ($r \geq s$ のとき)あるいは各列 ($r \leq s$ のとき) が0と異なる要素をただひとつ含んでいるとき、またそのときに限って達成される。したがって、クラメールのコンティンジェンシイ係数 (Cramer's coefficient of contingency)

$$C_r = \frac{\chi^2}{n(q-1)} \quad (12)$$

は標本によって示された関連性の度合いの尺度とみなされる。この尺度の分布は、もちろん χ^2 分布に簡単な変数変換を行えば求まる。

クラメールのコンティンジェンシイ係数は他のコンティンジェンシイ係数やPearsonの積率相関係数とオーダーが異なる。むしろその平方根をとるほうが望ましく、その慣行が確立しつつある。そこでクラメールのコンティンジェンシイ係数の平方根

$$V = \sqrt{C_r} = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(q-1)}} \quad (13)$$

をクラメールの関連係数と呼ぶことにする。ここで、サンプル数を n 、二つの変数をカテゴリ $r \times s$ 、 $q = \min(r, s)$ とすると V はこれらの値によって大きく変化する。有意確率 α が 0.1, 0.05, 0.01 における χ^2 の値における V について計算したものを

Table 10に示す。

クラメールの関連係数は特にサンプル数によって

Table10 Cramer's coefficient of contingency

| 有意確率 α | カイ二乗値 | | | | | | | | | |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.1 | 2.706 | 4.605 | 7.779 | 6.251 | 10.64 | 14.68 | 7.779 | 13.36 | 18.55 | 23.54 |
| 0.05 | 3.841 | 5.991 | 9.488 | 7.815 | 12.59 | 16.92 | 9.488 | 15.51 | 21.03 | 26.3 |
| 0.01 | 6.635 | 9.21 | 13.28 | 11.34 | 16.81 | 21.67 | 13.28 | 20.09 | 26.22 | 32 |
| 自由度 | 1 | 2 | 4 | 3 | 6 | 9 | 4 | 8 | 12 | 16 |
| カテゴリ数 | 2×2 | 3×2 | 3×3 | 4×2 | 4×3 | 4×4 | 5×2 | 5×3 | 5×4 | 5×5 |
| g | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 4 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| サンプル数 | | | | | | | | | | |
| 10 | 0.520192 | 0.678602 | 0.623659 | 0.790633 | 0.729383 | 0.699524 | 0.881986 | 0.817313 | 0.786342 | 0.767138 |
| | 0.619758 | 0.774016 | 0.688767 | 0.884025 | 0.79341 | 0.750999 | 0.974064 | 0.880625 | 0.837257 | 0.810864 |
| | 0.814555 | 0.959687 | 0.814862 | 1.064894 | 0.916788 | 0.849902 | 1.152389 | 1.002247 | 0.93488 | 0.894427 |
| 20 | 0.367831 | 0.479844 | 0.440993 | 0.559062 | 0.515752 | 0.494638 | 0.623659 | 0.577927 | 0.556028 | 0.542448 |
| | 0.438235 | 0.547312 | 0.487032 | 0.6251 | 0.561026 | 0.531037 | 0.688767 | 0.622696 | 0.59203 | 0.573367 |
| | 0.575977 | 0.678602 | 0.576194 | 0.752994 | 0.648267 | 0.600971 | 0.814862 | 0.708696 | 0.66106 | 0.632456 |
| 30 | 0.300333 | 0.391791 | 0.360069 | 0.456472 | 0.42111 | 0.40387 | 0.509215 | 0.471876 | 0.453995 | 0.442907 |
| | 0.357817 | 0.446878 | 0.39766 | 0.510392 | 0.458076 | 0.43359 | 0.562376 | 0.508429 | 0.483391 | 0.468152 |
| | 0.470284 | 0.554076 | 0.470461 | 0.614817 | 0.529308 | 0.490691 | 0.665332 | 0.578648 | 0.539753 | 0.516398 |
