

周期的流量変化に伴う河床波の応答に関する実験

Experiments on Time Response of Sand Waves Due to Periodic Change of Flow Discharge

京都大学防災研究所 正員 澤井健二

1. はじめに

流量の変化に伴って河床形状がどのように変化するかを明かにすることは、洪水時における流水抵抗や河床変動を予測する上で極めて重要な課題であり、従来数多くの研究がなされてきた。^{1)~6)} その結果、河床波の変形にはかなりの時間を要するため、急激な流量変化に対しては時間遅れを伴って応答し、水深-流量関係にループの現われることなどが見いだされている。また、それらの過程を定式化したモデルもいくつか提案されているが、これまでに提案されてきた河床波の変形過程の予測モデルは、主として流量を階段状に変化させた実験において見いだされた特徴を抽出して構成されたものであり、一般的な流量変化に対して適用できるかどうかは疑問である。ことに、流量減少時の砂堆の波長の変化機構や、Lower Regime から Upper Regimeにまたがる場合の河床波の変形機構に対しては、不明の点が多く残されている。これには、そのような条件下における非定常移動床現象の観測の困難さや、実験条件の制御の困難さが、大きな妨げになっていたように思われる。

そこで、本研究は、非定常条件下での河床波の変形過程に関する実験技術の改良を図るとともに、従来なしえなかった、周期的連続的流量変化に伴う河床波の応答特性を実験的に解明しようとするものである。

2. 実験方法

(1) 実験装置

河床波の変形過程に関する基礎研究では、非定常ではあるがほぼ等流条件を満たす場を想定することが多い。その適否は別として、それに即した実験条件を設定するには、上下流端の境界条件の影響を小さくして、できるだけ等流に近い状態を維持する必要がある。それには、水面勾配と河床勾配の制御が必要となる。

河床勾配の制御には、水路勾配そのものを変化させる方法と、洗掘・堆積量を調節する方法とがあるが、両者の間には、水理的に見て大きな差異があるように思われる。ここでは、水路勾配そのものは変化させないものとすれば、下流への流出土砂量に等しい土砂を上流から与える必要がある。これには下流への流出土砂を捕捉・計量し、それと同量の土砂を別の給砂器から供給する方法と、下流へ流出した土砂をそのまま上流へフィードバックする方法とがあるが、水理条件の変化が複雑でかつ長時間にわたる実験では、後者の方法が有効である。本実験に用いた水路は、下流端の水槽がホッパーになっており、サンドポンプを用いて水と土砂をともに循環させる構造になっている。また、移動床部の末端は河床低下を防ぐため床止めを設けている。

水面勾配を制御する方法は、常流の場合と射流の場合とで異なるが、本実験では、常流の場合を対象として、水路下流端に可動堰を設けている。ただし、堰の部分で堆積が生じないよう、堰の底部から砂れきを透過できる構造にし、堰高はステッピングモーターで調節できるようにした。すなわち、水位計を積載した計測台車を約1分ごとに走らせてマイクロコンピュータで平均水面勾配を算出し、それと所期の水面勾配との偏差に比例したパルスをもーターのドライバーに送って、堰高を自動制御している。その比例係数については、最も精度の高い制御ができるよう、試行錯誤的に定めたが、等流状態からの偏りがあまり大きくない場合には、このような方法でかなり速く所定の水面勾配に近づけることができる。

