

流域地質が瀬の波立ちに及ぼす影響の解明

IMPACT OF THE GEOLOGY OF RIVER BASIN ON WAVE PATTERNS IN RIFFLES

恩田恭輔¹・知花武佳²

Kyosuke ONDA, Takeyoshi CHIBANA

¹学生会員 東京大学工学部 社会基盤学科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学工学系研究科 社会基盤学専攻 講師 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Various wave patterns can be observed in riffles. The characteristics of waves are determined by the interaction between water current and substrate conditions, so the difference among wave patterns shows the difference of physical habitats for aquatic creatures. Therefore, if the relationship between physical condition and wave patterns can be clarified, we can have rough image on the local physical habitat. In this study, we observed two riffles in two catchments which geology are different, and conducted hydraulic experiment in a flume with natural gravel under several conditions in order to understand the relationship between several substrate conditions and waves. It was clarified that geological condition determine the gravel structure in a riffle bed as well as shape of gravels, and then the characteristic wave patterns are created in each catchments.

Key Words : wave pattern, geology, catchment area, riffle, gravel structure, flatness,

1. はじめに

河川に形成される“瀬”には多様な波立ちが見られ、河川景観を特徴づけている。この波立ちは水流と底質の相互作用によって決定されるものであるため、この違いは水中の生息環境の差を表しているとも見ることもできる。従って、波立ちを規定する物理条件が把握できれば、波立ちの観察からその場における生物の生息環境をおおよそ把握でき、生物調査等をどこで実施するかを決定する上で有用な情報をもたらすと考えられる。

こうした中、既に実河川に見られる瀬の水面に着目し、現地観測をもとに研究を行ったものも多い^{例えば1) 2)}が、特に岩本ら³⁾は、同様の背景を踏まえた上で、多摩川水系に形成された早瀬を対象に波立ちと物理条件の関連性を分析している。しかし、これは単一水系で行われた研究故に、底質条件を限定した上での解析に留まっている。そこで、本研究は地質条件の異なる河川間で比較を行うと共に、水路実験を用いて、底質構造と水面景観の関係を解析することを目的とした。なお、小規模河床波のような微地形が原因となって生じる波立ちは扱わず、同程度の河床粗度、流速、水深が広がっている領域で形成される波立ちのみを対象とする。ただし、微地形がこうした領域の波立ちに及ぼす影響については検討する。

2. 実河川における観測

(1) 観測サイトの選定

本研究は、まず流域地質の違いが河床の礫構造に及ぼす影響を把握した後、それらの礫構造の違いが河川の波立ちにどのような影響を与えているかを解明する、という二段階で進めることとする。そのため、まずは河床の礫構造に違いをもたらすと考えられる、異なる流域地質の対象区間を選定する必要がある。こうした条件に合致する河川として、多摩川水系の南秋川と富士川水系の金川を観測サイトとして選定した。南秋川は堆積岩の中でも指向性の強い扁平な礫を産出する千枚岩地域を流れており⁴⁾、一方の金川は礫が球形に近い形になりやすい深成岩地域を流れている⁵⁾。なお、共に断層や地すべりの影響で土砂生産が盛んであるという共通点も有しており、観測サイト上流の流域には、複数の地質が含まれないよう注意した。

観測サイトは、いずれも早瀬的な環境と平瀬的な環境が混ざるように設定しており、縦断距離は南秋川が90m、金川が30mと異なるが、川幅は南秋川が平均7.3m、金川が平均9.9mとおおよそ同程度である。また、後述する測量の結果、平均河床勾配は南秋川で1/70、金川で1/45とすこし異なるが、これは南秋川の方がやや長い平

瀬を含んでいるためであり、南秋川の早瀬だけの勾配は1/55と金川のそれとほぼ等しいことを確認している。

(2) 現地観測の概要

観測対象の瀬において、各測定を行う測点を縦横それぞれほぼ等間隔の格子状に設定した。南秋川と金川では観測対象とした瀬の大きさが異なっていたため、格子の間隔も異なっている。横断方向には、両河川共に各断面で水域内におおよそ等間隔になるように3点の測点を設置した。また、縦断方向には、南秋川では10m間隔で10断面、金川では5m間隔で7断面を取った。

