

レーザースキャナにより取得した数値標高情報 に基づく河道形状情報の作成に関する研究

STUDY ON METHOD TO DRAW CROSS SECTIONAL PROFILES OF RIVERS USING LASER SCANNED GROUND HEIGHT DATA

安田 浩保¹・武富 一秀²・館 健一郎³・金木 誠⁴

Hiroyasu YASUDA, Kazuhide TAKEDOMI, Ken-ichiro TACHI and Makoto KANEKI

¹正会員 修士(工学) 独立行政法人北海道開発土木研究所河川研究室(〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)*

²正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所水害研究室

³正会員 修士(工学) 国土交通省四国地方整備局那賀川工事事務所調査課*

⁴正会員 国土交通省中部地方整備局中部技術事務所*

Although a data of river form for middle and small size river were not be prepared, we need to calculate inundation flow or water profile of river the data. Lately, LiDAR which can measure the ground height in the high density and accurately is often used, we suggested that a data of river form can generate from LiDAR data. In this paper, taking character of LiDAR data, the sectional profiles of 10 m interval from LiDAR data are generated, and past floods are calculated using generated sectional profiles. And otherwise, automatic extraction method of boundary between main channel and flood plain for calculation of nonuniform flow considering arborous efficacy as transverse velocity distribution is suggested.

Key Words : Laser scanner, cross sectional profiles, flood simulation

1. はじめに

平成13年に水防法が改正されたことに伴い、洪水予報の発令および浸水想定区域図の作成が必要な河川は従来の国土交通大臣が管理する河川に加えて都道府県知事が管理する河川にまで対象が拡大された。洪水予報の発令や浸水想定区域図の作成を行うためには、河道の縦横断形状や氾濫原の地形形状などの空間情報、および降水量や河川水位などの水理・水文情報が必要となる。しかしながら、現時点では都道府県知事が管理する河川においてこれらの情報は十分に整備されてない状況にある。必要となる空間情報のうち、氾濫原の地形形状に関しては都市計画図などに示されている標高値を利用して作成することができる可能性が残されているものの、河道の縦横断形状に関しては既存の空間情報から作成する事は一般に難しい。

しかし、最近ではレーザースキャナにより高精度かつ高密度に地形形状を面的に取得する技術が利用されるようになってきており、その技術的特徴から中小河川の河道形状情報を生成できる可能性がある。これまでに著者ら¹⁾はこの技術を応用することで河道の縦横断形状データを概ね生成できることを示している。それと同時にレーザースキャナは水面下の標高値を取得で

きないためにこれに対する補完が必要になることなどについてを示した。

前報¹⁾ではレーザースキャナにより取得した標高値に対して如何なる処理を施せば適当な河道形状情報が作成できるかに焦点を置いて議論を展開していた。本研究では、これらの知見を活用するとともに、不定流計算などの水位計算を実施するにあたり水面下の標高値の取得が困難であることを補う方法のひとつとして次のような試みを行った。レーザースキャナが高密度にデータを取得できる事に着目して、流下方向に対して数10m間隔で断面形状を生成する事、すなわち定期測量の取得区間内を補完する断面を含む河道形状データを生成する事を試みた。そして、この補完断面を含む細分区間間隔の断面データに基づく水位計算を行い、計算結果への影響について観測水位と比較する事により検討を加えた。この他、準2次元不等流計算で必要となる複断面の分割境界の自動的な抽出方法について示した。

2. 検討対象の流域

本研究では、検討対象の流域を図-1に示す、源流を東京都町田市に発して横浜市鶴見区から東京湾注ぐ、全長42.5km、流域面積235km²の鶴見川とし、その13.8km～19.6km区間を検討対象区間とした。この区間内には