次に流量の制御であるが、流砂を循環させる場合には、バルブの開度を小さくすると、砂れきがバルブの

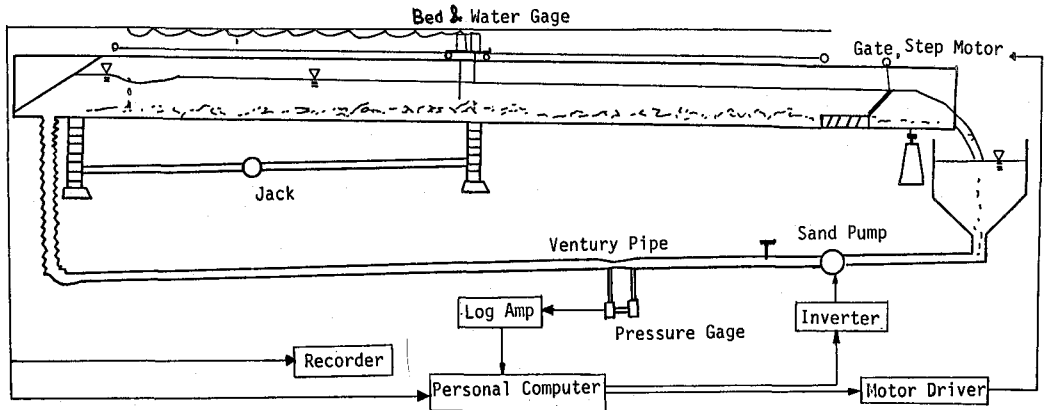


図-1 実験装置

間隙に詰まり、流量が不安定になる恐れがある。そこで、本実験では、バルブの開度は大きめに固定しておき、インバーター（周波数変換器）を用いてポンプの回転数を変化させることによって流量を調節している。ただし、ポンプの回転数と流量との関係は、負荷によって異なるため、帰還水路の流量を連続的に検出しながら、設定流量と絶えず比較し、その偏差をインバーターへの制御信号としてフィードバックさせている。流量の検出にはベンチュリー管と差圧計を用い、差圧計の電圧出力を対数アンプで変換した後、マイクロコンピュータで8ビットの処理を行なっている。流量検出および演算の反復時間間隔は0.5秒で、流量の変化周期が数十秒以上の場合には、少なくとも帰還水路内の流量は2～3秒以内の時間遅れで設定値に合わせることができる。ただし、流量の変化速度が大きい場合には、開水路部分での貯留効果のため、流量の対応が遅れ、等流条件からの逸脱も大きくなることは避けられない。

河床形状の測定には、電気伝導度式サーボ河床計、水面計測には触針式サーボ水位計を用い、それらを積載した台車を約50 cm/sの速度で走行させた。

なお、実験に用いた水路の諸元は、幅50 cm、深さ50 cm、長さ21 mで、下流端の約2 mを除いて移動床とし、中央部10 mの区間を測定区間とした。勾配は電動ジャッキにより約0.001/minの速度で0～1/30の範囲に変化させることができる。流量の制御範囲は、自動の場合は0～40 l/s、手動の場合は0～100 l/sである。図-1に実験装置の構成を示す。

(2) 実験条件

本実験では、流量の周期変化に伴う河床波の応答遅れが顕著に現われることの予想される、波高の大きな砂堆領域を対象として実験条件を設定した。用いた河床材料の粒度分布は図-2に示すとおりで、中央粒径0.77 mmのほぼ均一砂である。勾配は1/500に設定し、流量を20～40 l/sの範囲で連続的かつ周期的に変化させて、河床形状の変化が定常サイクルに達したとみなされる時点で、水路中心線に添う河床形状と水面形状を計測し、平均波高、平均波長、水深の変化を求めた。流量波形は、時間とともに直線的に増加と減少をくり返す二等辺三角形形状のものと正弦波状のもの二種を設定し、周期をそれぞれ約10分、20分、40分、80分、160分の5通り変化させている。また、比較のため、20 l/sから40 l/sまで、2 l/sピッチで十分長時間定常流量を与えた場合の水深および河床形状も、あわせて測定した。各実験ケースにおける初期河床は、直前の実験ケースの最終河床をそのまま用い、敷きならしは行なわなかった。

