

涸沼川における洪水流の特性

Characteristics of Flood Flow in Hinuma River

建設省土木研究所 福岡捷二 高橋晃 ○藤田光一 渡辺明英 平林桂 坂野章 森田克史
加賀谷均 林正男 長谷川賢市 野堀均 荒木智三 小谷裕司

1. はじめに

洪水流の特性を把握することは、河道計画に直接役立つ水位・流量の予測手法を確立する上で、また河床変動、土砂輸送の営力を精度良く求める上で非常に重要であり、従来より河道の洪水流を再現する種々の手法が開発され利用されてきた。しかし、洪水流の実態把握は近年あまり進んでおらず、計算手法が高度になっている反面、計算の前提や基本式が必ずしも洪水流の実態を反映していない場合も見られる。本研究は、茨城県を流下する涸沼(ひぬま)川を対象に詳細な洪水流観測及び河道状態の調査を行うことにより、洪水流の特性を明らかにするとともに洪水流と河道状態との関係を調べ、従来の洪水流計算法が持っている問題点とその解決法を見出すことを目的としたものである。本研究では特に、低水路の抵抗特性に着目し、現地観測と模型実験の結果とを合わせて、抵抗を支配する要因、一洪水中に抵抗が大きく変化する原因及び抵抗特性を表現する方法について検討を行った。

2. 観測の概要

観測対象としたのは、涸沼川28.1kmを中心とした長さ約700mの区間である。この区間は、図1、2に示すように、全巾約100m、低水路巾約25mの複断面形状をしており、平均河床勾配は約1/900、低水路河床材料はれき混じり砂となっている。低水路河岸に護岸はなく篠竹・柳等が密生し、また高水敷上にも竹林・桑畑からなる樹木群が密生している場所がある。この観測区間を対象として、1洪水中の種々の水位の時に次のような詳細な洪水流観測を行った¹⁾。〔・水位(100mピッチ)・流量・1断面内の流速分布・表面流速分布(航空写真撮影による)・洪水中の河床高変動(音響測深器による)〕また、洪水発生の前後に、横断測

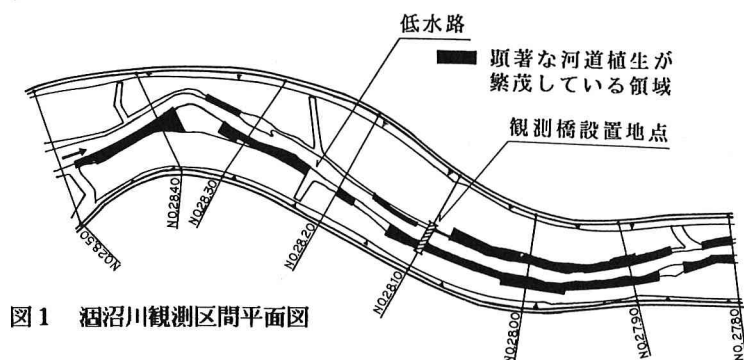


図1 涸沼川観測区間平面図

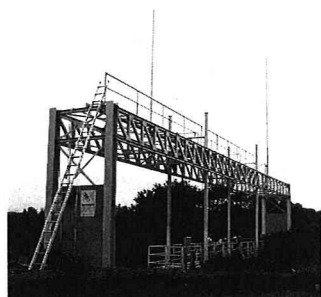


写真1 涸沼川洪水観測施設
(28.1km地点)

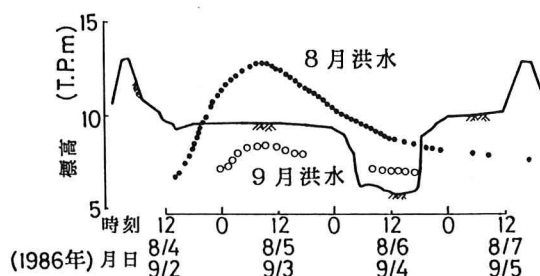


図2 28.1km地点横断面図及び水位時間変化図

量、航空写真測量による河道内植生の繁茂状況(地盤からの植生の高さ)の把握²⁾を行った。本論文では、現在までに観測された最も大きな2つの洪水、すなわち1986年8月に起こった台風10号による洪水(以後8月洪水と呼ぶ)と同年9月に起こった台風15号による洪水(以後9月洪水と呼ぶ)の観測結果をもとに種々の解析を行った結