*研究当時、国土交通省国土技術政策総合研究所に在籍。

表-1 利用したレーザースキャナデータの概要

レーザースパルス	15000Hz, 24000Hz
射出頻度	
レーザースキャン幅	790m
スキャン頻度	18.5Hz, 24.0Hz
スキャン角度	18 °
飛行高度	8500ft (2591m)
対地速度	110Kt (204km/h)
パルスモード	1st パルス～5th パルスまですべて使用
照射点密度	0.02(コース端部)～3.0m(コース中心部)
取得精度	水平方向 ±15cm, 鉛直方向 ±30cm
取得後処理	建築物, 樹木は除去対象とせずに, 雲, 塵や飛行物体等で乱反射した値だけを除去.
取得値の配列	ランダム配列
配列間隔	2 m(平均値)
取得日	2001 年 12 月, 2002 年 1 月

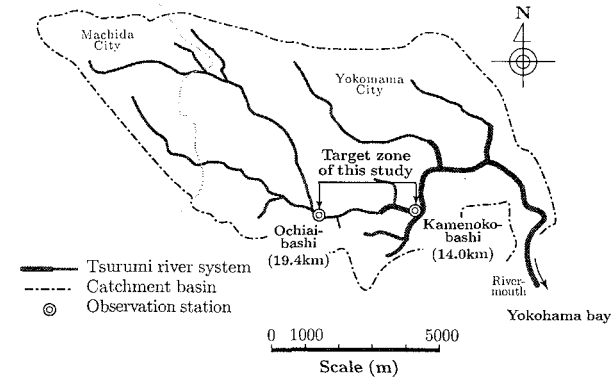


図-1 対象流域図

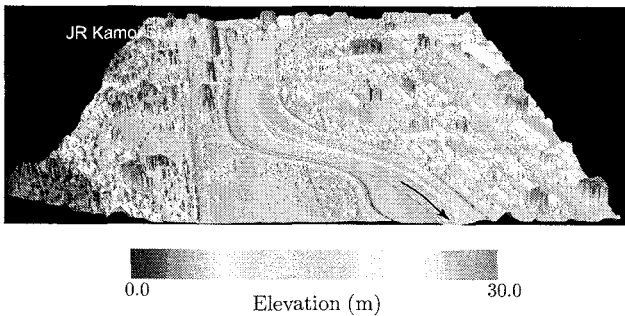


図-2 JR 鴨居駅付近を鶴見川下流から上流に向かって望むレーザースキャナで取得した標高値から作成した鳥瞰図

13.8km 地点に亀の子橋水位流量観測所, 19.5km 地点に落合橋水位流量観測所があり, 水位計算の結果の妥当性の検討にはこれらの観測所の観測記録, および洪水痕跡記録を利用した.

3. レーザースキャナデータからの河道形状データの作成手法

(1) 利用したレーザースキャナデータの概要

レーザースキャナを利用した地形形状の取得, すなわち面的な標高情報の取得はここ数年で急速に広く行われるようになってきた. 当初は受注による計測である事が多かったが, 最近では都市部などの使用頻度が高いと思われる地域に関してはライブラリー化されて一般に市販されている例も見られるようになってきた. 本研究では国際航業 (株) が市販する RAMS-e²⁾ を利用することにした. RAMS-e は, 標高点をランダムに配置した (以下, ランダムと略す) DSM (Digital Surface Model), 前述のランダム情報を平均化処理して 2m 間隔の格子状に再配置した (以下, 2m メッシュと略す) DSM, および 2m メッシュ DEM (Digital Elevation Model) の 3 種類が用意されている. 本研究ではこのうちランダム DSM を利用し, その概要は表-1 のとおりである. ここで, DSM は建物, 樹木などを含む地形の標高値情報, DEM は DSM から建物, 樹木などを除去して地形の起

伏に関する標高値情報であることを意味する.

なお, 表-1 中の取得精度はレーザースキャナの計測機材の取得精度と同値であるが, これはレーザースキャナによる取得値と実測による取得値との比較の結果を示したものである. 都市計画図などで用いられる 1/2,500 の地形図では鉛直方向の精度は 66cm 程度であるから, それに比してレーザースキャナによる取得値は格段に良好な精度であることが分かる. また, 高密度な標高情報であるために地形図と同等であるとは言わないまでも, 図-2 に示したように地形形状をかなりの解像度で把握できるという特徴もある.

