

ネパールの河川の土砂動態と治水

The Movement of Sediments and River Improvement in Nepal

山本 徹* ・ 黒木 幹男** ・ 山口 甲***

Toru YAMAMOTO Mikio KUROKI Hajime YAMAGUCHI

1. はじめに

ネパールは東西に細長い山国であり、北側にはヒマラヤ山脈を背負い、南側のインドとの国境に接したあたりにわずかな平野部（テライ地方）が存在している。同国の主要な河川は国土を北から南に縦貫し平野部に出て、国境を越えてしばらくすると東に向きを変え、次々と合流しながらガンジス河と名を変えバングラデシュを経てベンガル湾に注がれる。北部の山岳地帯で生産された土砂はテライに出たところでほとんどが堆積する。河床を構成する土砂は極めて微細であり、そのためか平野部に出ても顕著な扇状地を形成することはない。同国河川の特徴の一つに数えてよいと思われる。テライは長らく人の住まない場所であったが、近年マラリアの撲滅とともに開発が進み、多くの農地ができていく。しかし、治水事業が未だほとんど行われないまま放置されている河川が多く、災害が頻発している。特に、農地の侵食、堆積は深刻な問題であるが、地先での対応に終始しており、治水のマスタープランを持っていないのが現状である。現在、日本を中心に計画の立案作業が進行しているが、土砂動態に対する理解の妥当性が計画の成否を決めるといっても過言ではない。しかし、基礎的な調査も十分でなく、土砂動態を考えるための資料がほとんどないのが現状である。著者ら¹⁾は、河川の安定縦断形状理論を開発するとともに、この理論を用いて水文資料のない河川の平年的な土砂生産量を推定する方法を開発している。幸いなことに 1996 年に当地を訪問した際に 1:25000 および 1:50000 あわせて約 230 枚の地形図を入手することができた。これを基礎資料として、現地河川の安定河道縦断形状の検討に着手した。ネパールのように資料の乏しいところで、河川計画を立案する上で有用な手法の一つと考え、著者らが見聞した範囲で同国の河川の現状とともに、ここに紹介するものである。

2. ネパール国の自然

ネパール国はヒマラヤ山脈の南斜面に位置しほとんどが山岳、丘陵をなし、南部の一部にテライという平野を持つ。西、南、東側がインド国境をなし、北側が中国と国境線を有する(図-1)。国土は東西約 900km、南北約 200km の長方形をなし、緯度は沖縄本島あたりに位置する。国土は北側から山岳部、丘陵部、テライの三つに区分できる。三区区分された各々の面積及び居住する人口の構成比は表-1 に示すとおりである。概して面積は 3 分されるが人口はテライが最も多く、近年にな



図-1 ネパール国位置図

キーワード：ネパール、河川災害、テライ、安定河道計画

* 佐藤工業株式会社 土木本部土木グループ (〒060-0813 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 yama@eng.hokudai.ac.jp)

