

洪水流航空写真解析法による 洪水流量測定に関する研究

MEASUREMENT OF FLOOD FLOW DISCHARGE USING PICTURE PROCESSING OF AERIAL PHOTOGRAPHS

澤田 学¹・宇民 正²・木下 良作³
Manabu SAWADA, Tadashi UTAMI and Ryosaku KINOSHITA

¹学生員 和歌山大学大学院 システム工学研究科 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

²正会員 工博 和歌山大学教授 システム工学部 (〒640-8510 和歌山市栄谷930)

³正会員 工博 元自由学園 (〒160-0001 東京都杉並区阿佐ヶ谷北5-30-11)

Aerial photographs of 1998 flood flow in the Tone River were analyzed by cross-correlation method to obtain velocity vectors over the flow surface. Characteristic features of flow downstream of bridge piers were examined by using the data. It was pointed out the discharge measurement by float estimates larger discharge than real one.

Features of velocity distribution and of the cross section profile of river bed were examined to get the guide-line on choosing the appropriate cross-section for discharge measurement.

Key Words : flood flow discharge, aerial photographs, discharge measurement

1. はじめに

洪水防御計画の策定, 堤防の設計等の河川における基本的な計画は流量を基本としているため, 流量の正確な測定が重要となる. 洪水時の流量観測は, 一般に橋梁から浮子を投下する浮子測量法により実施されることが多い. しかし, 橋脚の下流部では橋脚の後流のため流速分布は複雑である.

木下¹⁾は, RCボートを用いた新しい手法を導入して洪水時に流量観測を行い, 浮子測量法による流量観測では実測値が過大となることを示した. また, 洪水流量の測定においては最適な河道断面の選定が重要であり, それは水流蛇行の転向点であることを指摘した.

本研究では, 洪水流航空写真の画像解析法を用いて, 橋脚後流の実態について検討し, 浮子測量法に橋脚の後流がどの程度影響しているのかを検討した. また, 利根川下流部の河道蛇行部(39km地点~42km地点)における横断面形状とその断面における表面流速分布の特性について考察し, 上記の木下の指摘を検討した.

2. 実測洪水流量への橋脚の影響

(1) 解析方法

1998年9月17日における利根川の洪水時の航空写真がジフィルムを用いて解析を行った. 解析には約6.5秒間隔で撮影された2枚の航空写真を1組として利用した. 小見川大橋における航空写真を一例として写真-1に示す. 橋脚後流域では, 河床あるいはその近傍を流れる土砂が巻き上げられ, 長く続く後流域が可視化されている. これらの航空写真画像を最初に粗いマッチングを行い, 次第に細かいマッチングに移る多段階相互関係法^{2), 3)}を用いて解析を行った. この解析から洪水流表面における流速ベクトルの面的分布を得, その流速ベクトルから絶対流速, 渦度, 発散の値, ならびに流線のパターンを計算し, 図化した.

浮子測量法による流量の算出では, 「建設省河川砂防技術基準(案)」⁴⁾ (以下「基準」と略記する)に示された方法に準拠して浮子測量法を実施したとし, その時の洪水流況は航空写真解析法から算出したものと想定した. 検討は, 利根川27km(小見川大橋下流約150m)地点, 40km(水郷大橋下流約300m)地点, 61km(長豊橋下流約150m)地点の横断測線について行った. 洪水時における浮子測量法を行う際の流速測線数は, 「基準」では水面幅により決まっている. 流量検討地点における水面幅と計算に用いた流速測線数を表-1に示す.

流速測線の位置は、水面幅を流速測線の数で等分割し、分割区間の中央点とした。この中央位置における航空写真解析法から求めた流速を浮子で測定した流速であると仮定し、流量の算出を行った。また、本計算においては、平均流速と表面流速との比（更正係数）については、浮子測量法を仮定した場合も、航空写真解析による詳細計算についても、「基準」における「表面浮子」に対する値である0.85を用いることとした。

(2) 橋脚が洪水流に及ぼす影響

a) 小見川大橋の場合

写真-1は、小見川大橋周辺の航空写真である。写真中の矩形は以下に示す図-1から図-3の解析範囲を示している。

小見川大橋下流の絶対流速コンター図を図-1に示す。本図から、橋脚の影響により流速の遅くなった低速域が下流に長く続いていることがわかる。また、橋脚の後流の影響は、特に渦度分布、発散分布に顕著に表れるので、小見川大橋下流の渦度分布を図-2に、発散分布を図-3に示した。