(2) 作成手法の概要

著者ら¹⁾はこれまでにレーザースキャナを利用して取得した数値標高情報から河道の数値形状情報を作成する方法について, 標高値の取得が困難な水面部や植生の密生部に対する対処法を含めて示している. 本研究でもこれに従い, その概要は以下のようなものである.

まず, 横断面を作成する断面線を定義するために左右岸においてそれぞれ端点座標を決定する. この位置座標が適切に設定されていないと洪水氾濫の計算を実施する際に河川から氾濫原への越流量が正確に評価できなくなるため慎重に決定する必要がある. つぎに, レーザースキャナを利用して取得した数値標高情報は必ずしも先に定義した横断面線上に存在するとは限らないから, その線上において横断面形状を構成する標高値の配置間隔 Δs を定義する. そして, 横断面構成する

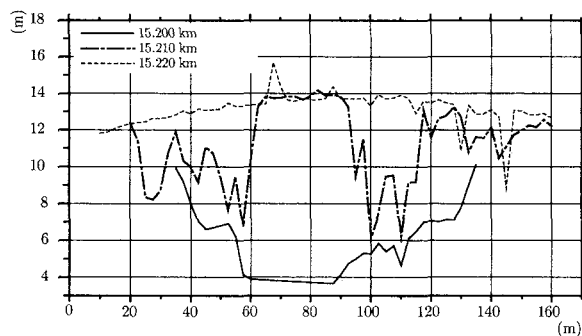


図-3 10m 間隔で取得した横断形状 (20m の短い区間ですら構造物が存在すると横断形状は大きく異なることになる)

各点の標高値を決定するために、その定義地点を基準としてある幅を持つ領域（以下、バッファ）を定義する。最後に、このバッファ内に含まれる定義地点の最近4個から得た平均標高値をその位置の標高値であると定めることとし、横断面はこのように定められた点群から成るものと考えたことにした。この時、バッファの形状について議論する必要があるが、円形と矩形のバッファを比較した結果、矩形バッファを採用することにした。

(3) 細分間隔断面の作成上の留意点

定期縦横断測量では横断面は数100m 間隔で設定されることがほとんどである。しかし、河道の横断形状および護岸の高さは必ずしも単純な増加あるいは減少傾向に従い変化しているわけではなく、図-3に示したように場合によっては数10m 程度の短い区間においてさえ複雑に変化している。従って、河道形状の情報の利用目的に水位計算を考える場合などでは定期縦横断測量の断面間隔よりも狭い間隔で取得されているに越したことはない。

実測により取得される定期測量の河道形状に対して、レーザースキャナにより取得した標高値に基づき河道形状を生成する場合ではかなり細分間隔でこれを取得できる可能性がある。ただし、河川には橋梁をはじめとする比較的大規模な横断構造物から水道管やガス管などの小規模な横断構造物まで様々なものが存在するから、これらを有する断面ではその取り扱いに注意が必要である。

本研究では10m 間隔の横断面を作成することとした。レーザースキャナにより取得した標高値は上空からによるものであるから、横断構造物が存在する場合では横断形状を正確に取得すること不可能となる。このような断面は棄却する必要がある、つぎのように2段階に分けて棄却を行うことにした。まず、第1段階目の棄却は作成した横断形状を可視化してこれらを目視することにより棄却を行い、第2段階の棄却は任意に設定した水位時における dA/dx を算出して隣接断面間でこの