| 40 | 0.260096 | 0.339301 | 0.311829 | 0.395316 | 0.364692 | 0.349762 | 0.440993 | 0.408656 | 0.393171 | 0.383569 |
| | 0.309879 | 0.387008 | 0.344384 | 0.442012 | 0.396705 | 0.3755 | 0.487032 | 0.440312 | 0.418629 | 0.405432 |
| | 0.407278 | 0.479844 | 0.407431 | 0.532447 | 0.458394 | 0.424951 | 0.576194 | 0.501124 | 0.46744 | 0.447214 |
| 50 | 0.232637 | 0.30348 | 0.278909 | 0.353582 | 0.32619 | 0.312836 | 0.394436 | 0.365513 | 0.351663 | 0.343074 |
| | 0.277164 | 0.34615 | 0.308026 | 0.395348 | 0.354824 | 0.335857 | 0.435615 | 0.393827 | 0.374433 | 0.362629 |
| | 0.36428 | 0.429185 | 0.364417 | 0.476235 | 0.41 | 0.380088 | 0.515364 | 0.448219 | 0.418091 | 0.4 |
| 100 | 0.164499 | 0.214593 | 0.197218 | 0.25002 | 0.230651 | 0.221209 | 0.278909 | 0.258457 | 0.248663 | 0.24259 |
| | 0.195985 | 0.244765 | 0.217807 | 0.279553 | 0.250898 | 0.237487 | 0.308026 | 0.278478 | 0.264764 | 0.256418 |
| | 0.257585 | 0.30348 | 0.257682 | 0.336749 | 0.289914 | 0.268763 | 0.364417 | 0.316938 | 0.295635 | 0.282843 |
| 200 | 0.116319 | 0.15174 | 0.139454 | 0.176791 | 0.163095 | 0.156418 | 0.197218 | 0.182757 | 0.175831 | 0.171537 |
| | 0.138582 | 0.173075 | 0.154013 | 0.197674 | 0.177412 | 0.167929 | 0.217807 | 0.196914 | 0.187216 | 0.181315 |
| | 0.18214 | 0.214593 | 0.182209 | 0.238118 | 0.205 | 0.190044 | 0.257682 | 0.224109 | 0.209045 | 0.2 |
| 1000 | 0.052019 | 0.06786 | 0.062366 | 0.079063 | 0.072938 | 0.069952 | 0.088199 | 0.081731 | 0.078634 | 0.076714 |
| | 0.061976 | 0.077402 | 0.068877 | 0.088402 | 0.079341 | 0.0751 | 0.097406 | 0.088062 | 0.083726 | 0.081086 |
| | 0.081456 | 0.095969 | 0.081486 | 0.106489 | 0.091679 | 0.08499 | 0.115239 | 0.100225 | 0.093488 | 0.089443 |
| 10000 | 0.01645 | 0.021459 | 0.019722 | 0.025002 | 0.023065 | 0.022121 | 0.027891 | 0.025846 | 0.024866 | 0.024259 |
| | 0.019598 | 0.024477 | 0.021781 | 0.027955 | 0.02509 | 0.023749 | 0.030803 | 0.027848 | 0.026476 | 0.025642 |
| | 0.025758 | 0.030348 | 0.025768 | 0.033675 | 0.028991 | 0.026876 | 0.036442 | 0.031694 | 0.029563 | 0.028284 |

値が大きく異なり、用いるときには注意が必要である。たとえばカテゴリ数2×2、自由度1で有意確率 $\alpha=0.05$ における V についてみてみよう。サンプル数 $n=60$ のとき $V=0.253$ だが、 $n=1000$ のとき $V=0.062$ 、 $n=10000$ のとき $V=0.020$ とサンプル数が大きくなるにつれて V の値は小さくなる。 V を用いるときはサンプル数を考慮して値を設定する必要がある。