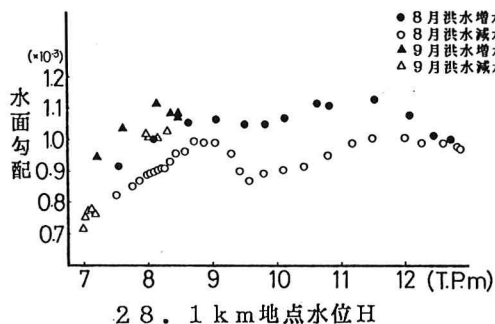


図3 観測区間の平均水面勾配と28.1km地点水位との関係

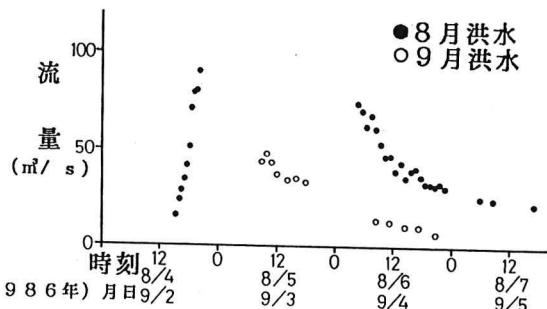


図4 流量ハイドログラフ

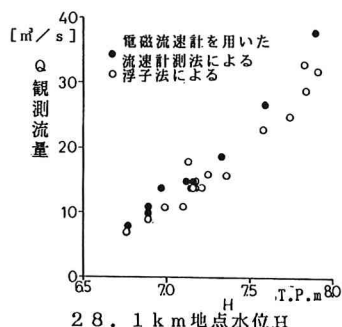


図5 浮子法と流速計測法による流量の比較

果を述べる。なお、写真1は、観測区間ほぼ中央に設けられた流量・流速・洪水中の河床高などを測定するための洪水観測施設であり、この施設に代表される観測区間の諸施設については文献(1)を参照されたい。

3. 洪水流特性

3.1 水位と流量

図2に、代表的な観測区間中央28.1km地点の水位時間変化を横断図に重ねて示す。8月洪水は堤防満杯規模、9月洪水は低水路満杯規模の洪水である。図3は、観測区間上流端(28.5km)と下流端(27.82km)における水位の差から得られる観測区間の平均的な水面勾配と水位(28.1km地点)との

関係を示したものである。図より、水面勾配は、増水期の方が減水期よりも大きく、また、水位によって複雑に変化していることがわかる。図4は、流量ハイドログラフであり、28.1km地点において浮子法により観測されたものである。水位が高水敷以上の場合は流量は欠測している。これは、当時の観測施設が高水位に対し十分な機能を持っていなかったためである。実河川における流量観測については、しばしばその精度が問題となる。そこで、これら2洪水とは別の小洪水を利用して、28.1km地点低水路横断面内5測線の2割、8割水深における流速を電磁流速計により測定した結果から得られた流速計測法³⁾による流量と、上記と全く同じ浮子法による流量とを、減水期にある種々の水位について比較した。結果を図5に示す。図より、流速計測法による流量が浮子法よりもやや大きな傾向があるものの両者の差は

大きいものではなく、図4に示した流量ハイドログラフは、少なくとも流速計測法と同等の精度を有していると判断できる。

3.2 低水路の抵抗特性

洪水が低水路だけを流下している時の流量観測値と水位縦断変化を用いて、低水路のマニングの粗度係数を求めた。(以後粗度係数と呼ぶ) 粗度係数の算出にあたっては、全区間の粗度係数を一定と仮定し、下流端水位測定点の実測水位を出発水位として不等流計算を行い、観測区間の水位縦断の実測値と計算値が平均的によく合うような粗度係数を求めるという一般的な方法を用いた。この際、2種類の不等流計算法を用いた。1つは、9月洪水直後の河床高と高水敷地盤高についての横断測量結果をそのまま用いて計算するとい通常の方法であり、も

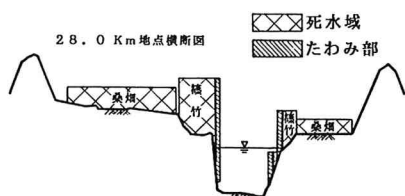


図6 河岸植生の繁茂状況及び死水域の設定法



写真2 河岸植生の状況(28.0km)