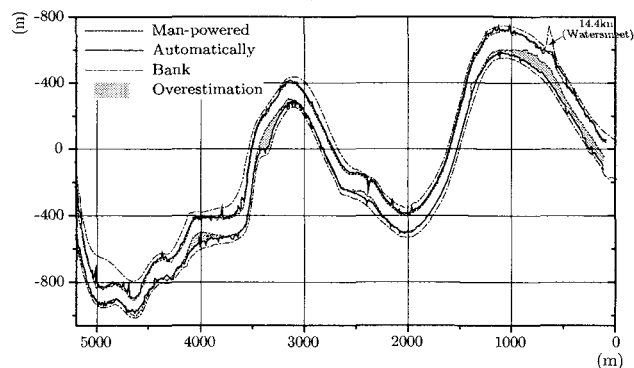


図-4 複断面の分割境界の自動抽出の結果

値が急激に変化する場合には棄却することにした。ここに、 x は河川縦断方向の水平座標、 A は流積である。

(4) 複断面の分割境界の自動抽出

河道内の樹木群の影響を考慮した河道水位の計算法に準2次元不等流計算³⁾がある。このような計算を行うためには複断面の分割境界や境界混合係数を把握しておく必要があるが、複断面の分割境界を簡便に把握できる空間情報はほとんど存在しない。このため、現状ではこのような情報を必要とする水位計算を実施する場合、多大な人的な労力を要して作成しなければならない。本研究では、以下に示す方法を各断面に適用して複断面の分割境界を自動的に抽出することを試みた。

まず、前述までの方法で生成した横断面ごとに隣接点間の標高差 Δz_i を横断面を構成する全ての点について算出するとともに、その断面における平均標高差 Δz_{Av} を求める。つぎに、低水数と高水数の平面部を推定するために、この平均標高差 Δz_{Av} よりも隣接点間の標高差 Δz_i が小さい点の抽出を行う。そして、これら抽出点に関する平均標高値 z_{Av} を求めて、この値と横断面を構成する点の標高値 z_i との比較を行い、 z_{Av} よりも大きい z_i を高水数を構成する点群であると定義する。最後に、高水数を構成する点群を左右岸に分けて、それぞれ低水路に最も近い点が各横断面における複断面の分割境界点であると考えたことにした。

図-4に前述した方法により抽出した複断面の分割境界と航空写真および都市計画図から抽出した分割境界の比較図を示す。実線が提案した手法により自動的に抽出した分割境界、点線が既存の空間情報から人力で抽出した分割境界、および一点鎖線が堤防天端を表している。灰色に着色した部分のように、提案した方法ではやや過大となる傾向があるもののそれ以外では両者はよく一致した。この方法は河川の規模にかかわらず複断面の分割境界を自動的に抽出する有力な手法のひとつであると言える。

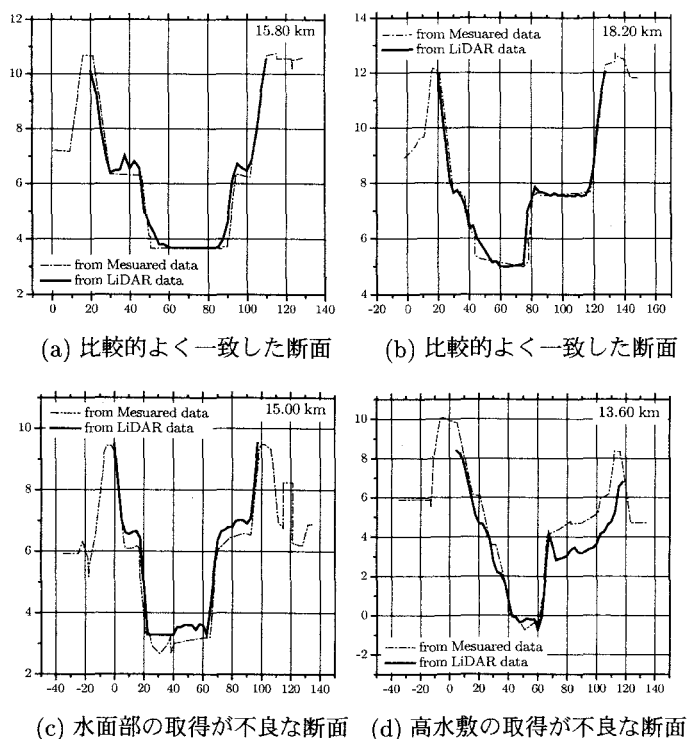


図-5 河道横断形状の比較 (定期測量成果とレーザースキャナ)