** 北海道大学大学院工学研究科 助教授 (同上 kuroki@eng.hokudai.ac.jp)

*** 北海学園大学工学部 教授 (〒064-1126 札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

表-1 人口の分布

区分	面積比%	人口比%
山岳部	35.2	7.8
丘陵部	41.6	45.5
テライ	23.2	46.7

り増々人口集中の現象が進んでいる。テライ地方は1960年頃までは密林であったが、マラリヤ病の撲滅作戦の一つとして密林を伐

開し、米作農業の中心となったが洪水被害が多発しており、年々その被害が大きくなっている。

大井ら²⁾はネパールにおける自然災害史からその発生頻度についてまとめている。それによると、毎年発生するものとして全国的に豪雨、渇水、山岳部で地すべり、テライで農地侵食、洪水氾濫があげられている。洪水災害の原因をなす降水量は4000mmに達するところもあるが丘陵部、テライでは1500mm程度のところが多く年間降水量に関しては日本と大差ない。ただし、雨期と乾期があり乾期には河川水もなくなるほど河川流量の季節差が大きい。地質構造は河川災害と関係するところが多い。ネパール国はインド洋から北部のチベット高原に向かってせり上げる造山運動帯に位置し、その地質は水成岩（水中に堆積した堆積岩）を主体にしている。北側に向かう造山運動は現在も続いている。地質の構造線は東西方向に直線状にみられ地形も同様に東西方向に走っている。図-2はヒマラヤ地質群、三紀～白亜紀の岩石、洪積世～三紀の岩石（Siwalik）、沖積土に大別し各々の地質の分布状況を示しているが、東西方向に帯状に分布しているのがわかる。ヒマラヤ地質群は4000m以上の高い標高をなし、急峻な斜面を有している。三紀～白亜紀の形成岩帯は高原丘陵地帯であるものの、山腹斜面の崩壊が著しく土砂の発生源となっている。Siwalikと称される地質は雨水侵食に対して脆弱であり、年々斜面侵食が起きており、沖積土地帯は北部から生産された土砂が堆積する地域となっている。

- 沖積土
- Siwalik (洪積世～三紀)
- ◎ 三紀漸新世～白亜紀
- ⊗ ヒマラヤ地質群



図-2 ネパールの地質

3. ネパール国の河川

3.1 概要

図-3はネパール国河川の概要図であるが、大きく分けるとカルナリ水系、ガンダキ水系、コシ水系に分けられる。そのすべてがインドでガンジス河となりベンガル湾に注がれる。この国土内を流れる河川はいずれも北側から南側に流下し、南側のインド領に流下して、水源を北側のチベット及び東西のインドに発するものと、ヒマラヤ山脈の南斜面のネパール国内で発

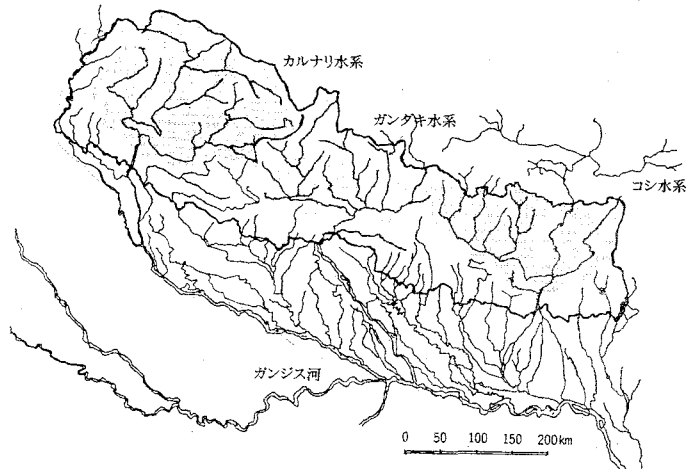


図-3 ネパールの河川

するものがある。ネパール国土内の流域面積の大きさはカルナリ、ナラヤニ、コシ、マハカリ川の順となっており、これらは防災対策を考える場合日本の河川にはない他国流域との調整を要するという課題がある。ネパール国土以外の流域面積が大きいコシ、マハカリ川ではチベット高原またはインド領域の水文情報や土地利用情報が無くては防災対策が立案できない。また流末は全てインド領内に流下するので自国だけの最適性のみをもって防災対策や水資源の開発等を論ずることができないという現実的な問題に直面している。ネパール河川の河道形状の特徴は1)国土中央部で東西方向へ横流路がみられ、2)テライで川幅が急拡している

ことである。テライにおいては直上流側の川幅の5~20倍の規模に急拡している河川が多いが、これらの河川はいずれも流域面積が大きく、土砂輸送量の多い河川である。日本の土砂輸送量の多い河川では扇状地が形成されている場合が多いが、ネパール河川では複列砂州が形成された川幅の広い河道をなしている。

3.2 バグマティ川

バグマティ川はカトマンズ盆地の上流約30kmからインド国境に至る河川で延長約200km、流域面積約3700km²を有している。図-4は1:25000地形図から得たバグマティ川の河床高縦断形である。それによるとカトマンズ盆地をはさんで上流側の標高2000m級の上流部、カトマンズ盆地部、下流側のインド国境までの下流部の3つに大別できる。