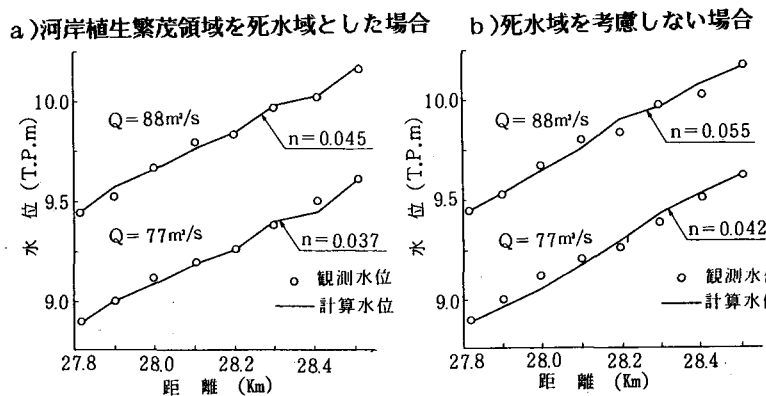


図7 水位縦断変化の観測値と計算値との比較

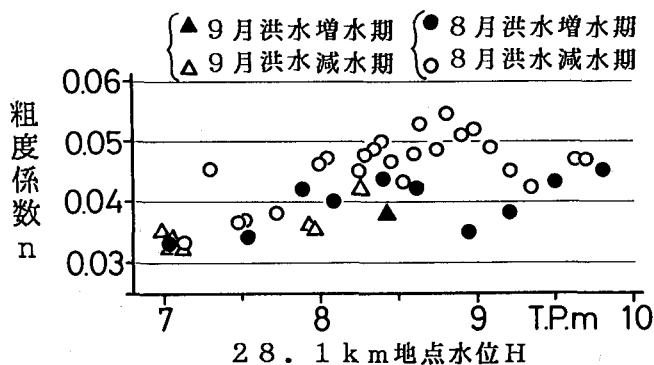


図8 観測区間平均の低水路粗度係数と28.1km地点水位との関係
(河岸植生による死水域を考慮して求めたもの)

期の流量 $Q = 77 \text{ m}^3/\text{s}$ 時及び $88 \text{ m}^3/\text{s}$ 時における水位縦断変化の実測値と最適粗度係数値を与えた下での不等流計算値とを図7に示す。図中のa)が河岸植生を考慮し死水域とした場合、b)は植生を考慮しない場合である。なお、死水域の設定にあたっては、洪水時に植生の先端が下流側にややなびくことを考慮して、非出水時に計測された植生範囲を若干減じるようにして死水域を定めている。(図6参照)。両者を比較すると、死水域を考慮した場合の方が、計算と実測との一致度が高いことがわかる。このことは、河岸植生などによる死水域の規模が本観測区間のようにある程度以上大きい場合には、実際に流下していない部分をも河積として計算することの誤差が無視できないほど大きくなることを示している。したがって、全河積に占める割合がある程度以上大きい河岸植生を対象にして、植生の縦断分布の不均一による水位の凹凸の再現、植生伐採が水位に与える影響の予測、あるいは抵抗特性についての水理的に厳密な議論を行う場合には、河岸植生を死水域とする計算方法を用いなければならないと考えられる。植生繁茂領域は航空写真測量により簡単に把握することができるので²⁾、死水域を考慮した計算を行うことにはそれ程大きな労力を伴わない。一方、死水域を考慮しない通常の方法によって水位縦断の正確な再現計算を行おうとする場合、粗度係数を植生の繁茂状況に応じて細かく変化させなければならず、計算が非常に複雑になる。

以上の考察結果から、植生繁茂領域を死水域とする不等流計算法に基づいて粗度係数を求めた。得られた全区間の平均的な粗度係数と28.1km地点水位との関係を図8に示す。図より、水位が上昇するに伴い粗度係数が上昇し、0.033程度から0.045程度まで変化すること、増水期よりも減水期の方が値が大きく、一洪水中で粗度係数がループを描くことがわかる。また9月洪水減水期の粗度係数は、8月洪水減水期よりも粗度係数が小さくなっている。以上のように、低水路の抵抗は、水深、増水期・減水期の別、洪水によって変化

う1つは、河岸植生繁茂領域を死水域として河積から除外するというものである。後者の方法による計算を行った理由は次の通りである。写真2は、28.0km付近の低水路河岸の植生状況を示したものであり、図6は同じ地点の横断面形と植生の状況を表わしている。図に示される河岸の領域