各測点においての調査項目は以下の4項目である。

- ・レベル測量
- ・水深・流速測定
- ・測点周りの礫調査
- ・測点周りの波立ち調査

ここで、流速測定は6割水深一点の計測を基本とし、断面内で最も水深の深い滞筋では2, 4, 6, 8割水深にて流速を計測し、水深方向の分布を得た。

また、礫調査では三宅ら⁴⁾の礫調査法に倣った。すなわち、各測点に60cm×60cmの方形枠を設置し、方形枠内で中間径が12.8cm以上の礫（以後、これを大礫と呼ぶ）のうち、礫の半分以上が河床堆積土砂に埋まっていない浮石（以後、これを表層礫と呼ぶ）を全て取り出し、各礫の長径・中間径・短径と重量を測定した。次に、採取した巨礫を戻さずに、方形枠内の4分の1の面積に相当する部分（30cm×30cm）から、中間径3.2cm以上の表層礫（以後、これを中礫と呼ぶ）を取り出し、各礫の長径・中間径・短径を測定した後、その総重量を四倍した。

さらに、測点周りの波立ち調査では、各測点周辺で、後に述べる波立ちの分類の中で、どの種類の波立ちが優先しているかを視覚的に判断した。

3. 波立ちの分類

まず観測の際に見られた波立ちを、視覚的判断に基づき以下の5種類に分類した。

- ・礫越流型跳水（走水型、もぐり型、落水型）
- ・定在波
- ・しわ波
- ・ごちゃ波
- ・波なし

まず礫越流型跳水というのは、水流が礫を乗り越え、そこで跳水を起こしているものである。岩本らによる既往研究³⁾では、この礫越流型跳水を、その形態により、走水型、もぐり型、落水型の3つに区分している。走水型は礫を越流した射流の水深が、下流の水深と共役関係になったときに跳水を起こすという礫周りの一般的な跳水を指す。もぐり型は越流後の流れに下流の水が覆いか

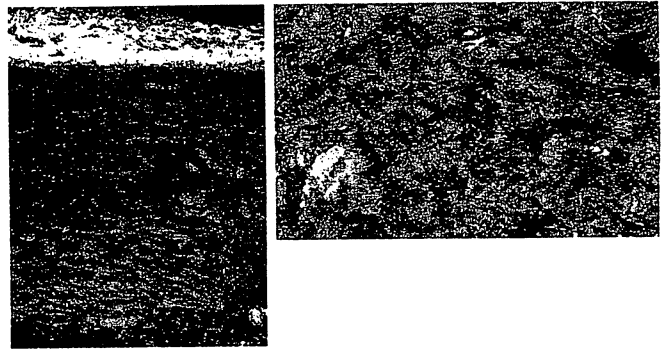


図-1 しわ波（左）とごちゃ波（右）の様子

ぶさっているような現象であり、落水型は越流後の流れが勢いを失い、礫から剥離するように落ち込んで泡立つ現象である。

定在波はおおよそ規則正しい波長をもった波状の水面を指しており、これには碎波している部分が見受けられない。岩本ら³⁾は、この定在波を成因によって起点型、集水型、複合型の3つに区分している。起点型の波状水面はまだ勾配のついていない瀬頭付近に多く見られ、河床中のやや大きな礫が起点となり、そこから定在波が発生しているものを指す。次に集水型の波状水面は、早瀬の中でも滞筋のように流れが集中しているような領域に多く見られる。これはある流れが1ヶ所に集まり、そこで生じる水面の変化が起点となって現れる定在波で、1ヶ所に集まるきっかけは、礫の間であることもあれば、いわゆる早瀬の滞筋のように、地形的に深い部分が連なった区間があり、水がその部分に集中する場合もある。ただし、前述したとおり、これら起点型や集水型と言った局所的な微地形に起因する波立ちについては除外する。