上流部の本支川はカトマンズ盆地四方から流入するが、流域の約6割強は耕地で、残りが森林地帯であり水源域にもかかわらず耕地の割合が非常に高くなっているのが特徴である。

カトマンズ盆地はかつて湖水であったため、湖沼堆積物が基盤にあり、流水に対する抵抗力が小さく、河岸侵食が多発し河道は不安定であり、現在でも河床低下がみられる。また首都カトマンズ市への人口集中は土地利用が進み、かつての川原を埋め立て、結果的に洪水流量の流下断面を縮小し、これが河床の縦侵食を促している。写真-1は盆地に流入する地点の河道に隣接する水田であり、一旦氾濫した湛水によって減水期に水田面が侵食されているものである。写真-2は側岸侵食の状況を示しており河岸が無防備であるのと、粘着力のないレキ分で構成されているので容易に侵食を受ける。写真-3のように崖崩れがいたるところで発生し、かつ2000級の山間の斜面で農耕地としての利用が進んでいるため、Labonの調査⁹⁾によると、バグマティ川の流域面積590km²を有する観測所(Chovar)で年266万m³と土砂輸送量が非常に大きい値を示している。

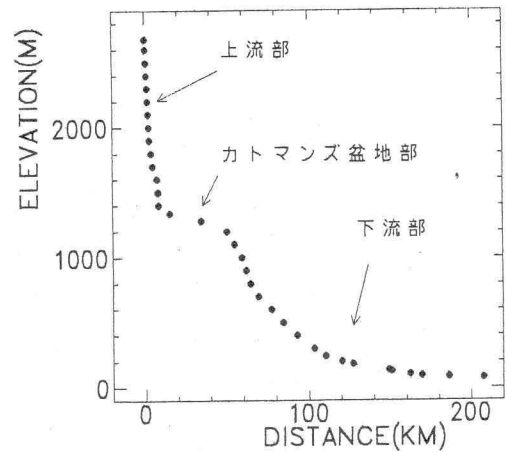


図-4 バグマティ川河床高縦断図

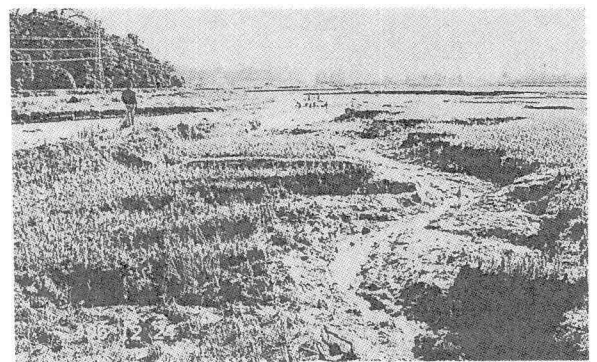


写真-1 水田の侵食状況(バグマティ川)

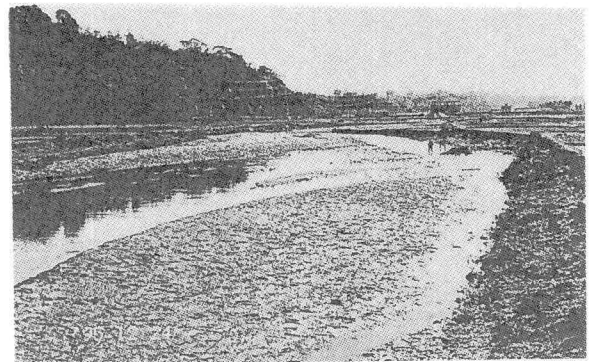


写真-2 河岸侵食状況(バグマティ川)