(5) 生成した河道形状情報と定期測量成果の比較

レーザースキャナデータから生成した河道形状情報と定期測量成果の比較を後述のとおり横断形状、護岸高、最深河床高、河道幅の観点から行った。ただし、表-1に示すとおり本研究で利用したレーザースキャナデータは2002年頃に取得されたものであるのに対して、ここで利用した定期測量成果は1999年から2000年にかけて実施されたものであるなどの理由から、必ずしも定期測量成果が真値であるとは限らない。このため、両者の一致の程度だけで生成した情報を評価することは難しいことに留意したうえで議論を進める必要がある。

a) 横断形状

図-5 (a)~(d)に横断形状の比較の一例を示した。定期測量によって取得されているすべての横断面に対してレーザースキャナデータに基づき河道形状情報を生成したが、両者の多くは良好に一致して、大きく異なるような断面は存在しなかった。このうち、(a)、(b)は若干の差異はあるものの水面部および高水敷など全般的に一致した例である。(c)は水面部の取得が不良となった断面で、横断距離で20~40 mの区間が水面であったと推定される。一方、40~60 mの区間に関しても両者に差異が見られるが、これは定期測量を実施後に河道形状が変化したことに起因する差異であると考えられる。(d)は高水敷を除きおおむね両者が一致した断面で、この高水敷の差異は(c)の例と同様の原因による差異であると考えられる。

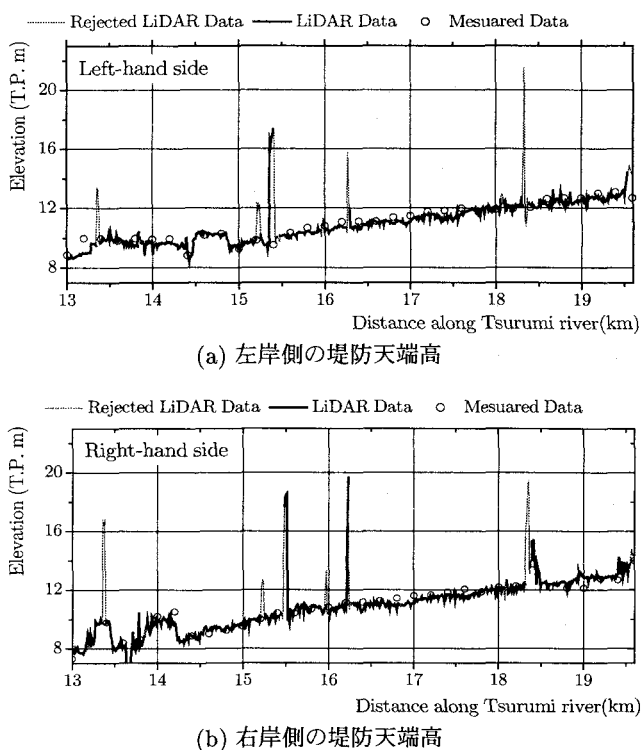


図-6 堤防天端高の比較 (定期測量成果とレーザースキャナ)

b) 堤防天端高

横断形状と同様に堤防の天端高の比較を図-6 (a), (b)に示すとおり行った。図中の太線がレーザースキャナの情報から作成した断面、丸印で示されているのが測量成果から得た断面の堤防の天端高である。左岸、右岸ともに比較的良好に一致していることが分かる。これは、堤防の天端に該当する位置座標を慎重に決定したためであると考えられる。なお、いくつかの断面では天端高が突出した標高値となったが、これは橋梁などの構造物を有する断面である。

c) 最深河床高と最大河道幅

最深河床高に関しては図-7に示すとおり一部の断面で1m以上の差異が見られる結果となったが、これを除けばいずれの断面でも概ね一致する結果となった。最大河道幅に関しても図-8に示すとおり両者は良く一致した。