には、主として直径約1.5cmの篠竹が50~100本/ m^2 の密度で密生している。篠竹は、根元付近を除き葉が全体的に茂り、篠竹の中は水が流れにくく、全体として死水域を形成する様相を呈している。さらに洪水時には多量の浮遊物が篠竹に付着し、一層透過性が減ることになる。こうした状況から考えて、河岸植生内の流速は実質的に0に近いと推定できる。河岸植生を死水域として河積から除外する方法は、以上の考察に基づくものである。

これら2つの方法による不等流計算の適合度を比較するため、8月洪水増水

し、また粗度係数の値自体が8月洪水の減水期において最大0.055近くに達するなど、河床材料から推定される値よりもかなり大きいという特徴を持っている。これらの原因としては、①洪水時の河床形態の変化、②洪水時の河床変動、③低水路法線形、④低水路河岸に繁茂した植生の影響、などが考えられる。このうち②については、洪水前後の河床高には一部を除いて大きな変化がなく、また粗度係数の洪水時の変化が観測区間全体に起こっているのに対して、観測区間の縦断面から見て観測区間全体が一定方向の河床変動を起こすとは考えにくいことから、主な原因ではないと考えられる。また③についても、28.37km付近の急な湾曲部を除けば低水路法線は緩い湾曲部と直線部から成っているの、やはり有力な原因とはなりえない。残りの原因のうち①については従来よりその影響が指摘されてきたが^{3), 4)}、沼沼川低水路においては、④の要因が抵抗特性に与える影響も大きいと予想される。これは、一般的な河川の低水路に比較して水深に対する低水路中の比が小さい上に、死水域を構成する河岸植生繁茂領域外縁部の粗度効果が通常の側岸の粗度効果よりも大きいと予想されるからである。したがって、図8に示した抵抗特性が現われた理由を水理的に説明するためには、上記③、④それぞれの要因の影響度を把握しなければならない。

4. 大型模型実験による沼沼川低水路抵抗特性の把握

4.1 実験の目的

現地観測により得られた低水路抵抗特性の特徴、すなわち水深による粗度係数の変化と増水期と減水期における粗度係数の違いのどこまでが植生の繁茂した河岸によるものであり、どこまでが河床形態の1洪水時の変化に起因するものかを明らかにするため、沼沼川観測区間の1/20無歪縮小模型(写真3参照)を用いた実験を行った。本実験では、水深によって低水路河床の粗度係数が変化しないよう河床を固定床にして行った。

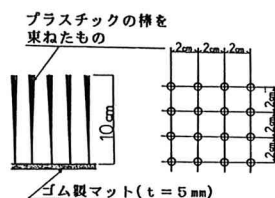
これは、上記2つの要因のうち低水路河床の影響を取り除き、河岸植生の存在だけで現地の抵抗特性をどこまで説明できるかを調べ、その結果から2つの抵抗要因の影響度について考察を行うためである。

4.2 実験の内容

現地の河岸植生は河床よりもやや高い位置から低水路河岸に覆いかぶさるように繁茂しているので、水位が一定以下の場合には、河岸植生が低水路抵抗に与える影響はない。そこで、このような低い水位が現われている時の水面形が模型において再現できるように模型低水路河床の粗度づけを行う。この状態で、種々の水位となるよう通水を行い、水位による抵抗特性の変化を調べる。これにより、模型において河岸に植生がなく、低水路の粗度係数が植生の影響を受けない時の現地の粗度係数に対応している河道における抵抗特性が把握できる。次に、現地踏査と航空写真解析により得られた河岸植生繁茂状況に基づいて、河岸植生模型を現地と同じ繁茂状況になるように模型の低水路河岸に取りつける。この状態において、河岸植生模型がない場合と同



写真3 沼沼川河道模型 (縮尺1/20) 種々の水位となるよう通水を行い、現地の抵抗特性と比較を行う。



28.00km横断面図

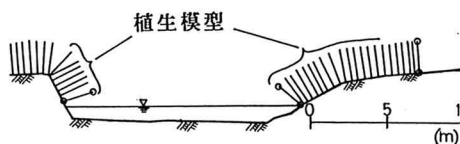


図9 河岸植生模型

以上により、河岸植生模型がある場合とない場合両方についての模型河道における抵抗特性が明かとなり、両者の比較及び実測値との比較を通して河岸植生が抵抗に与える影響について定量的な考察を行うことができる。