本研究では社会調査のサンプル数が120であることを考慮し、 V が0.25以上のときは関連があると設定して関連分析を行った。

付録 2 ウィンシャート分布について

多変量正規分布について考える。 X を p 次元の確率ベクトルとする。確率ベクトル X の平均値のベクトルを μ とする。 X の $p \times p$ 分散共分散行列を Σ で表す。すなわち Σ の対角要素は X の各要素の分散である。

X の密度関数が次の形で与えられるとき、 X の分

布を平均ベクトル μ 、 Σ の分散（共分散）行列 Σ の多変量正規分布と呼ぶ。

$$f(x; \mu, \Sigma) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x-\mu)' \Sigma^{-1}(x-\mu)\right] \quad (14)$$

多変量正規分布をこのように密度関数で定義する場合は Σ は正定値でなければならない。 X が多変量正規分布に従うことを $N(\mu, \Sigma)$ または次元を明示

して $N_p(\mu, \Sigma)$ と書く、ここで多変量正規分布にお

いて $\mu=0, \Sigma=I$ とおいたものを多変量標準正規分布とよぶ。多変量標準正規分布の密度関数は(1)から

$$f(x; 0, I) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2}} \exp\left[-\frac{1}{2}x'x\right] = \prod_{i=1}^p \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x_i^2/2} \quad (15)$$

となる。この場合密度関数の形から明らかなように X の各要素は独立に 1 変量標準正規分布に従う。次に X_1', \dots, X_n' を各行とする行列を

$$X = \begin{pmatrix} X_1' \\ \vdots \\ X_n' \end{pmatrix}$$

と書く。なお X_n' は X_n の転置を示す。いま、 $X_t, t=1, \dots, n$ が互いに独立に $N_p(\mu, \Sigma)$ に従う

とする。ここでは一般性のために各確率ベクトルの平均ベクトルは異なってもよいものとしている。ここで平方和積和行列 W を

$$W = \sum_{t=1}^n X_t X_t' = X_t X_t'$$

とおく。また

$$\Psi = \Sigma^{-1} \sum_{t=1}^n \mu_t \mu_t' = \Sigma^{-1} M M$$

とおく。ただし $M = E(X) = 1_n \mu'$ で 1_n は全ての要素が 1 の n 次元ベクトルである。このとき、 W の分布を自由度 n , 分散共分散行列 Σ , 非心度行列 Ψ の非心ウィシャート分布とよび、 $W(n, \Sigma, \Psi)$ あるいは $W_p(n, \Sigma, \Psi)$ と書く。非心度は分布の中心からの外れ具合を表しており、平均の二乗和を分散で割った値で示される。非心ウィシャート分布は、1 変量における非心カイ二乗分布の一般化である。カイ二乗分布と同様に平均 $M = 0$ の場合には単にウィシャート分布といい $W_p(n, \Sigma)$ と書く。

多変量正規分布からの独立な標本について、基本的な統計量は標本平均ベクトルおよび標本分散共分散行列である。

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t$$

$$S = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})(X_t - \bar{X})' = \frac{1}{n-1} W \quad (16)$$

本文では S を $n-1$ で除いた形の標本分散共分散行

列、 W を平均からの偏差ベクトルの積和行列とする。

ここで、ウィシャート分布の密度関数の導出のため三角分解について考える。 $n \times p$ 行列 X の各行が

独立に $N_p(0, \Sigma)$ に従うものとする。 X の各列を

$X(1), \dots, X(p)$ と表そう。 $X(1), \dots, X(p)$ に関してグラム-シュミットの直交化を行うことによつて

得られる正規直

交ベクトルを $h(1), \dots, h(p)$ として以下のように表される。

$$h(k) = e(k) / \|e(k)\|, \quad e(k) = X(k) - h(1)h(1)' X(k) - \dots - h(k-1)h(k-1)' X(k)$$