鶴見川は14.4km付近で支川合流があり、この影響で河川幅は一時的に広がっているほか、最深河床高に関してもこの合流部前後では両者は大きく異なる結果となった。これらの急激な変化に対して数値だけからでは誤った判断を下す可能性があるため、レーザースキャナデータに基づき河道形状に関する情報を生成するにあたっては標高情報だけでなく、地形図や航空写真などを参考にすると考えられる。

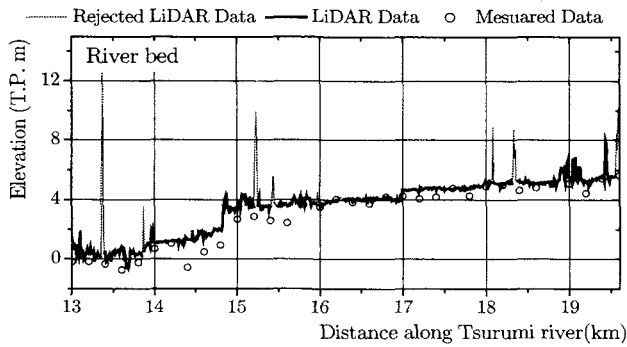


図-7 最深河床高の比較 (定期測量成果とレーザースキャナ)

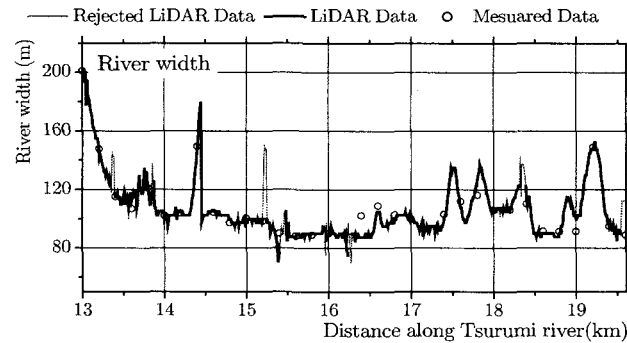


図-8 最大河道幅の比較 (定期測量成果とレーザースキャナ)

4. 河道水位の計算特性

(1) 基礎方程式とその数値解析法

河道水位の計算は1次元解析法を適用するものとし、その基礎方程式は式(1)、(2)に示すとおりとした。ただし、定常流として考える場合ではこれらの式から局所項を無視した不等流の式を用いる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial \eta}{\partial x} = - \frac{gn^2 |Q| Q}{R^{4/3} A} \quad (1)$$

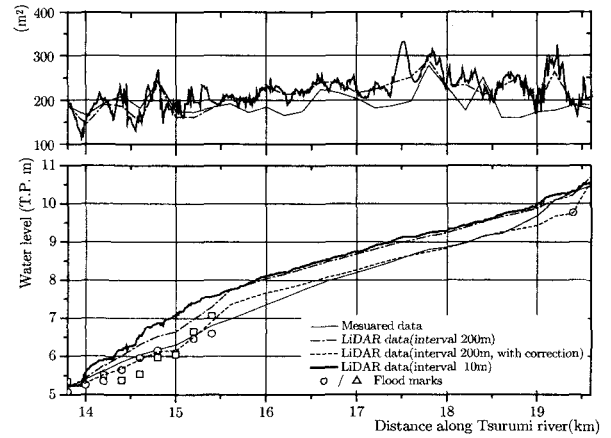
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここに、 Q は河川流量、 η は河川水位、 n は Manning の粗度係数、 R は径深、 g は重力加速度、 B は水面幅である。