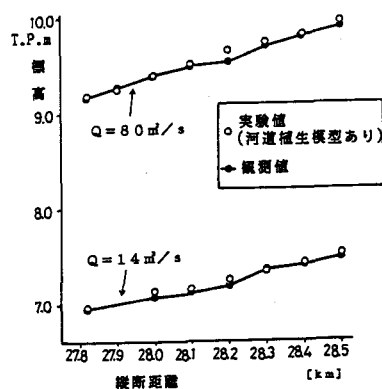


図10 観測水位と模型水位との比較

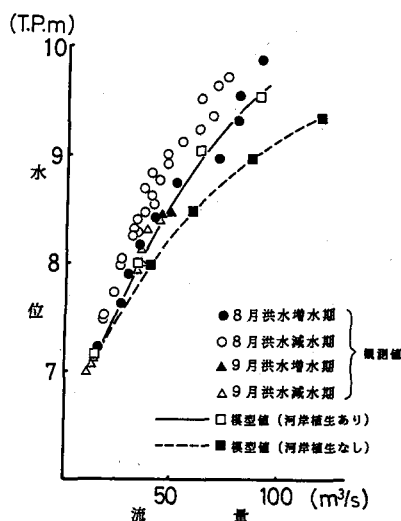


図11 模型河道と現地における28.1km水位～流量関係の比較

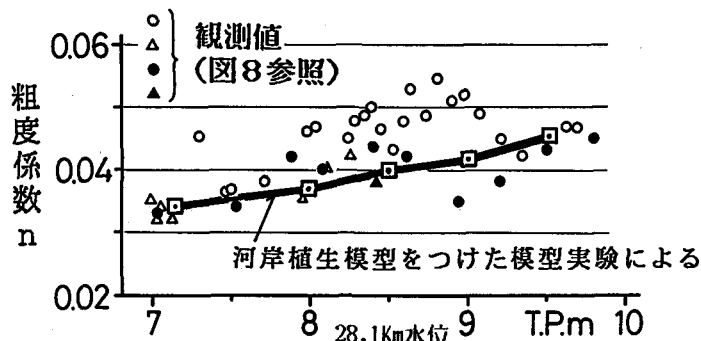


図12 河岸植生模型のある模型河道における粗度係数と水位との関係

実験における模型下流端水位は、下流端において極端な堰上げや低下背水が起きないように設定している。なお、用いた河岸植生模型は、ゴム製マットに縦横2cm間隔でプラスチックでできた細い棒の束（直径約0.6～1.3cm）を植え付けたものであり（図9参照）、透過係数 k 〔植生模型内の見かけの流速 $v=k \cdot (I)^{1/2}$ （ I ：エネルギー勾配）により定義される〕の値は1.3[m/s]という値を持つ。これは、現地スケールにおいて直径1.5cmの円柱が1m²当り32本程度ある状況に相当し、現地の篠竹の諸元に概ね対応している。また、植生模型の高さは10cmであり、これは張り出している篠竹の長さが大体2mを中心に分布していることから定めている。河岸に設置された植生模型は、図9に示す通り、現地と同じように低水路に張り出す形状を持つ。設定領域は、図1に示す河岸植生繁茂領域に一致している。

4.3 模型における現象の再現性

図10に、河岸植生の影響が及ばない流量14m³/sが流れている時の水位について、また河岸植生の影響が十分現れている低水路満杯に近い流量80m³/sが流れている時の水位について、観測値と模型河道値（河岸植生を付けた場合）とを比較したものを示す。以後、模型河道における水量は、すべてフルード相似により現地の値に換算して示す。図中の観測値のうち水位の高い方は8月洪水増水期、低い方は9月洪水の減水期のものである。図より、河岸植生の影響が無い場合にも顕著にある場合にも模型の水位縦断は観測値を良く再現していることがわかる。図11は28.1Km地点における水位をもとにした2つの洪水の $H \sim Q$ 関係の観測値と、上記の模型河道における $H \sim Q$ 関係（河岸植生模型を付けた場合と付けない場合）とを比較したものである。図より、模型河道に河岸植生模型を付けることによって、模型における $H \sim Q$ 関係が観測値、特に8月洪水増水期及び9月洪水の特性を再現するようになることがわかる。図12は、