渦度分布図から正の渦度（左回転）と負の渦度（右回転）が対を成して橋脚下流に伸びており、このような渦度の対は橋の下流約800m～1000m付近まで及んでいることがわかる。

発散分布図からは図-1の低速域、すなわち橋脚の後流域と非常に強い発散が正の値（上昇流の起こっている領域）が一致し、橋の下流300m付近にまで及んでいる。橋より下流400m～1300mでは、図-1の橋脚後流域と発散の正の領域がほぼ一致しており、その領域に並行して発散の負領域が存在する。このような発散の分布形状は、河床の局所的な高まりを流れが横切る時に生じるものである。すなわち、橋脚後流域で巻き上げられた土砂が橋脚の400m下流部で堆積し始める。その堆積による微高地形が細長く続いているものと考えられる。

b) 長豊橋の場合

長豊橋の場合、橋脚の影響による流速の低速域は約25mの幅をもち、橋の下流約600mに及ぶ。また、発散分布については、発散の正の値、つまり上昇流の領域が橋の下流約600mに及んでおり、絶対流速コンター図の低流速域と一致する。また、流線の図、渦度分布図より、長豊橋下流において、右岸の低水路と高水敷の間に大規模な渦が発生していることがわかる。そのため、長豊橋下流域は、非常に複雑な流れとなっており、洪水時における浮子による流量観測が困難であることを示している。

c) 水郷大橋の場合

水郷大橋の場合、河道蛇行の影響により流れは、右岸に偏流している。橋脚の影響による低流速域が明瞭であるのは1箇所であり、その低流速域は約17mの幅を

もち、橋の下流500mに及んでいる。しかし、はっきりとした橋脚の影響はみられない。また、渦度分布については、橋脚の影響による正と負の渦度の対が約500m下流まで及んでいる。

(3) 橋脚が洪水時流量観測に与える影響

航空写真解析法を用いて得られる各橋下流の横断流速分布資料に基づき、流量を正確に算出した場合と浮子測量法を用いて流量観測を行ったと想定した場合の流量計算結果を表-1に示し、比較検討する。

a) 小見川大橋の場合

小見川大橋下流の横断測線（27km地点）における流速分布を図-4に示す。本図で、横断測線における航空写真解析から得られた表面流速の分布を実線で表示している。また、浮子の投下位置とそこで得られる流速を矢印で表示している。小見川大橋の橋脚数は5ヶ所あるが、そのうち3ヶ所で橋脚の影響による流速の落ち込みが明瞭である。

また、流量の算出結果表より小見川大橋の場合、浮子測量法を用いたと仮定した場合と航空写真解析法を適用した場合との計算上の流量の差は、 $188\text{m}^3/\text{s}$ となり、全流量の約4%を占めている。

b) 長豊橋の場合

長豊橋下流の横断測線（61km地点）における流速分布を図-5に示す。この橋の場合、橋脚の後流の影響により流速の落ち込みが明確な地点は2箇所ある。また、浮子測量法を用いたと仮定した場合と航空写真解析法を適用した場合による流量の差は $238\text{m}^3/\text{s}$ となり、全流量の約3.5%を占めている。

c) 水郷大橋の場合

水郷大橋下流の横断測線（40km地点）における流速分布を図-6に示す。水郷大橋では、他の2つの橋の場合とは異なり、橋脚後流による低流速域がはっきり出ていないので、浮子測量法を用いたと仮定した場合と航空写真解析法を適用した場合による流量の差はほとんどない。

d) 考察

浮子測量法では、浮子により数本の流速測線上における流速の測定を行う。その際、浮子により測定される流速を隣の測線との中央点までの平均流速とするため、橋脚後流により流速の局所的低下がある場合は、それが評価されない結果となる。一方、航空写真画像解析法による場合は、面的な表面流速分布が計算できるので、橋脚後流域における表面流速も正確に把握することが可能である。そのため、浮子測量法を仮定して算出した流量は、航空写真解析により算出した流量より過大評価される。