これらに加え、複合型の波状水面が定義されており、これは「いくつかの定在波が存在するものの、ほとんどの波は流れの速度と均衡せず、様々な方向に波が乱れた様相を呈しているような波立ち」であるとなっていた。ここで、様々な波立ちが混合して存在していることから複合型と名付けられているが、これらを注意深く観察すると集水型でも起点型でもなく河床との相互作用で比較的安定した定在波が見られるもの（以下、起点型でも集水型でもない「定在波」と呼ぶ）、水面にいくつかのしわのような筋が入っているだけで波高が1cmにも満たないもの（以下、「しわ波」と呼ぶ）、ごちゃごちゃぼこした比較的波高の大きな波ではあるが、その波長はバラバラで安定しないもの（以下、「ごちゃ波」と呼ぶ）といった3つの状態が存在することが今回新たにわかった。

波なしは文字通り波が特に見られない状態である。

これらの他に、衝撃波に起因するV字波と弱跳水も区分として加えているが、今回対象とする緩勾配の早瀬や平瀬ではほとんど見受けられないため対象から外した。

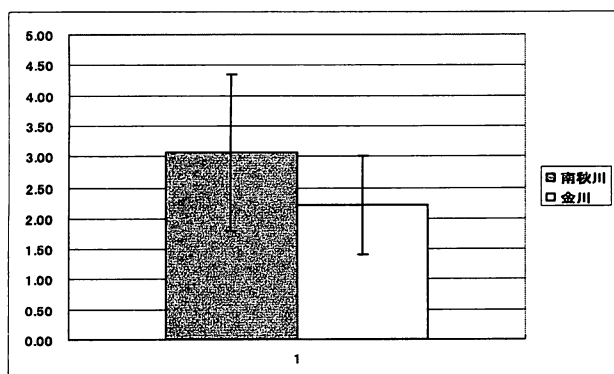


図-2 平均扁平度の違い

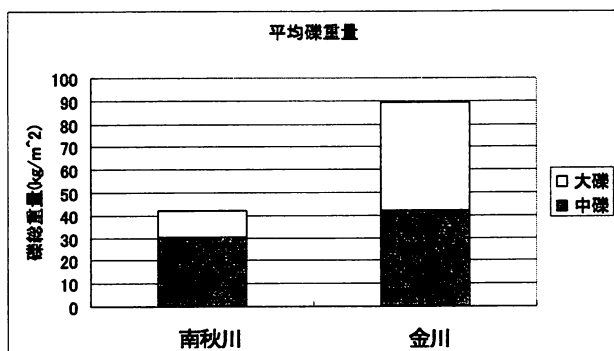


図-3 平均表層礫重量の違い

4. 流域地質が早瀬の河床構造及び波立ちに及ぼす影響

今回観測を行った2河川では河床表層礫の形状に違いが見られることを観測から確認した。形状の差を数値化するために扁平度を河川ごとに算出したのが図-2である。なお、扁平度は以下の式で表される礫の形状を表す指標で、この数値が大きいほど礫が扁平であり、小さいほど丸いことを表す。

$$\text{扁平度 } F = \frac{a+b}{2c} \quad (1)$$

ただし、 a b c はそれぞれ、礫の長径、中間径、短径を表している。図-2を見ると、南秋川では礫が扁平なため、扁平度が大きく、金川では礫が丸いため扁平度が小さいことがわかる。これは地質の違いが産出する礫の指向性に影響したものである。

さらに、この礫形状の違いに起因すると考えられる違いが、河床表層の礫構造にも見られた。図-3は単位面積当たりの表層礫総重量の違いを示したものを示したものである。ここからも分かるとおり南秋川よりも金川の方が表層礫の総重量がかなり多くなっているのが分かる。これは、地質の違いによる比重の違いに比して十分大きな差であり、表層の礫構造の違いを表していると言える。これは南秋川の扁平な礫の方がFilter Layerとしての効果が大きく、薄い表層礫の下層でも細粒分が留まること

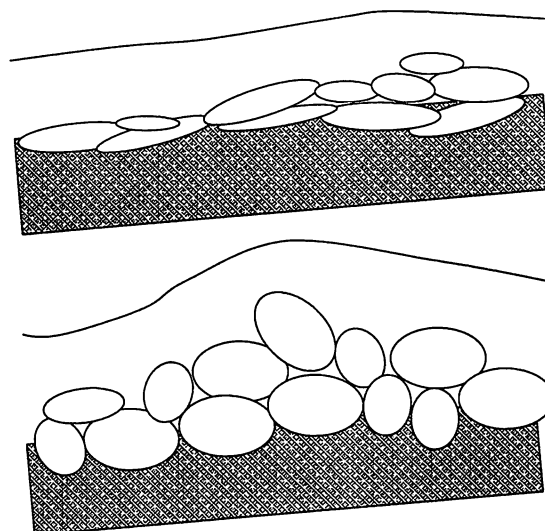


図-4 河床状況の河川による違いの模式図
共に礫径10cm程度のスケールのイメージ
(上段：南秋川 下段：金川)