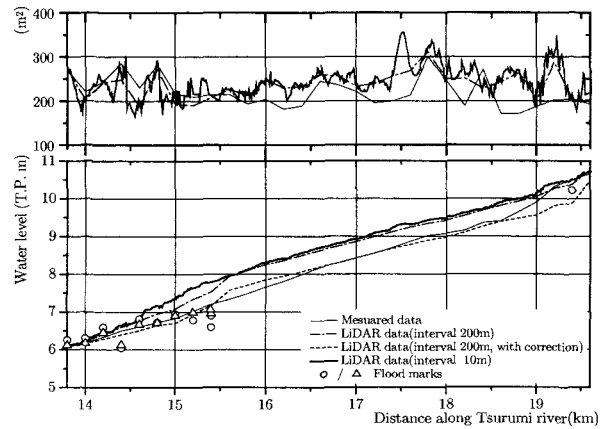
本研究における対象区間長は 6km 程度であるため、非定常効果は顕著に現れないと考えられることから、式(1)から局所項を除いた不等流の式を基礎式とすることにした。そして、その数値解析法には、

$$\frac{Q^2}{\Delta x} \left[\frac{1}{A_i^k} - \frac{1}{A_{i-1}^k} \right] + \frac{gA_i^k}{\Delta x} [\eta_i^k - \eta_{i-1}^k] + \frac{gn^2 |Q^k| Q^k}{R_i^{4/3} A_i^k} = \Delta H \quad (3)$$

$$\eta_i^k = \eta_{i-1}^k + \alpha \Delta H \quad (4)$$



(a)1999年8月洪水



(b)2001年9月洪水

図-9 既往洪水のピーク水位の再現計算の結果

で示される弱緩和法を適用することにした。ただし、緩和係数 $\alpha = 0.5$ 、収束条件を $\eta_i^k - \eta_{i-1}^k \leq \epsilon$ ($\epsilon = 1.0 \times 10^{-5}$) として解いた。

(2) 境界条件

河道の水位計算を実施するにあたり下流端水位と流量が必要となるが、この両者は観測記録をもとに与えることにした。また、Manning の粗度係数に関しては、全区間において計画粗度係数である $n = 0.030$ を与えることにした。

(3) 計算結果

再現計算の対象とする洪水は、河岸洪水痕跡が記録されていること、および出水のたびに河道形状は絶えず変化することを勘案して、比較的最近に発生した 1999 年 8 月、および 2001 年 9 月洪水の 2 つとすることにした。

a) 200m 間隔断面を用いた計算結果に関する考察

前述の 2 洪水のピーク水位の再現計算の結果および洪水痕跡^{4),5)}を図-9 (a), (b) に示す。本図の上段が流積、下段が水位を表しており、上下段図ともに細実線は

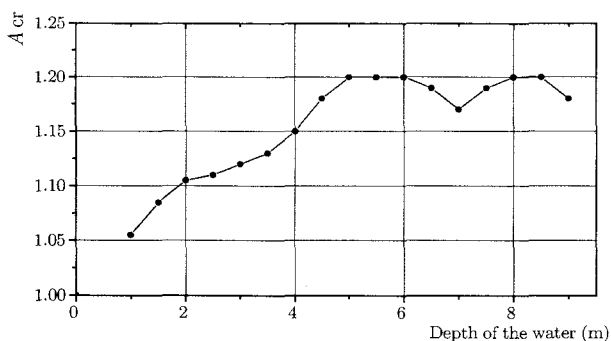


図-10 流積に関する補正曲線

定期測量成果の河道形状、一点鎖線はレーザースキャナデータから生成した 200m 間隔で作成した河道形状である。いずれの洪水に関してもレーザースキャナデータから生成した横断面に基づき実施した水位計算は定期測量成果に基づくそれに比べて大きめに算出される結果となった。これは、レーザースキャナデータから生成した横断面では水面部および植生部などが原因となり断面積が定期測量のそれに比べて全体的に若干過小となる傾向となるためであると考えられる。

b) 10m 間隔断面を用いた計算結果に関する考察

10m 間隔の横断面を用いて実施した水位計算の結果は、図-9 (a), (b) 中の実線で示したとおりである。前項 a) に示した理由と前述した河道形状は短い区間さえ複雑に変化していることが重なり、10m 間隔断面による水位計算の結果は、定期測量および洪水痕跡と比較して過大となった。