ただし、ここでは、測線における測線に直角方向の表面流速を用いて検討したが、実際の浮子測量法においては、浮子を50m以上流下させることにより流速を

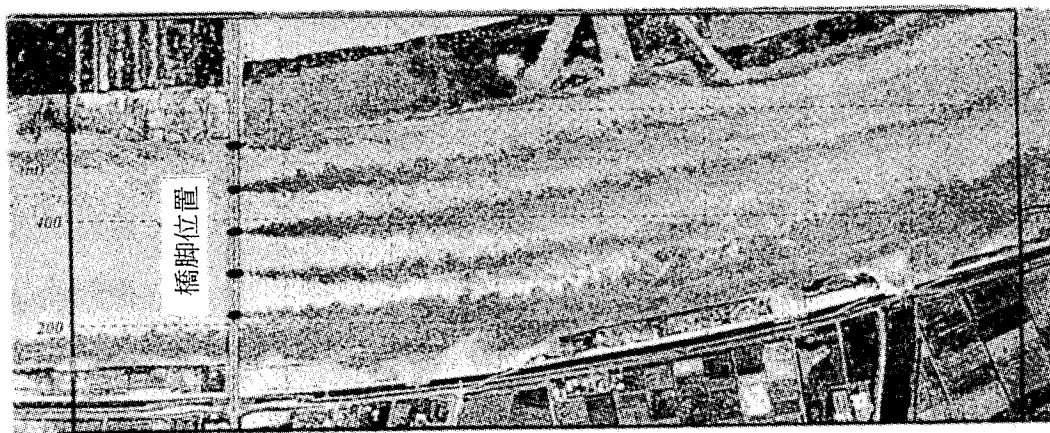


写真-1 小見川大橋下流の流況

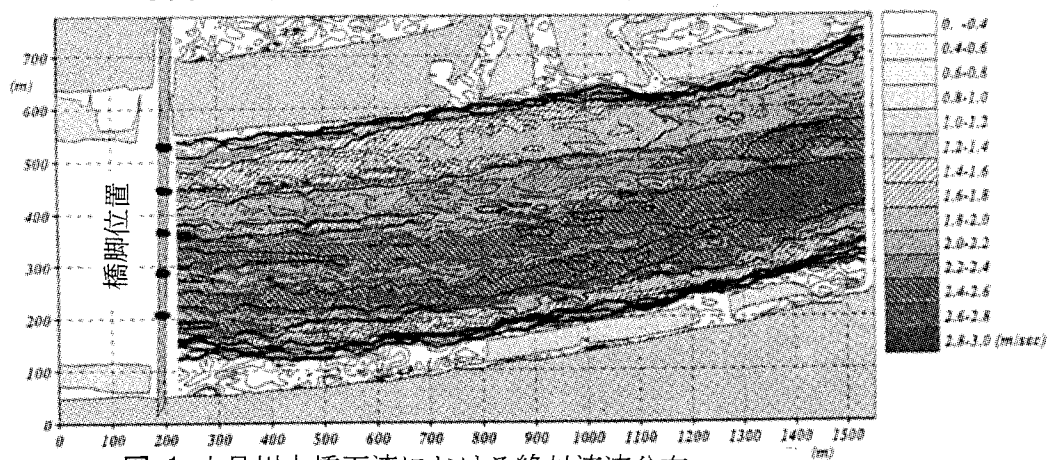


図-1 小見川大橋下流における絶対流速分布

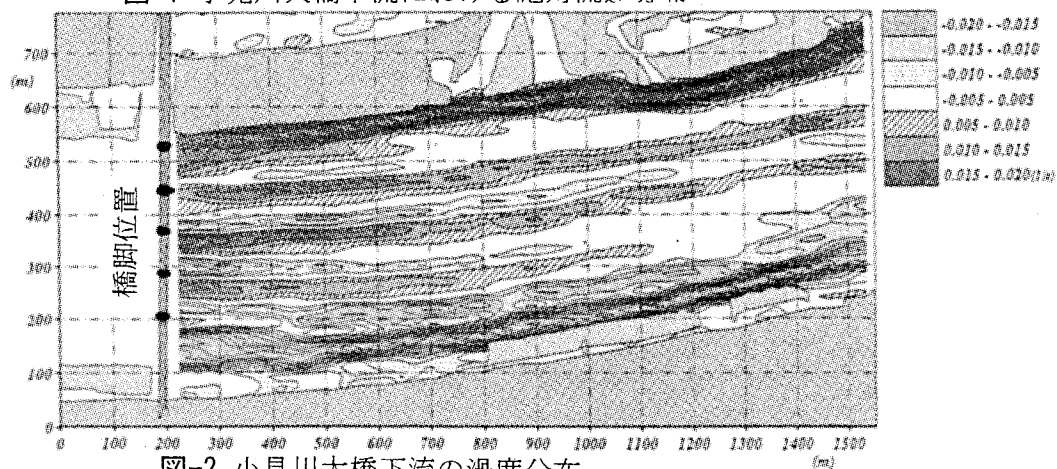


図-2 小見川大橋下流の渦度分布

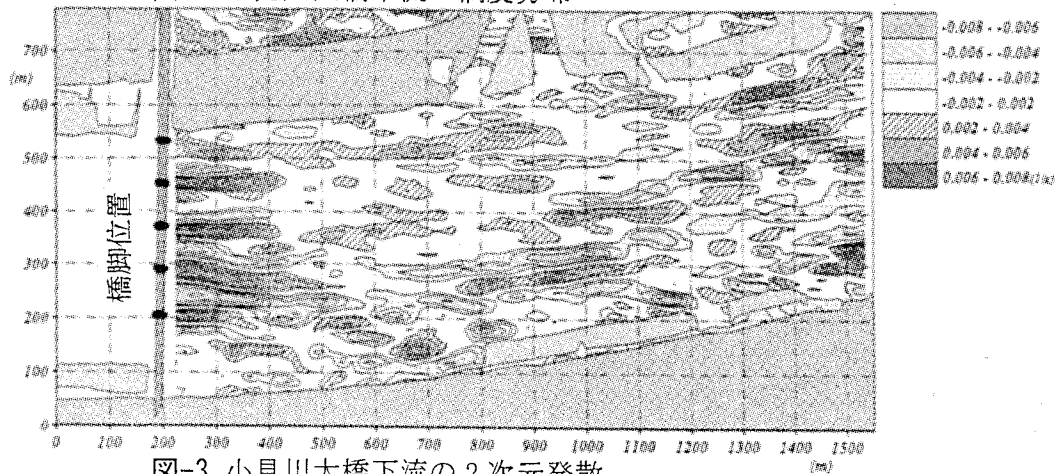


図-3 小見川大橋下流の2次元発散