ここで、幾何学的に考えれば、 $e(k)$ が $X(k)$ を

$X(1), \dots, X(k-1)$ に回帰分析したときの残差ベク

トルとなることも明らかであろう。いま

$$t_{ii} = \|e(i)\|,$$

$$t_{ij} = h(j)' X(i), \quad i > j$$

とおけば

$$X(k) = t_{k1}h(1) + \dots + t_{kk}h(k), \quad k=1, \dots, p$$

と書ける。 $H = (h(1), \dots, h(p)), T = \{t_{ij}\}$ (t_{ij} を要素とする下三角行列) とおくと X は $X = HT'$ と表

される。したがって、ウィシャート行列 $W = X X$ は

$$W = TH'HT' = TT' \quad (17)$$

と分解できる。正定値行列 W を下三角行列 T とその転置の積として表したもので、この形の分解を三角分解あるいはコレスキー分解と呼ぶ。

以上ではコレスキー分解をグラム-シュミットの直交化から導いたが、任意の正定値行列 A が $A = TT'$, T は正の対角要素を持つ下三角行列に一意的に分解できる。

いま W を以下のようにブロックに分け、 T をこれに対応させる。

$$W = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{pmatrix} \quad T = \begin{pmatrix} T_{11} & 0 \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}$$

$W = TT'$ を書き下せば

$$\begin{aligned} W_{11} &= T_{11}T'_{11} & T_{11} &= W_{11}^{1/2} \\ W_{12} &= T_{11}T'_{21} & T'_{21} &= W_{11}^{-1/2}W_{12} \\ W_{22} &= T_{21}T'_{21} + T_{22}T'_{22} & T_{22} &= W_{22\cdot 1}^{-1/2} \end{aligned}$$

となる。

ところで (T_{11}, T_{21}) は (W_{11}, W_{12}) のみの関数であり、

T_{22} は $W_{22\cdot 1}$ のみの関数であり (T_{11}, T_{21}) と T_{22} は互いに独立である。さらに分割する大きさを順次かえていき、 T_{11} のサイズを 1 から $p-1$ まで順次大きく

していくと、 T の第一列と $(p-1) \times (p-1)$ の T_{22} は互いに独立である。次に T の第 2 列は (0 要素を除いて) T_{22} の第 1 列と同じものである。ところで、

$$T_{22}T'_{22} = W_{22\cdot 1}$$

これはウィシャート分布に従っていることから T_{22}

の第 1 列すなわち T の第 2 列は残りの $(p-2) \times (p-2)$ の部分から独立である。以下帰納

法により $W = TH'HT' = TT'$ をウィシャート行列の三角分解とすると、 T の各列は互いに独立であることが示された。

$\Sigma = I$ と仮定し $W \sim W_p(n, \Sigma)$ とする。

$W = TT'$ を W の三角分解とする。このとき T の要素 t_{ij} は全て互いに独立であり、 $t_{ii} \sim \chi^2(n-i+1)$ 、

$t_{ij} \sim N(0, 1), i > j$, となる。

この三角分解の結果に基づいてウィシャート分布の密度関数を求める。まず、 $\Sigma = I$ の場合について、 W を三角分解した T の密度関数を求めよう。この場合、 T の要素はすべて互いに独立であり、 T の (対角線を含む下三角部分の) 要素は標準正規分布に従うことから同時密度関数は、

$$\begin{aligned} f(T) &= \prod_{i \geq j} f(t_{ij}) = \prod_i f(t_{ii}) \prod_{i > j} f(t_{ij}) \\ &= c \prod_i t_{ii}^{n-i} \exp\left(-\sum_{i \geq j} \frac{1}{2} t_{ij}^2\right) \\ &= c \prod_i t_{ii}^{n-i} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr} TT'\right) \end{aligned} \quad (18)$$

と書ける。ただし基準化定数 c は

$$\frac{1}{c} = 2^{p(n-2)/2} \pi^{p(p-1)/4} \prod_{i=1}^p \Gamma[(n-i+1)/2] \quad (19)$$