図-9 (a), (b) のそれぞれの上段に示すように、10m 間隔で横断面を取得すると 200m 間隔の間で単純な増加あるいは減少傾向を示すのではなく、複雑に増減を繰り返していることが分かる。これは利用目的によっては定期測量の断面間隔では不十分であることを示唆する結果であるといえる。また、レーザースキャナデータから生成した河道形状の情報を補正あるいは補完する方法を考える必要があると思われる。

(4) 生成した断面形状の補正法

これまでに述べたとおり、レーザースキャナデータから生成した横断面に基づき実施した水位計算は過大となる傾向にある。

そこで、まず、生成した横断面と定期測量の横断面のそれぞれに対して水深流積曲線を求めたところ、水深の増加とともに両者の流積の差が大きくなる関係にあることが分かった。つぎに、同一水深ごとに両者の比を全断面を対象に求めるとともにその平均値を算出したところ、図-10 に示すような関係が得られた。図中の A_{cr} は水深毎に $A_{cr}(h) = \left(\sum_{i=1}^{N_s} A_i^*(h) / \sum_{i=1}^{N_s} A_i(h) \right) / N_s$ として求め、それぞれ A_i^* は生成した横断面の流積、 A_i は定期測量の横断面の流積、 N_s は対象区間内における

横断面の数である。

これを流積に関する補正曲線として水位計算を実施したところ、図-9 (a), (b) の点線で示すように痕跡値に近づく結果となった。

本研究は定期測量成果が存在しない中小河川において河道形状の情報を生成することを目的としているため、ここで示した補正方法は実用的な方法とはいえない。しかし、いずれにしてもレーザースキャナデータから生成した横断面は過小評価される傾向にあり、この方法はそれを補正することで水位計算により適した河道形状の情報に成りうることを示唆したものである。

5. おわりに

本研究は前報からさらに踏み込み、中小河川の河道形状の推定だけに留まらず、細分間隔での横断面の生成や複断面の分割境界の自動抽出について試みた。これらの情報を生成する場合、数値上だけからでは誤った判断をする可能性が大きいと、レーザースキャナにより取得した標高値だけでなく都市計画図などの細密な地形図や航空写真などを併用した上で情報の生成を行うべきである。また、レーザースキャナデータから生成した河道の横断面形状の情報は、その断面積が水深が深い場合では定期縦横断のそれと比べて 20% 程度過小評価される傾向にあった。定期測量成果が存在しない河川において河道形状の情報を生成するという目的に適した補正方法でないものの、それを補正することで水位計算に適した河道形状の情報と成りうることを示した。

この他、河川の規模にかかわらず複断面の分割境界を自動的に抽出する有力な手法についても提案した。

謝辞： 本研究を実施するにあたり、関東地方整備局京浜工事事務所から多数の貴重な資料を快く提供して頂いた。また、河道形状の情報を作成するにあたり、(株)東京建設コンサルタント技術第 3 部の諸氏には多大なる尽力を頂いた。ここに記して各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 川本一喜, 館健一郎, 武富一秀, 金木誠; レーザースキャナデータを用いた中小河川河道モデルの作成手法に関する研究, 河川技術論文集, 第 8 巻, pp.533-538, 2002.
- 2) <http://www.ramse3d.com/index1.html>
- 3) たとえば, 土木学会; 水理公式集 [平成 11 年度版], 土木学会, 713pp, 1999.
- 4) 建設省関東地方建設局京浜工事事務所; 平成 11 年度鶴見川上流流量観測業務, 1999.
- 5) 国土交通省関東地方整備局京浜工事事務所; 平成 13 年度鶴見川上流流量観測業務, 2001.

(2003. 4. 11 受付)