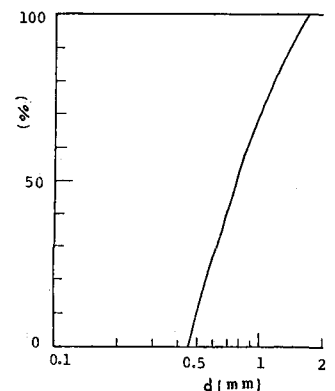


図-2 粒度分布

3. 実験結果

(1) 定常流量の場合

図-3は、定常流量条件下での流量と水深、平均波長、平均波高の関係を示したものである。河床波の波長や波高の定義には若干のあいまいさが伴うが、ここでは2mm程度以上の落差をもつ凹凸を個々の波とみなし、各波の峰から直下流の谷までの比高を個々の波の波高、隣り合う谷の間隔を個々の波の波長と定義している。全体的な傾向としては、流量の増加に伴って各量とも増加しているようであるが、詳細に見ると、かなり不規則な変化をしている。特に波長は、30 l/s未満の範囲で流量の増加に伴って減少しているようにも読み取れる。また、 $Q=22$ l/sの場合には、 $Q=20$ l/sの場合に比べて波長が短く、波高が大きくなっているにもかかわらず、水深がやや小さくなっており、単に河床波の形状だけでなく、抵抗特性もかなり複雑に変化しているようである。もっとも、これらのデータは、各流量に対して、測定台車を10mの区間で1回だけ走らせて得たものであり、その流量に対する平均的な値を示しているか否かにはかなり疑問がある。現在の段階では、この変化傾向が現象に固有の確定的なものか、種々の要因に起因する不確定なものかを判別することは困難である。もしもこれが不確定なものであるとするならば、その要因として、河床波そのものに固有の要素と、本実験に特有の要素とが考えられる。本実験では、実験装置や実験方法に固有の要素をできるだけ除去するようにつとめたつもりであるが、この程度の不規則性は避けられなかった。

これには、実験条件の制御法もさることながら、その計測方法、さらにはデータの読み取り方法にも問題があるように思われ、それらを慎重に検討した上で、河床波そのものに固有の現象を抽出しなければならない。

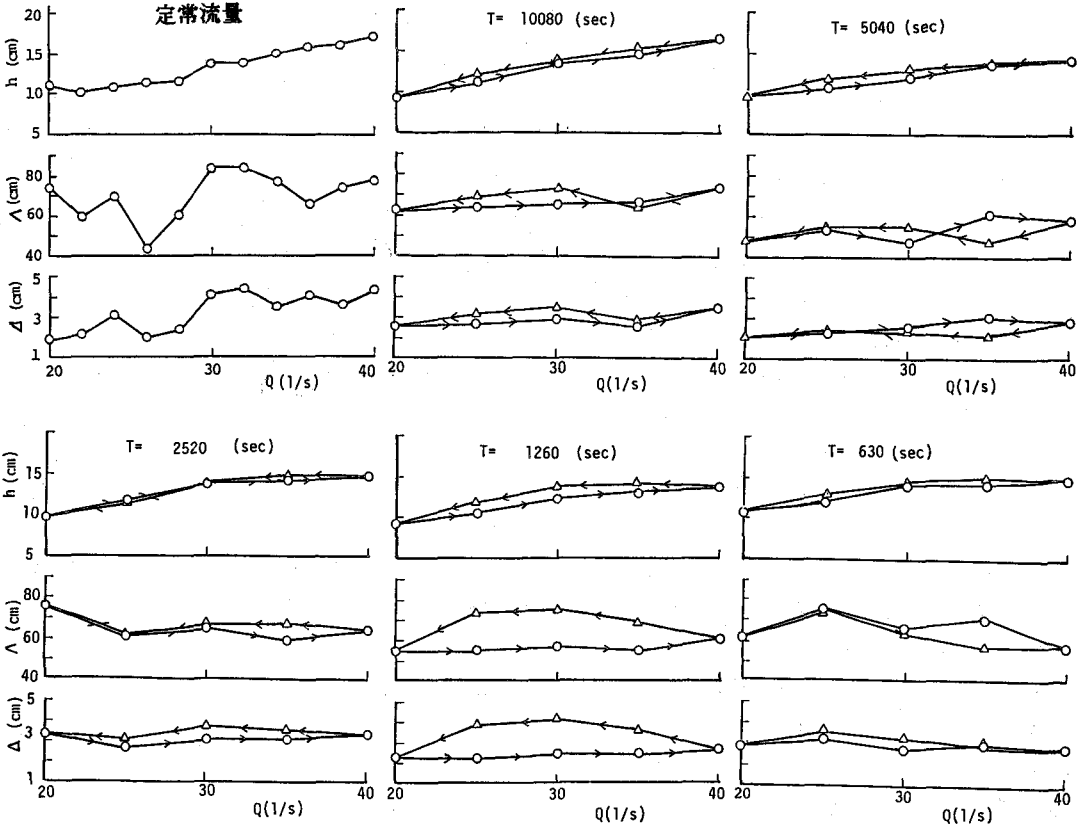


図-3・図-4 定常流量・三角波状流量変化の場合における流量と水深、波長、波高の関係

(2) 三角波状に流量が変化する場合

図-4は、流量を三角波状に変化させた場合の河床波の平均波長、平均波高ならびに水深の応答を示したものである。周期 $T=1260\text{sec}$ の場合以外は、さほど大きなループは見られないが、 $T=1260\text{sec}$ の場合には、反時計回りのかなり大きなループが見られるのが特徴的である。 $T=1260\text{sec}$ の場合に増水時よりも減水時の方が波長、波高が大きく、水深も大きくなっているのは、河床波の変形に要する時間に比して流量の変化速度が大きくて、増水時には河床波が十分に発達しきれず、減水期には逆に充分減衰しきっていないからであろう。また、増水期には、流量の増加に伴って波長や波高が増加する傾向はあるものの、その変化が緩慢であるのに対し、減水期には波長や波高が一旦かなり増加したのち減少するようになり、その変域もかなり広がっている。