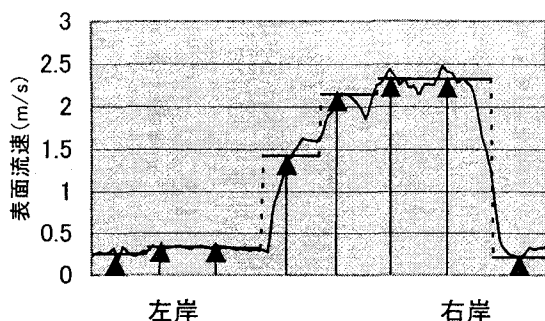


図-4小見川大橋下流の流速横断分布

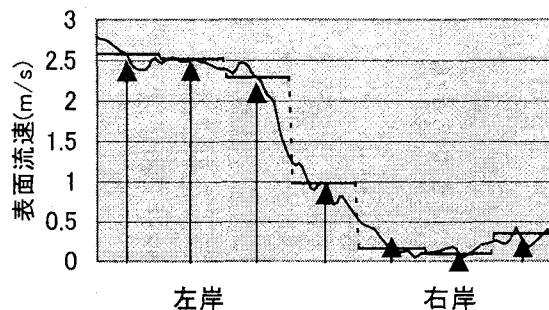


図-5長豊橋下流の流速の横断分布

表-1 測定流量の比較

	小見川大橋	長豊橋	水郷大橋
横断測線位置	27km地点	61km地点	40km地点
水面幅 (m)	817	488	657
流速測線数	8	7	7
浮子測法による流量 (m^3/s)	4980	7230	5700
航空写真解析 による流量 (m^3/s)	4792	6991	5760
2つの測法間の誤差 (m^3/s)	188	239	-60
誤差の占める割合 (%)	4	3.5	-1