で与えられる。これで $\Sigma = I$ の場合のウィシャート行列を三角分解したときの T の密度関数が求められた。次に Σ が一般の正定値行列の場合を考えよう。そのためには Σ も三角分解して $\Sigma = AA'$ 、ただし A は正の対角要素をもつ下三角行列とする。いま $\tilde{W} \sim W(n, I)$ とすれば $W = A\tilde{W}A' \sim W(n, \Sigma)$ と

なる。 W を三角分解したものを $W = TT'$ とし \tilde{W} を三角分解したものを $\tilde{W} = \tilde{T}\tilde{T}'$ とおけば

$$W = TT' = A\tilde{T}\tilde{T}'A'$$

と表される。ところで $A\tilde{T}$ はやはり正の対角要素をもつ下三角行列である。したがって三角分解の一意性から $T = A\tilde{T}$ とならなければならない。 \tilde{T} の密度

関数は既に求められているから、 \tilde{T} から T のヤコビアン変換 $J[\tilde{T} \rightarrow T]$ ($J = (\partial \tilde{t}_i / \partial t_j)$) を行うことで T の密度を求めることができる。

\tilde{T} から T の変換を要素ごとに書き下せば

$$\begin{aligned} t_{11} &= a_{11}\tilde{t}_{11} \\ t_{21} &= a_{21}\tilde{t}_{11} + a_{22}\tilde{t}_{21} \\ &\dots \\ t_{p1} &= a_{p1}\tilde{t}_{11} + \dots + a_{pp}\tilde{t}_{p1} \\ t_{22} &= a_{22}\tilde{t}_{22} \\ t_{32} &= a_{32}\tilde{t}_{22} + a_{33}\tilde{t}_{32} \\ &\dots \\ t_{ij} &= a_{ij}\tilde{t}_{ij} + a_{i,j+1}\tilde{t}_{j+1,j} + \dots + a_{ii}\tilde{t}_{ij} \end{aligned} \quad (20)$$

となっている。ここで t_{ij} の右辺において \tilde{t} の添え字は (i, j) および (i, j) 以前に現れたものであることに注意しよう。このことからヤコビ行列

$$\frac{\partial(t_{11}, t_{21}, \dots, t_{p1}, t_{22}, \dots, t_{p2}, \dots, t_{pp})}{\partial(\tilde{t}_{11}, \tilde{t}_{21}, \dots, \tilde{t}_{p1}, \tilde{t}_{22}, \dots, \tilde{t}_{p2}, \dots, \tilde{t}_{pp})}$$

(t_{ij} が行, \tilde{t}_{ij} が列として) は下三角行列となり, その対角要素が

$$a_{11}, a_{22}, \dots, a_{pp}, a_{22}, \dots, a_{pp}, \dots, a_{pp}$$

で与えられることがわかる。したがって, ヤコビアン
の絶対値は

$$J[T \rightarrow \tilde{T}] = 1/J[\tilde{T} \rightarrow T] = a_{11} a_{22}^2 \dots a_{pp}^p \quad (21)$$

の形で与えられる。そこで $\tilde{t}_{ii} = t_{ii}/a_{ii}$ に注意して,

\tilde{T} の密度関数より T の密度関数を求めると

$$\begin{aligned} f(T) &= c \prod_i (t_{ii}/a_{ii})^{n-i} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr} A^{-1} T T A^{-1}\right) \\ &= c \prod_i t_{ii}^{n-i} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr} \Sigma^{-1} T T'\right) / |\Sigma|^{n/2} \end{aligned} \quad (22)$$

となることが分かる。以上で三角分解された T の密度関数が求まった。さて, W と T の関係は 1 対 1 であるから, 同様に T から W への変換のヤコビアンを求めれば W の密度関数が求めることができる。