従来の研究においても、流量変化に対する河床波の応答に時間遅れがあり、水位流量曲線などにループが形成されることは指摘されているが、減水期における波長の減少を明確にとらえた例は少なく減水時においても波長が増加し続けるとするか¹⁾一定であるとするモデル化^{5), 6)}が行われてきた。今回の実験では、それとはやや異なる傾向が現われていることに注目すべきであろう。

また、周期が 1260sec よりも大きい場合と小さい場合とでは、流量と波長や波高の相関が逆転しているようにみえる。すなわち、周期が長い場合には、流量の増加とともに波長や波高が増加し、流量の減少とともにそれらが減少しているが、周期が短い場合には、むしろ逆の傾向が見られるようである。

図-5 (a) は流量ハイドログラフの各位相ごとの水深、全位相での水深の変化幅ならびにループ幅の最大値が、周期の違いによってどのように変化しているかを示したものである。これによると、全位相を通じて水深の変化幅は、流量の変化速度が大きいほど小さくなるが、ループ幅そのものは $T=1260\text{sec}$ で最大になっていることがわかる。

図-5 (b) および (c) は、平均波長と平均波高について同様の整理を行なったものである。流量の変化周期が長くなると、平均波高のループ幅だけでなく変域そのものが狭くなっているのは、合理的な解釈が難しく、現象の再現性や実験精度の面からもさらに検討を加える必要があろう。

図-5 (d) は、最大流量の時刻を位相0として、水深、平均波長および平均波高の最大値の現われる位相が、周期によってどのように変化するかを示したものである。縦軸の値が負の場合は増水期正の場合は減水期にそれらのピークが現われたことを示している。