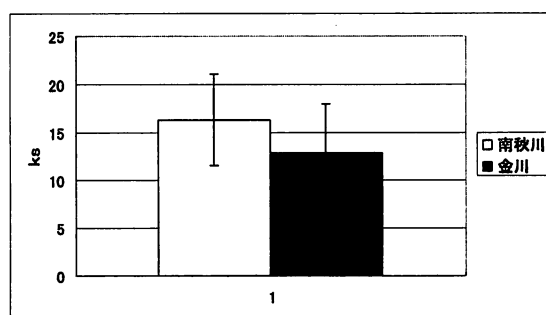


図-5 相当粗度の違い

ができるのに対し、金川では礫間に空隙が多いため、細粒分が抜けやすく、かなり下層でないと砂が留まることができないことに起因すると考えられる。こうした違いは、早瀬内部における微地形にも影響していた。金川では所々に礫の集積が見られ、早瀬の中にいくつかの段差を確認することができた。しかし、一方の南秋川ではそういった礫の集積は見られず、早瀬は一定勾配でなだらかな河床が形成されていた。これは礫が丸い方が一箇所に集積しやすいのに対し、扁平な礫ではまとまった段差を作りにくいという特徴が現れているためであると考えられる。実際、南秋川では河床全体に礫が薄く広がっており、歩きやすいことから両者の違いが体感できた。これらの違いを図-4に示す。

また、図-5は各測定断面の鉛直流速分布に対数則を当てはめ、河床の相当粗度 k_s を算出し、河川ごとに平均をとったものである。これを見ると河床粗度が南秋川のほうが金川よりも高くなっていることが分かる。上述した違いから南秋川のほうが粗度は低いと予想していたが、本手法では逆の結果となってしまった。このように、これまで見てきた河床構造の凹凸は、必ずしも局所的な粗度を増加させているわけではないことがわかったが、実際には流速の計測位置が上述した礫の集積による微地形

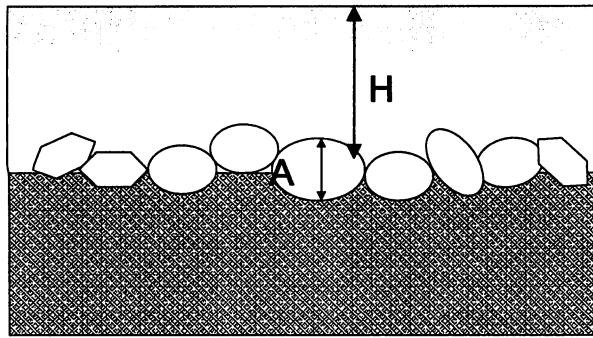


図-6 最大短径水深比: A/H

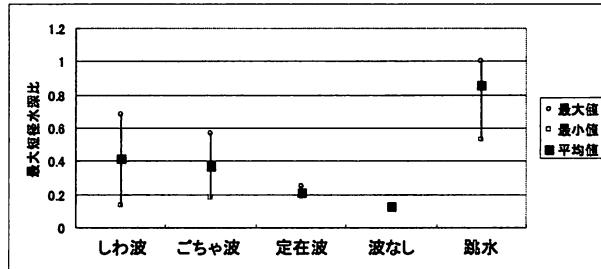


図-7 波立ちごとの最大短径水深比の分布

のどの様な位置であったか等にも影響を受けていると考えられ、より詳細な検討が必要である。

一方、波立ちに注目すると、南秋川では定在波が卓越しており、礫越流型跳水はもぐり型が中心であった。それに対して金川では、定在波はほとんど見られず、礫越流型跳水のもぐり型和落水型が入り混じっていた。しわ波とごちゃ波はいずれのサイトでも比較的良好に見られた。こうした両者の違いが生まれた原因は以下のように説明できる。