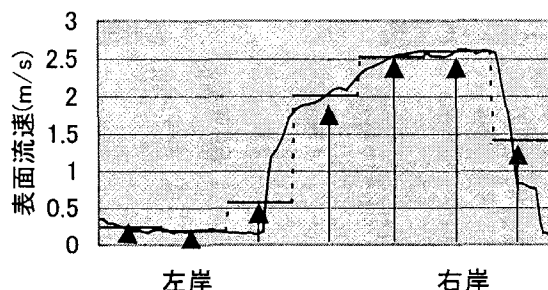


図-6 水郷大橋下流の流速横断分布

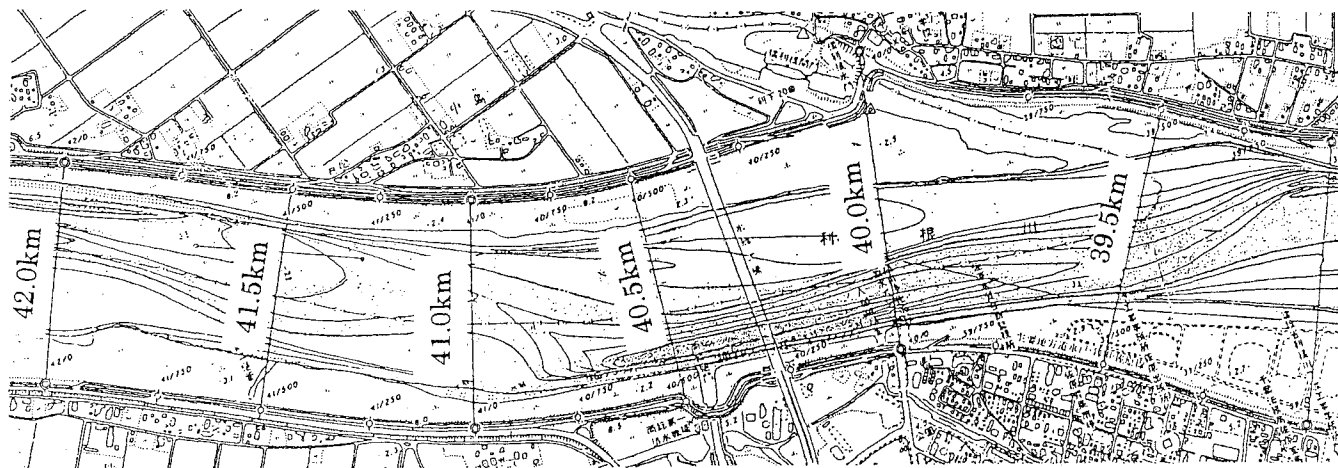


図-7 利根川下流の39km地点～42km地点の間の河道蛇行部の河床コンター図

得ているので、ここで求めた流速とは若干異なる。したがって、上に挙げた誤差率は、普遍的なものではない。また、航空写真の画像解析から得られた流速は、ある一瞬の表面流速であるため、流量の経時変化の把握はできない。しかし、浮子による流量測定資料の特性を分析する上で有用であろう。

3. 流量測定時における最適断面の検討

木下は洪水流量の測定においては最適な河道断面の選定が重要であり、それは水流蛇行の転向点であるこ

とを指摘した。本章では、この指摘に関連して、利根川下流の39km地点～42km地点の間の河道蛇行部を例にとって水流蛇行の転向点の特性を数値的に評価することを試みた。この区間の河床コンター図を図-7に示す。このコンターは、500m間隔の横断面図から内挿して描かれたものであり、本図から41km断面近傍が蛇行転向点であることは明瞭であるが、本節では横断面の形状特性を数値的に評価することにより、そのことを数値に基づいて機械的に判断できるようにした。

(1) 横断面形状特性の評価

図-8には上記39km～42km区間の500m毎の横断面形状を実線で示す。本図からこの区間で低水路が大きく蛇行しており、40.0km地点で低水路は右岸側堤防の法尻に迫っていることがわかる。ここでは低水路形状に注目し、その形状特性を以下のように表現した。すなわち、当該区間では高水敷の高さは2mを若干上回る標高をもっているため、それより低位の断面部分が低水路と見なされるが、高水敷の法肩が判別しにくいので、ここでは便宜的に標高0mより低位にある断面部分をとくに低水路と表記し、その形状について検討することにした。