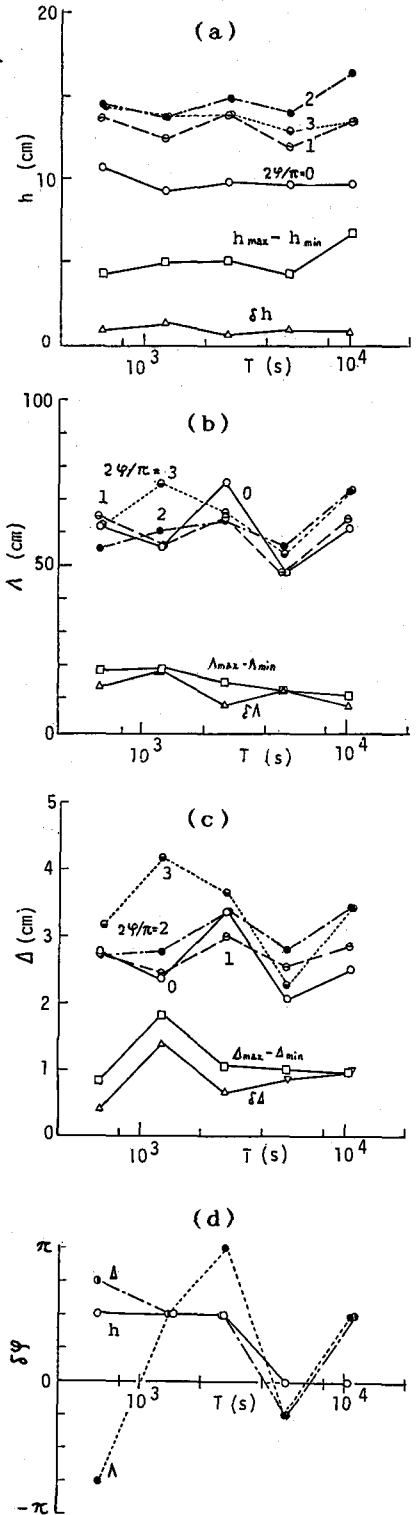


図-5 周期による諸量の変化

(3) 正弦波状に流量が変化する場合

前節では流量が時間に伴って直線的に増減をくり返す三角波状流量波形の場合を対象としたが、実際の河川の洪水では、ピーク付近で流量の増加率が減ることが多い。そこで、より実際の流量波形に近づける意味で、正弦波状に流量を変化させ、三角波状に流量が変化した場合との比較を行なった。図-6は、諸量の時間変化を示した一例である。図-7は諸量と流量の関係を示したもので、 $T = 660\text{sec}$ の場合には、目立ったループは形成されていないが、 $T > 1320\text{sec}$ の場合にはかなり明瞭なループが形成され、特に水深-流量関係のループは $T = 5280\text{sec}$ において最大となっている。周期がさらに長くなれば、やがてはループが消滅するものと思われるが、本実験範囲ではそれを確認するまでには至らなかった。 $T = 10560\text{sec}$ および 5280sec の場合には、増水期に河床波の波長と波高が共に増大し、減水時にはほぼ一定の波長を保ったままで波高のみが漸減し、最低流量から流量が再び増加し始めた直後に、波長が急減している。この変化傾向は従来の研究において見い出されていたことからの組合わせとして説明することができる。ところが、 $T < 2640\text{sec}$ の場合には、増水期に波高が減少し、減水期に波高が増大して、流量と波高が逆相関を示している。これは、三角波状流量変化の $T = 630\text{sec}$ の場合にも見られた傾向であるが、それが一層明確なものとしてとらえられた。 $T = 2640\text{sec}$ および 1320sec の場合に見られる波長の変化傾向は ∞ 字型の特異なものであり、しかもループの向きが2つのケースで逆になっているが、現象の再現性や測定精度の面から、これを確定的なものと判断するのは早計のように思われる。

(4) 流量波形による河床波の応答特性の相異

ところで、図-7に示した正弦波状流量変化時の河床波の応答特性を、図-4に示した三角波状流量変化時のものと比較すると、ループの大きさから見て、三角波状流量波形の $T = 1260\text{sec}$ のものが正弦波状流量波形の $T = 5280\text{sec}$ あたりのものに比較的類似しているように思われる。しかしながら、この2つの実験ケースにおいても、三角波状流量変化の場合は増水期に河床波形状があまり変化せず減水期に変化が顕著にな