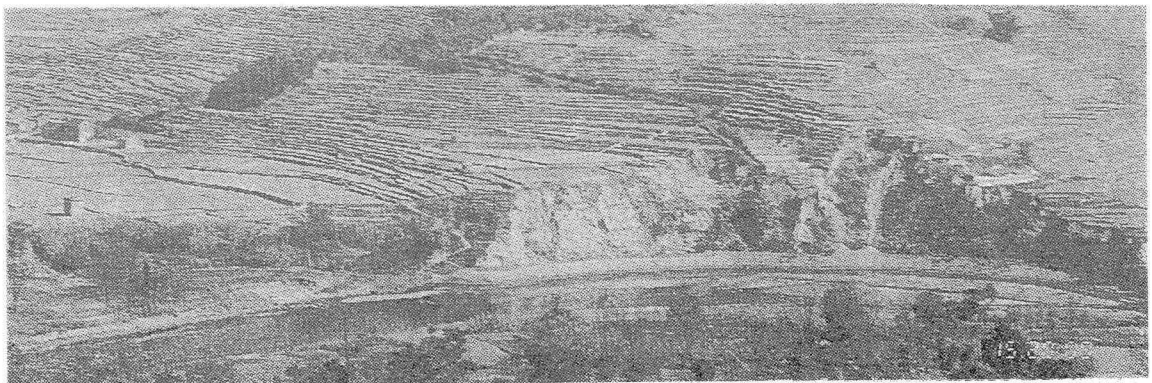


写真-3 河岸斜面崩壊状況(バグマティ川)

盆地から急勾配で流下する河川は地質区分でいう Siwalik および沖積土地帯で緩勾配となり、ここに多量の土砂を堆積する。下流部の平地であっても写真-4 のように森林中に土壌侵食を受けている部分が見られる。現地で森林のなかに入ってみると樹木はおおむね 10m^2 に1本程度で、下層の灌木が極めて少ないのが特徴的である。(写真-5) このために雨水により表面侵食が起りやすく、表面土壌層が安定していないこと、地質および表面土壌の貧栄養性に起因して樹木が少ない。1993年7月の大洪水の後、インド国境から約50km 横断測量が実施されたがそれによると、河床勾配は $1/1900$ 、平均川幅 1100m、河岸高 2m で河岸侵食が進んだ皿型の河道形をしている。河岸高が低いため、氾濫頻度も高い河川である。この地域の河床材料の平均粒径 0.3mm と微細砂であって、一旦堆積すると移動し難いため、土砂の堆積を促している。1993年7月の洪水のみで $10661 \times 10^3\text{m}^3$ の土砂がテライに堆積し河床高を約 18cm 上昇させている。これを比輸送量で表すと $2900\text{m}^3/\text{km}^2$ であり、これは流域全体の侵食深で 2.9mm に相当する。