3.2で述べた方法と同じ河岸植生による死水域を考慮した方法を用いて計算した、河岸植生模型を付けた模型河道における全区間平均の粗度係数と28.1Km地点水位との関係を観測値とともに示したものである。図より、模型河道の粗度係数は8月洪水の増水期及び9月洪水の観測値を良く再現していることがわかる。

4.4 河岸植生が流水に与える影響

模型実験の結果を用いて、河岸植生が流水に与える影響を調べる。図13は、河岸植生が最も顕著に繁茂している27.82～28.1Kmの区間について、河岸植生模型を設置した場合としない場合の平均的な粗度係数を示したものである。河岸植生模型を設置した場合については、河岸植生による死水域を河積から除外して粗度係数を求めている。図より、河岸植生による死水域を考慮しているにもかかわらず、河岸植生がある場合の

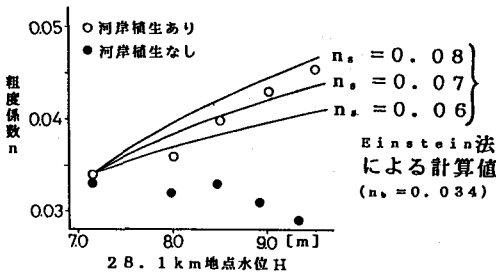


図13 27.82~28.1km区間の平均粗度係数と水位との関係 (模型値)

り、実験値に良く適合する n_s は河床の2倍程度の大きな値を持つことがわかる。以上から、図12に見られた水深の増大に伴う模型河道粗度係数の増大は、河岸植生からなる側岸の流速低減効果が通常の側岸よりも大きいことによりほぼ説明できる。

4.5 沼沼川低水路抵抗の要因についての考察

河岸植生模型を付けた模型の粗度係数が8月洪水増水期及び9月洪水における水深による粗度係数の変化を良く再現するという以上の結果と、河岸植生模型を付ける際に現地の繁茂状況だけを参考にし観測水位に合わせるための取り付け方の大幅な修正などを行っていないことを考え合せると、8月洪水増水期及び9月洪水における水深による粗度係数の変化は、河岸に繁茂した植生の存在により側岸の流速減勢効果が通常の側岸よりも大きくなっていたことに起因すると考えられる。一方、8月洪水減水期における大きな粗度係数値は、河岸植生を考慮した模型実験においても説明できない。したがって、この時の抵抗は、残る要因である河床形態の影響を強く受けていたと推定される。8月洪水はその規模が大きく、その時の減水期の河床は、9月洪水の減水期よりもはるかに大きな掃流力を長時間受けた後の状態であった。さらに8月洪水の直後、低水路河床材料を構成するれき(粒径40mm程度)と砂(粒径2mm程度)のうち特に砂の堆積が観測区間の数箇所顕著に認められ、その部分において河床波が形成されていたことが8月洪水後1ヵ月程の間の平水時および9月洪水減水期に観測されている¹⁾。これらのことも、上記の推定を裏付けている。

5. まとめ

沼沼川における1986年8月および9月洪水を対象にした密度の高い現地観測の結果をもとに低水路の抵抗特性を調べた結果、水深の増大と共に粗度係数が増大すること、規模の大きい8月洪水においては、増水期に比べ減水期の粗度係数が顕著に大きくなることが明かとなった。観測区間について低水路河岸の植生を考慮した大型固定床模型実験を行い、その結果を現地観測データと比較することにより、8月洪水の減水期を除いて、水深による粗度係数の変化が低水路に繁茂した河岸植生の存在により説明できることを示した。8月洪水減水期における大きな粗度係数値は、河岸植生を考慮した模型実験においても説明できず、河床形態の影響によると推定された。今後、河床形態が抵抗に与える影響をさらに明確にしていくためには、洪水中の低水路河床の状況と粒度分布の変化についての現地観測および移動床模型実験による検討が必要である。

[参考文献]

- 1) 福岡捷二ほか：1986年8月洪水による沼沼川の河床変動，第31回水理講演会論文集，1987。
- 2) 福岡捷二・藤田光一・荒木智三：洪水解析精度向上のための航空写真撮影法の改良，第32回水理講演会論文集，1988。
- 3) 建設省河川局監修：建設省河川砂防技術基準（案）調査編，山海堂，1977。
- 4) 古川秀夫編著：流砂の水理学，丸善，1985。