まず礫越流型跳水の型の違いについてであるが、落水型はその前後で水面の高さが大きく異なる場合に発生するため、礫が丸く集積を起こしやすい金川では局所的に大きな水面勾配がつきやすくなり、落水型の割合が高くなっている。一方、礫が扁平で集積を起こしにくい南秋川ではその条件を満たしにくくもぐり型が中心となる。次に、定在波の存在についてであるが、南秋川では礫が扁平で集積を起こしにくいために、一度発生した波が持続しやすく、結果として定在波が安定しやすい。しかし金川では礫が丸く集積を起こしやすいため、すぐに水面が乱され、発生した波がきれいに持続しにくくなり、きれいな定在波が観測されていないと考えられる。また、ごちゃ波としわ波については特にどちらかの河川で卓越しているという差は見受けられなかった。次章では、これらの波立ちの違いについて、より詳細に、かつ定量的に検討する。

5. 波立ちの種類を規定する環境因子

波立ちには多くの要因がかかわっているが、今回の観

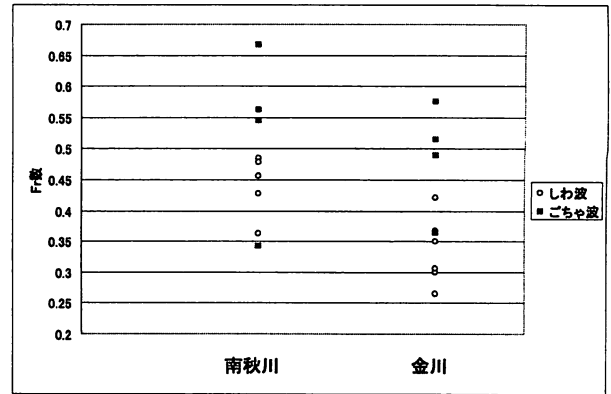


図-8 しわ波とごちゃ波のFr数の分布

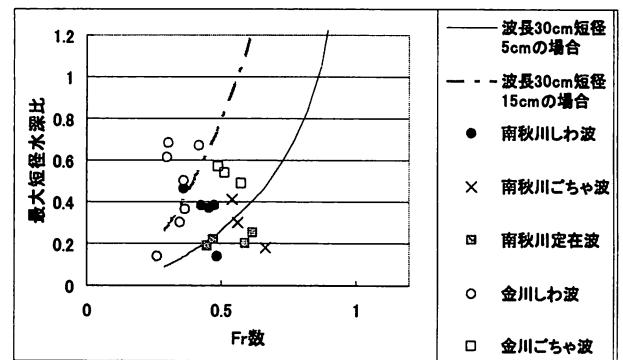


図-9 しわ波とごちゃ波のFr数と最大短径水深比

測で、波立ちに特に強い影響を与えていると考えられるパラメーターを2つに集約することとした。一つのパラメーターはやはりFr数であり、その他のパラメーターとしては既往研究³⁾で提案した、相対水深(水深/平均礫径)、水面勾配、礫突出率(単体で突出した礫の高さ/水深)等が挙げられるが、今回対象とするようなさほど急でない早瀬や平瀬では水面勾配の違いは無視することができると、残り二つのパラメーターを集約したものとして、最大短径水深比というパラメーターを用いることとした。これは図-6のように調査ポイントに存在した河床礫の短径のうち、最大値をその場の水深で割ったものであり、突出した礫が一つあれば上述した礫突出率に対応する値となり、なければ相対水深の逆数に対応する値となる。最大短径水深比が小さいのは、礫の影響が水面に現れにくい状態を表し、最大短径水深比が大きいのは、短径の大きな巨礫が一つ突出しているか、礫径に比して水深が極めて浅いなど、水面に河床の影響が出やすいことを表している。礫突出率は現地で計測するしかなかったのに対し、最大短径水深比はその場の平均礫径、地質に依存する礫の扁平度、水深などが求めればおおよそその状態を推測することができるという利点がある。

図-7はそれぞれの波立ちの最大短径水深比の分布を示したものであり、これを見ると分かる通り、勾配がある程度急な瀬においては、この値がおおよそ0.6を越えると礫越流型跳水になりやすく、十分小さいと、前章でも述べたとおりきれいな定在波が安定するか、又は波なしとなる。なお、ここには示していないが、定在波はFr数が