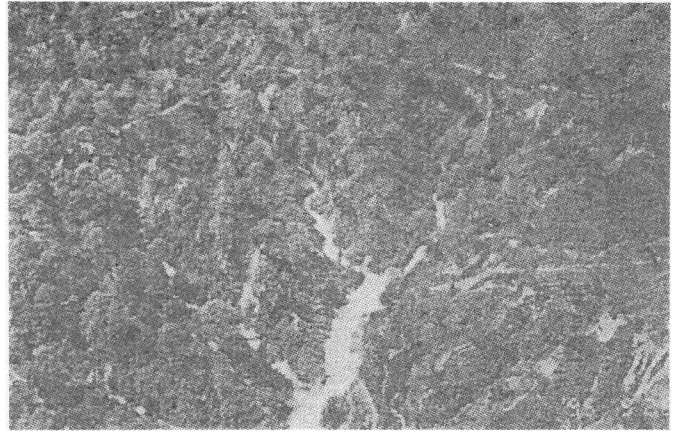


写真-4 森林中のガリの形成状況

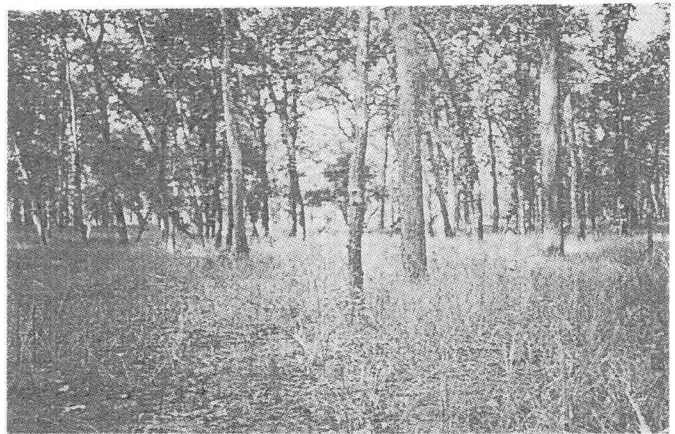


写真-5 森林の植生状況

4. 河川災害事情 (1993年のバグマティ川の洪水被害)

1993年7月にネパール中央部カトマンズ市を中心に集中豪雨が起り、バグマティ川流域に崖崩れ、土石流、洪水氾濫により、道路、橋梁、堤防、発電所、堰など重要なインフラ設備の被害が大きく、首都は孤立化、都市機能のまひは長期化し、深刻な国家的ダメージとなった。この洪水では最も大きかったところで 600mm の降雨量を記録し年降雨量の 30%にあたる集中豪雨であった。被害は甚大で約 50 万人が被災、死者、行方不明約 1500 人、家屋全壊約 18000 戸、土地流出 43000ha を記録した。

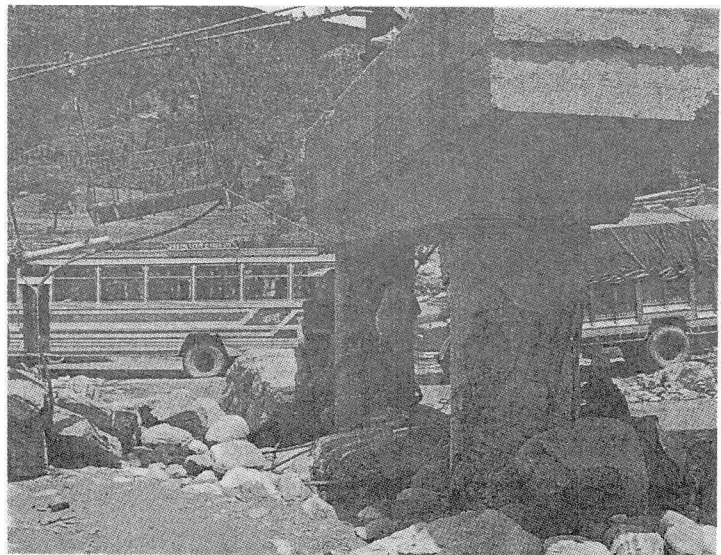


写真-6 マハデブベシ橋被災状況

そのうち Siwalik から上流側では土砂災害が顕著である。写真-6 は首都カトマンズに通じるハイウェイの橋梁の橋脚 3 基の内唯一残ったものであるが土石流の繰り返す衝撃でほぼ破壊されている。橋脚には 1m を越える巨礫が見える。橋梁の本格的復旧まで 3 年を要した。丘陵部の部落では土石流の被害により家屋流出など被害がでて、写真-7 のような厚い砂礫でおおわれてしまった。写真-8 は別名「悲劇の堰」といわれるバグマティ堰であるが、

建設に10年間、稼働3週間、そして数秒で破壊され砂礫におおわれた。この堰から東西にのびる幹線灌漑水路を通じて洪水が遠くまで達し、被害が広範囲に及んだ。

国境に近いテライの河道は中州として土砂堆積が進み河岸高は2mにすぎないため大規模な氾濫災害に見舞われた。テライの河道延長は約50kmであり、堤防などの治水施設は皆無に等しく左右岸に氾濫し、面積は約100000haに及んだ。写真-9は集落の氾濫状況であるが、平野が一面に広がり、丘陵部にくらべ家屋も貧弱であり高い土地もない。したがって被害全体のうちテライの占める割合は人的、家屋、損傷土地とそれぞれ約75%と圧倒的に高い値を示している。この地域(テライ)の農耕地面積は全国耕地面積中90%を占め、その生産活動はネパール国経済上極めて重要であり、災害危険度を減少させることが急がれる。