$W = T T'$ の関係を書き下せば,

$$\begin{aligned} w_{11} &= t_{11}^2 \\ w_{21} &= a_{11} t_{21} \\ &\dots \\ w_{p1} &= t_{11} t_{p1} \\ t_{22} &= t_{21}^2 + t_{22}^2 \\ t_{32} &= t_{21} t_{31} + t_{22} t_{32} \\ &\dots \\ w_{ij} &= a_{j1} t_{i1} + \dots + t_{ij} t_{ij} \end{aligned} \quad (23)$$

となる。同様に w_{ij} の右辺において t の添え字は

(i, j) および (i, j) 以前に現れたものだけである。したがって, ヤコビ行列はやはり下側三角行列となり, その対角要素は

$$2t_{11}, t_{11}, \dots, t_{11}, 2t_{22}, t_{22}, \dots, t_{22}, \dots, 2t_{pp}$$

である。したがってヤコビアンの絶対値は

$$\begin{aligned} 1/J[T \rightarrow W] &= 2t_{11}^p 2t_{22}^{p-1} \dots 2t_{pp} \\ &= 2^p \prod_i t_{ii}^{p-i+1} \end{aligned} \quad (24)$$

の形で与えられる。

これより W の密度関数を求めると

$$f(W) = (c/2^p) \prod_i t_{ii}^{n-p+1} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr} \Sigma^{-1} W\right) / |\Sigma|^{n/2}$$

となる。ところで $|W| = |T|^2 = \prod_i t_{ii}^2$ となることから

$$\begin{aligned} f(W) &= c' |W|^{(n-p-1)/2} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr} \Sigma^{-1} W\right) / |\Sigma|^{n/2} \\ &\quad (c' = c/2^p) \end{aligned} \quad (25)$$

と書ける。基準化定数を簡潔に記すために多変量ガンマ関数 $\Gamma_p(a)$ を

$$\Gamma_p(a) = \pi^{p(p-1)/4} \prod_{i=1}^p \Gamma\left[a - \frac{1}{2}(i-1)\right] \quad (26)$$

と定義する。この記法を用いれば W の密度関数は以下の形にまとめられる。

$W \sim W_p(n, \Sigma)$ とする。 $n \geq p$ とし Σ は正則とする。

このとき W の対角要素を含む下側三角部分の要素の同時密度は

$$f(W) = \frac{|W|^{(n-p-1)/2} \exp\left(-\frac{1}{2} \text{tr} \Sigma^{-1} W\right)}{2^{pn/2} |\Sigma|^{n/2} \Gamma_p(n/2)} \quad (27)$$

で与えられる。

もちろん, 式の密度関数は W が正定値の領域における密度関数であり, W が正定値でなければ密度は 0 である。

この式は確率の密度関数であることから積分すると 1 となる。したがって変数変換によって

$$\Gamma_p(a) = \int_{W>0} |W|^{a-(p+1)/2} \exp(-trW) dW \quad (28) \quad \text{定値の領域である。}$$

となることが示される。ただし、積分範囲は W が正

A Choice Behavior Analysis on Safety Drinking Water in Bangladesh

Yoshimi HAGIHARA, Sho SHIBATA*, Kiyoko HAGIHARA**, Yosuke HUKUSHIMA***
Akira SAKAI**** and Kunio TAKAHASHI*****

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

** School of Sociology, Bukkyo University

*** Ministry of Land, Infrastructure and Transport

**** University of Marketing and Distribution Sciences

***** Japan Association of Drainage and Environment

Synopsis

Recently, arsenic contamination of drinking water becomes serious problem in Bangladesh. Bangladesh is one of the poor countries in the world and it has been suffering many kinds of disaster such as cyclones, floods, droughts, and damage caused by salt. Various alternative technologies have been introduced to supply safe drinking water. However, most of them have been abandoned because of difficulty of maintenance, stress of collecting water and so on. To plan alternative of arsenic contaminated drinking water in Bangladesh, in this study social survey with Bangladesh residents was carry out and the situation of using drinking water was clarified.

Keywords: Bangladesh, arsenic contaminated, social survey stress of collecting water, SEM