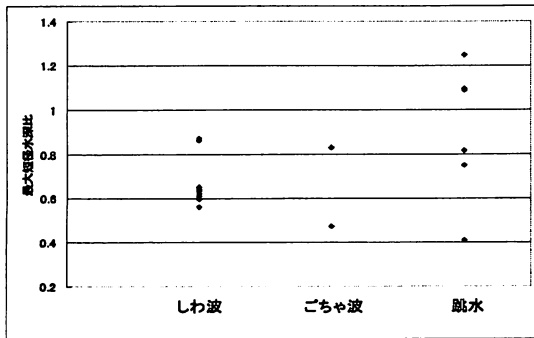


図-10 波立ちごとの最大短径水深比の分布 (実験)

0.4程度以上なければ確認されていない。

一方、しま波やごちゃ波は比較的広い範囲に分布している様子が見て取れる。しかし、図-8に示す通り、それぞれの波立ちが見られた場所のFr数の分布を見ると、およそFr数が0.5程度を境に、それより大きいとごちゃ波に、小さいとしま波になっていることに気付く。しかし、詳細には、このFr数の境界が、南秋川と金川で異なっている。そこで、定在波が生じるためには波速と流速が等しいという条件⁹⁾ (Airy条件とする) を用い、次式で表される限界Fr数について検討する。

$$Fr = \sqrt{\frac{\tanh kh}{kh}} \quad (2)$$

ただし、 k は波数 ($=2\pi/L$, L は波長) であり、 h は水深である。この関係を、横軸にFr数、縦軸に最大短径水深比をとったグラフ上に落としたものが図-9である。ここで、問題は波数 k と最大短径水深比の決め方であるが、南秋川の場合は、現地の河床材料の平均的な最大短径5cm、見受けられた定在波の波長30cmを用い、金川の場合はそれぞれ最大短径15cm定在波の波長30cmを用いてこれらの値を算出し、Airy条件を示してある。実際には、金川では礫の集積の影響もあり定在波はほとんど観測されなかったが、既往研究³⁾でも多摩川中流域で卓越する波長が30cm程度であったことから、本来であればこれくらいの波長で安定するものと仮定した。すると、これらの曲線により、金川と南秋川のそれぞれにおいて、しま波とごちゃ波がおおよそ区分できている様子が見て取れる。すなわち、ごちゃ波は複数の定在波の重ね合わせであるのに対し、しま波ははっきりとした波が形成されていないという違いを表していると言うことがここからも理解できる。また、その境界となる限界Fr数は金川の方が低いものの、上述した礫の集積の影響で、金川では全体的にはFr数が小さく、集積部を超えるとときに部分的に極めて高くなるというのが特徴である。一方、南秋川は対照的で、全体的にFr数が高くなっており、境界となる限界Fr数も高くなっている。結果として、ごちゃ波としま波は特にどちらの河川で多いという傾向ははっきり見られなかったと説明できる。また、図中には実際に南秋川で観測された定在波も示しているが、そのうち二点は、波長30cm、最大短径5cmとして導かれたカーブの上に

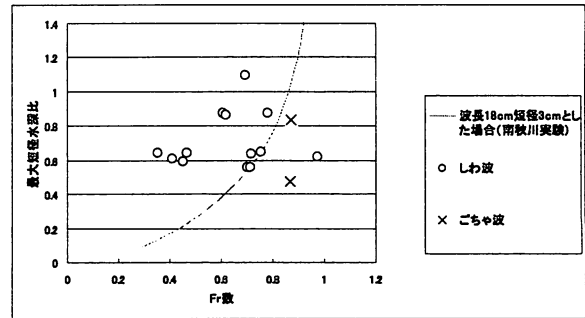


図-11 しま波とごちゃ波の分類 (実験)

乗っており、理論と合致していることが確認できる。残る二点は波長50cm、最大短径5cmとして導いたカーブの上に乗ることを確認しており、実際にはこれくらい長い定在波も形成されていることがわかる。