このようにSiwalikから上流地域は土砂災害、テライは氾濫災害の対策が急務であり安定河道基本計画の早期策定が望まれている。

5. 安定河道縦断形状理論の適用

著者らは、河道の安定形状について理論的解析を行ってきた¹⁾。この理論は、支配流量を対象に、流れの運動方程式、抵抗則式、平衡横断河床掃流方式、流砂の連続式、流砂量式を基礎式とし、流量の縦断形には比較的多くの流域に適合する指数分布を仮定し、安定河床高縦断形、川幅、平均粒径、水深の縦断方向の変化を求めることができる。実河川の適用にあたっては支配流量として、平均年最大流量を用いることにした。

尚、先述のようにバグマティ川は首都カトマンズを流下するが、市内では人口集中、河川域の土地利用とネパール河川では例外的な河床低下現象及び人工的な狭窄部などがみられるためここではそれを避け、重要度の高い下流部を対象に解析をおこなうこととする。

バグマティ川は図-4に示したように上流部、盆地部、下流部に大別できるが、上流部(Sundarijal)、盆地部(Chovar)、下流部(Karmaiya)にそれぞれ流量観測所がある。図-5はそれらの観測所の平均年最大流量をプロットしたものである。図の近似直線から流量の縦断分布を推定することができる。