まず、各横断面における標高0m以下の低水路断面形状の基準断面を以下のように決め、それを図中に破線で記入した。すなわち、①標高0m位置で原断面（測量された現実の断面）と同じ幅を持つ。②利根川のこの区間で最も普遍的な低水路の裏面勾配と考えられる10:3を法面勾配とする。③その標高0m以下の断面積が原断面の低水路断面積と等しい。④等脚台形断面。

このようにして決めた基準断面からの原断面のずれを以下のように評価した。

低水路断面積；低水路の原断面と基準断面との差の面積。

モーメント；低水路の原断面と基準断面との差の面積が、低水路の幅の中心に対して有するモーメント。

モーメントの腕；上記モーメントを低水路の面積で除した値。ここではこの腕の長さをさらに低水路の水面幅で割って無次元表示することとする。

断面形状の標準偏差；低水路の原断面河床高さと基準断面の河床高さの差の標準偏差。

このような諸量を導入すると、低水路の片岸に深掘れがある場合、モーメントの値は大きくなる、右岸に深掘れがあればモーメントは正の、左岸にあれば負の大きな値をとる。また、低水路の底面の凹凸が激しい場合には上記標準偏差は大きくなる。したがって、蛇行流の転向点では低水路の断面形状はその中心軸に関して対象であるから、モーメントは最小に、また低水路河床は扁平となるはずであるから標準偏差も最小になることが期待される。

(2) 横断面内流速分布特性の評価

当該解析区間の先述と同じ1998年9月17日の洪水流航写真の解析から得られた流速分布の内、低水路部分における分布を同じ図-8中に点線で示した。流速に関する座標は各図の右側に記さ