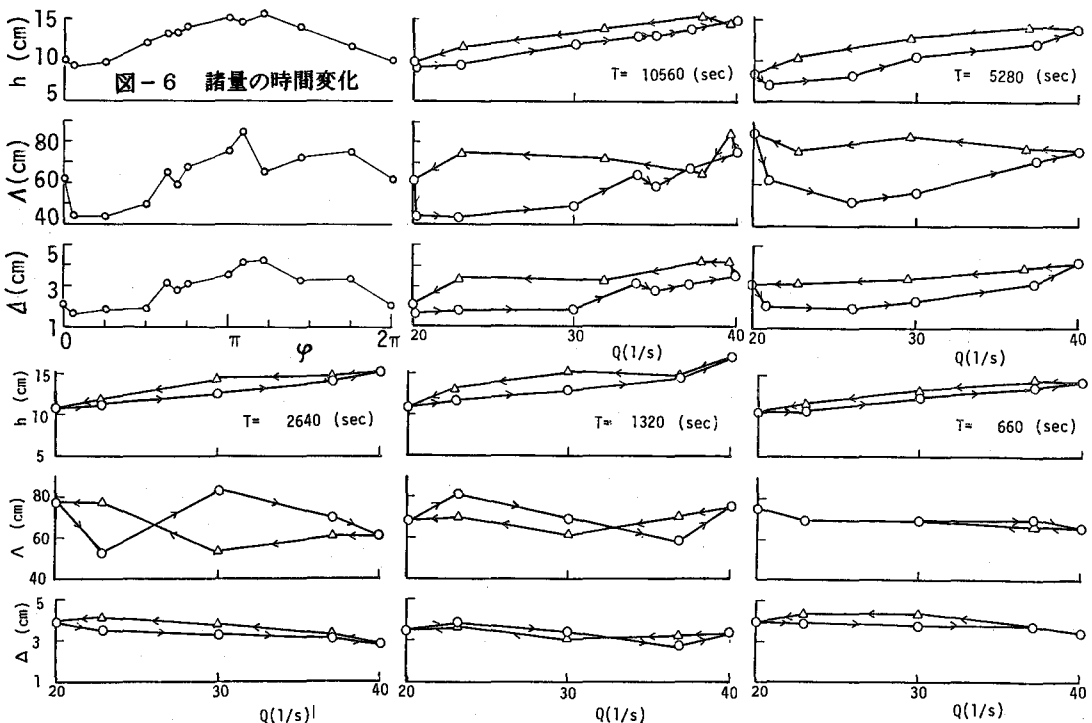


図-7 正弦波状流量変化の場合における流量と水深、波長、波高の関係

るのに対し、正弦波状流量変化の場合には減水期の変化が緩慢で増水期に顕著な変化が見られるという相異がある。

また、三角波状流量変化の場合には、 $T = 1260\text{sec}$ でループが最大となり、 $T > 2520\text{sec}$ ではループが小さくなって周期による応答特性の差が顕著でなくなるのに対し、正弦波状流量変化の場合には $T = 5280\text{sec}$ でループが最大となり、 $T = 10560\text{sec}$ に至ってもきわめて大きなループが形成されている。さらに、三角波状流量変化の場合には、 $T = 630\text{sec}$ においてのみ、流量と河床波のスケールが逆相関の傾向を示すのに対し、正弦波状流量変化の場合には、 $T < 2640\text{sec}$ の3つの実験ケースにおいてその傾向が現われている。

以上の結果から判断すると、流量が正弦波状に変化する場合には、それよりもかなり短い周期で流量が三角波状に変化する場合に類似した河床波の応答が現われていることになる。これは、河床波の変形過程には、流量の変化周期よりもむしろ変化速度が支配的な影響を及ぼしているためではないかと考えられる。そこで同一振幅で同一最大変化速度をもつ三角波と正弦波を比較すると、その周期の比は $1 : \pi/2$ となるが、上に述べた三角波の場合と正弦波の場合の周期の対応のずれはもっと顕著なものである。これは、単に流量の変化速度だけでなく、どのような流量がどの程度の時間継続しているかという、波形そのものがかなり大きな影響をもっていることの現われである。また、一周期を通じての平均的な河床波形状に着目すると、三角波状流量変化の場合には周期による顕著な差異が見られないが、正弦波状流量変化の場合には、周期が短くなるに従って河床波の平均波高が増加しているようである。このような一周期を通じての平均波高を生じさせるような定常流量を支配流量と考えるならば、同じ正弦波状流量波形のもとでも、周期によって支配流量が異なることになる。これらを定式化するひとつの手段として、いわゆる支配流量の考え方のほかに、河床波の変形に大きな影響を及ぼす流量のしきい値の考え方を導入することなどが考えられるが、それについては今後の課題としたい。

4. あとがき

以上、三角波状ならびに正弦波状に流量が周期的に変化する場合の河床波の変形過程について、実験的な考察を行ない、いくつかの興味ある知見を得た。

実験装置および方法については、かなりの改善がなされたが、なおかつ、現象の再現性、精度の面で変動が大きく、河床波の変形過程を決定論的に表現することの困難さが改めて浮き彫りにされた。本実験では、三角波と正弦波という比較的単純な流量波形のみを対象としたが、実際の河川の問題に適用するには、さらに広範な実験条件のもとでデータを蓄積し、帰納的にその特性を抽出していくか、あるいは、河床波の変形機構に着目して一般化を図る必要があろう。また、本研究では、流砂量に関する検討を行なわなかったが、河床波の変形機構を考える上で、流砂量の果たす役割は大きく、その自動計測・自動制御を含めて研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) Sutherland, A.J and G.A.Griffiths: Non-steady Bed Load Transport by Transition Waves, Proc. 16th Cong. IAHR, 1975.
- 2) Fredsoe, J.: Unsteady Flow in Straight Alluvial Streams, J. Fluid Mech., Vol.91, Part3, 1979.
- 3) 芦田和男・澤井健二: 河床波の変形過程に関する研究, 京大防災研年報, 第23号B-2, 1980.
- 4) 中川博次・辻本哲郎: Lower Regimeにおける非定常移動床流れの抵抗の遅れ性状, 第25回水理講演会論文集, 1981.
- 5) 芦田和男・中川一・加藤均: 流量変化に伴う河床波の応答に関する研究, 京大防災研年報, 第25号B-2, 1982.
- 6) 中川博次・辻本哲郎・竹東正孝: 河床波を伴う非定常流れの特性, 第27回水理講演会論文集, 1983.