図-6は推定された流量の縦断分布をもとに安定河床高縦断形をもとめ、実資料と比較したものである。



写真-7 丘陵部(フェディガオン)部落被災状況

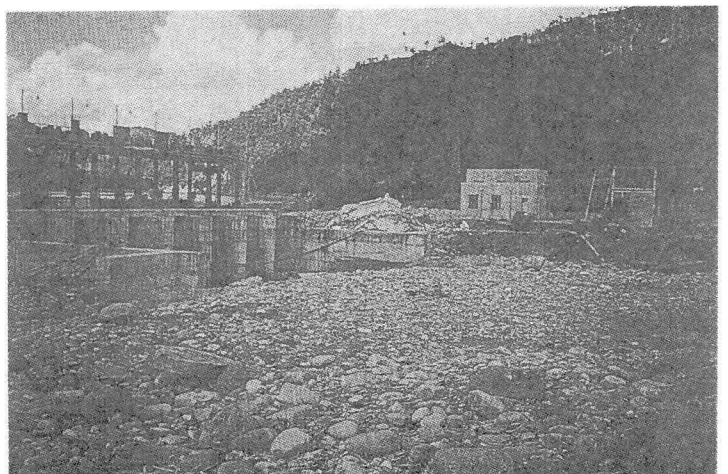


写真-8 バグマティ堰被災状況



写真-9 テライ地方氾濫被災状況

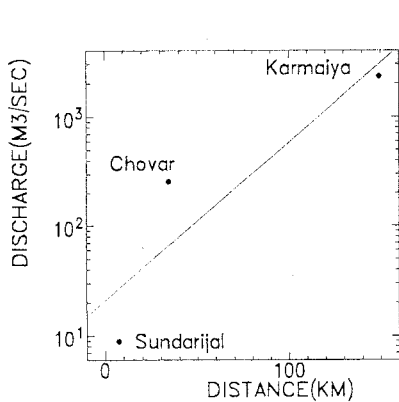


図-5 流量縦断

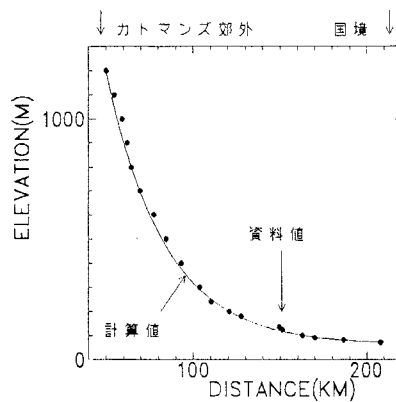


図-6 河床高縦断

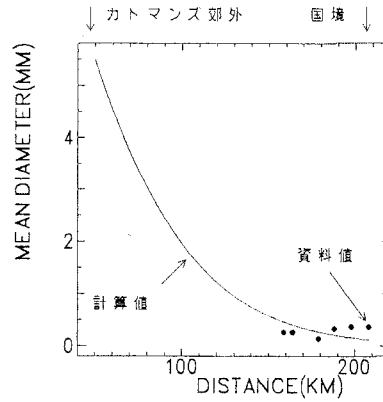


図-7 平均粒径縦断

曲線は計算値、黒丸は1:25000地形図から得た実資料値であるが、適合度は非常に良好である。次に平均粒径について国境付近の河床材料ふるい分け試験データ⁴⁾をもとに縦断分布をもとめ、図-7に示したがカトマンズ郊外において平均粒径が5.5mmとなった。この結果を直接確かめる試験データはないが、著者らは1996年に当地を訪れ、バグマティ川カトマンズ郊外の視察に際し、河床材料が砂礫であることを確認している。本年、現地においてバグマティ川の河床材料調査がおこなわれるので、その結果を待ってさらに考察を加えていきたい。図-8は国境付近の川幅データ⁴⁾と1:25000地形図から得た川幅を黒丸で示し、安定河道理論による計算値(曲線)と比較したものである。それによるとカトマンズ郊外で20mとデータよりやや小さめとなり、国境では6000mとデータと比べやや大きめとなったが、全体的には実データと類しているといえる。図-9は国境付近の平均河岸高のデータ⁴⁾をもとに水深の縦断分布を求めたものであるが、カトマンズ郊外にて約1mとなった。著者等が視察した際の河岸高の記録によると1m程度であり、概ね無理のない数字である。

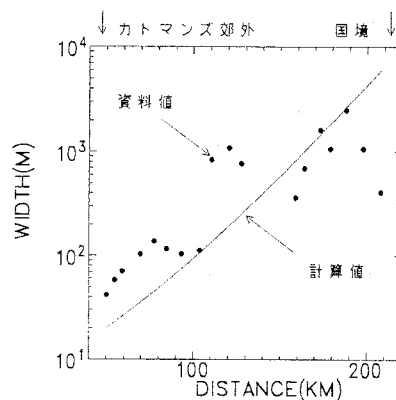


図-8 川幅縦断

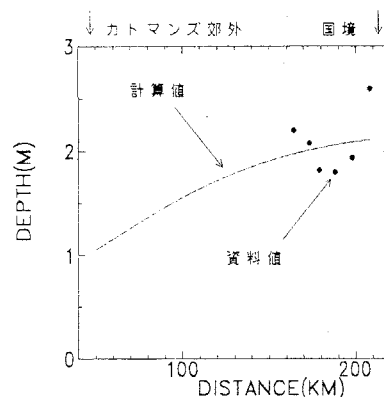


図-9 水深縦断

6. おわりに

以上のように、河川情報の少ないバグマティ川のテライ地方に安定河道縦断形状理論を適用し、河道特性量の縦断分布を比較したところおおそ無理のない結果が得られた。山岳、丘陵地帯が多いネパール国においては、テライの平坦地の有効な土地利用が同国の今後の発展に欠かせないものとなっている。重要度の高いテライ地域の河川防災対策は急務である。今回の試みを安定河道計画の理論的基礎としていきたい。

参考文献

- 1) 黒木幹男、板倉忠興：安定河道縦断形状に関する研究、水工学論文集第39巻、pp. 641-646、1995
- 2) 大井英臣ら：Final Report Cross Section Survey of Bagmati River、D.P.T.C Nepal、1995
- 3) Labon Field Bagmati River Erosion and Sedimentation in Nepal、1978
- 4) 山口甲、上野順也、鈴木洋之、山崎文明：N e p a lの河川と河川災害、開発論集第60号北海学園大学開発研究所、