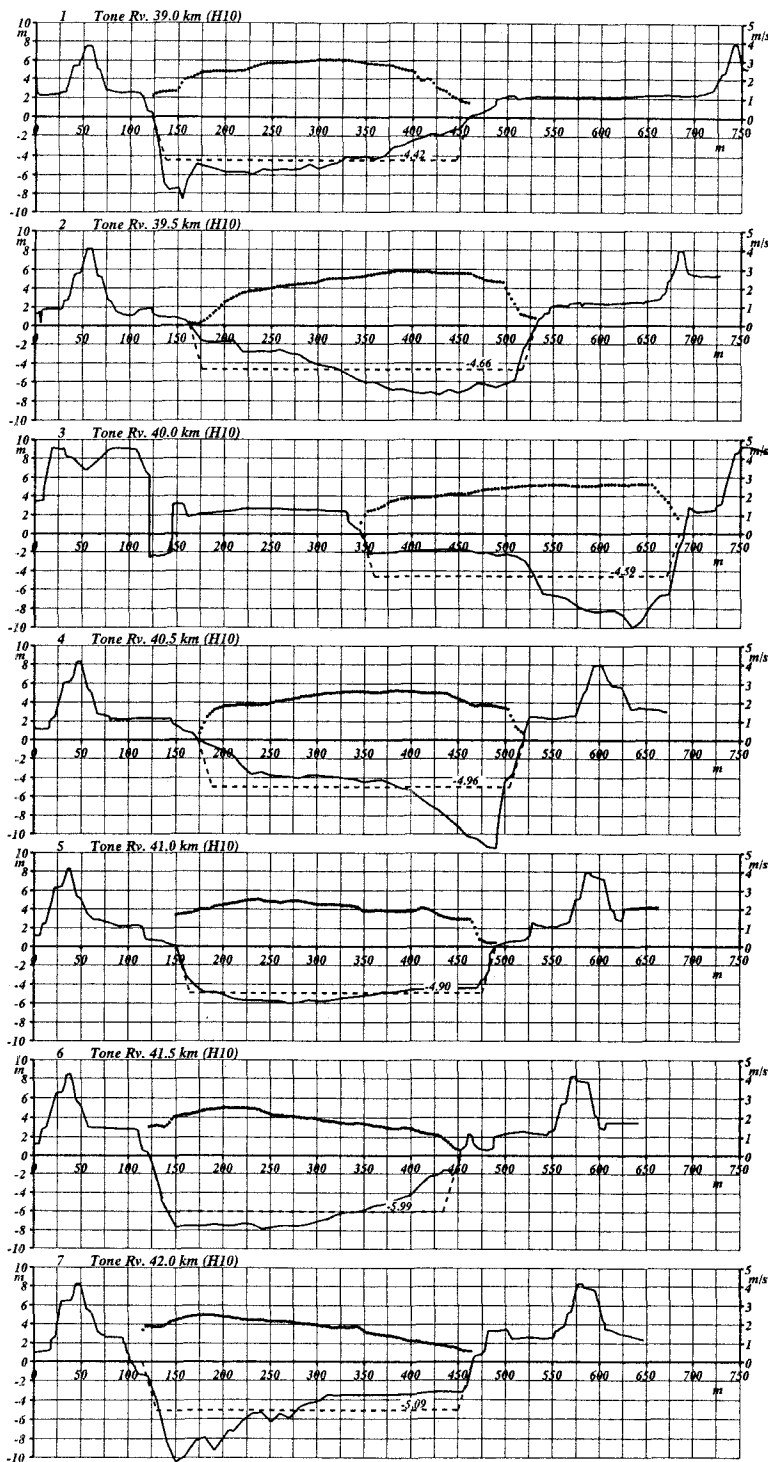


図-8 横断形状特性の評価

表-2 水流蛇行の転向点に関する特性値

横断面位置	42.0km	41.5km	41.0km	40.5km	40.0km	39.5km	39.0km
低水路断面積(m ²)	639.6	501.6	230.6	735.3	918	676	447.3
断面形標準偏差(m)	2.17	1.86	0.96	2.76	2.88	2.02	1.65
モーメント (m ³)	-56590	-37923	-9095	70723	80359	56319	-44932
モーメントの腕(ND)	-0.095	-0.061	-0.017	0.124	0.152	0.092	-0.094
流速の標準偏差(m/sec)	0.508	0.412	0.374	0.334	0.344	0.64	0.547

れている。低水路内流速分布はいずれも低水路河岸近くで急激に低下するので、上記基準断面の内、底幅の部分の流速分布についてその標準偏差を計算した。蛇行流の転向点では流速分布が扁平化するので標準偏差は小さくなることが期待される。

(3) 解析結果

解析の結果得られた諸量を表-2に示す。この表から、41km断面地点で明らかにモーメントは最小となり、それより上流ではモーメントは負の値、それより下流では正の値をとる。断面標準偏差も同じ41km断面で最小となっている。ただ流速の標準偏差は当該断面より500m下流の40.5km断面で最小になっており、流速分布についての転向点は40.5km断面と41km断面との中間にあることが伺われる。また、断面形状に関する蛇行転向点は水流蛇行の転向点よりわずかに上流に位置していることも同時に伺われる。

以上の検討から、利根川41km地点はほぼ水流蛇行転向点に相当し、河床横断面形状が平坦で偏りの少ないこと、かつそこにおける流速分布は、際立った偏りがなく、一様分布していることがわかる。よって、蛇行転向点を河道断面として選定し、浮子による流量測定を実施すれば、より精度の高い流量測定が可能となることが示された。

4. おわりに

洪水流航空写真の画像解析によって得られた流速分布を基にして、橋脚下流の水理現象について検討し、また現在通常に行われている浮子による流量観測では流量が過大評価されるおそれがあることを示した。ま

た、流量観測に最適な蛇行流の転向点に関する特性を数量的に検討した。

最後に流量観測法について付言すると、長年にわたり、統一された規格の下で浮子測量法による観測データが蓄積されてきた意義は強調されよう。以下は木下¹⁾からの引用である。「今後とも現行マニュアルを厳守することが大事であって、ただその観測地点の特性値を求め、過去、現在、未来の補正值さえつかめばよく、そのためにボート方式の比較観測が有効ではないかと考える。」

謝辞：本研究を行うにあたり、建設省関東地方建設局利根川下流工事事務所に貴重な洪水流航空写真はじめ貴重な資料の提供を受けた。また水資源開発公団からも水位に関する資料の提供を受けた。深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 木下良作：洪水流観測の一つの試みとその考察，河川環境管理財団名古屋事務所，2000.
- 2) 宇民 正・上野 鉄男：写真画像処理による洪水流解析，土木学会論文集，第503号／II-29，pp.1-17，1994
- 3) 木下 良作・宇民 正・上野 鉄男：洪水流航空写真の画像解析，写真測量とリモートセンシング，Vol.29，No.6，1990，pp.4-17
- 4) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：改定新版 建設省 河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，山海堂，pp.35-45

(2000.10.2受付)