6. 水路実験

現地観測では条件が限られていたため、より広い条件で、波立ちの違いを把握するため、南秋川で小さめの礫 (中間径1-5cm) だけを選別し、これらを用いた水路において実験を行った。なお、用いた礫は実験終了後に同じ場所へ戻す予定である。水路は幅50cm、長さ4m、勾配は1/40~1/80の範囲で複数の条件を整え、流量を様々なに変化させた。その結果、水深は2.2cmから5.0cmの範囲で変化した。その結果、跳水条件は図-10に示す通り、観測同様およそ最大短径水深比が0.6以上に分布することが確認できた。定在波は観測されていないが、これは高いFr数の条件下で、最大短径水深比を十分に下げることができなかったのが原因である。

しま波とごちゃ波はやはりFr数で分類できる。しかし図-11に示すようにその境界値はおおよそ0.8であり、観測の結果よりかなり大きくなっている。図-11は横軸にFr数、縦軸に最大短径水深比を示した図上に式(1)で表されるAiry条件を加えたものである。ここでは、水路中に設置した礫の平均的な最大短径として3cmを与え、定在波の波長として18cmを与えた。水路実験ではきれいな定在波を観測できなかったため、南秋川における波長と最大短径の比を現地と同じ6:1にすることで、18cmと決定した。よって、この曲線は先程図-9で描いた南秋川の限界Fr数の曲線と全く同じものである。

これを見ると、Fr数が1付近にしま波がひとつ観測されたことを除いて、新たに引いた曲線により実験でのごちゃ波としま波も区分できている様子が見て取れる。このしま波だけ他のしま波の存在範囲と大きく異なっており、別の波として分類すべきものをしま波として分類してしまった可能性が高いと考えられる。これを除いて考えれば、ごちゃ波としま波の区分がきれいに現れている。境界となるFr数が大きくなったのは、最大短径水

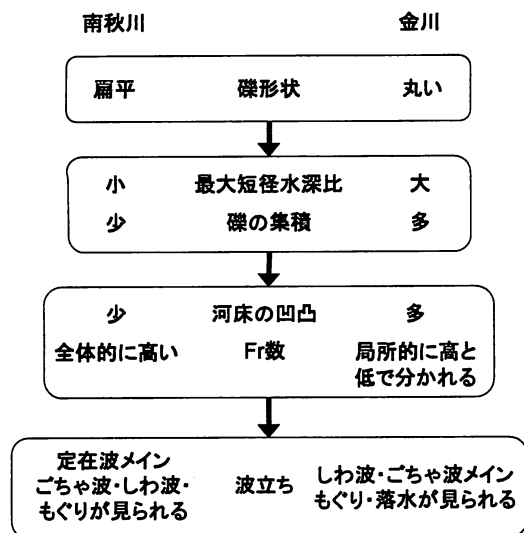


図-12 波立ち分類フローチャート

深比が現地のものよりも大きく設定したため、結果として境界のFr数が大きくなったものと考えられる。すなわち、この結果より定在波の波長は河床材料の平均粒径と対応しており、地質が同じであれば、例え礫径が変わっても、最大短径水深比と限界Fr数の関係は一定であり、ごちゃ波としわ波の境界はほぼ地質のみで決まることが示唆された。

7. 地質構造の差が早瀬の水面景観に及ぼす影響

以上の結果より、地質構造の違いと水面景観の関係について考察する。

まず、礫が扁平な南秋川では、最大短径水深比は小さくなる。それと同時に礫の集積が起こりにくく、凹凸が付きにくいいためFr数が高くなりがちである。一方、礫の丸い金川ではその逆である。そのため、礫の集積しやすい金川ではきれいな定在波が見られない。ただし、同様の環境を選んでいるために、河床材料の平均粒径大きさには大きな違いが見られず、その結果、本来であれば金川でも南秋川同様30cm程度の波長を持つ定在波が形成するものと推測される。また、これらの地点において、複数の定在波が混在したごちゃ波と、しっかりとした波になっていないしわ波の境界となる限界Fr数は、定在波が安定する条件から求められ、この限界Fr数と最大短径水深比の関係は地質によって異なる。これらをまとめると、図-12のフローチャートのようになる。礫越流型跳水のタイプ、定在波の安定度に差は見られるが、ごちゃ波としわ波の量については、境界となるFr数が変化すると共に、早瀬のFr数にも違いが生じたため、これらの地点で差は見られなかった。

一方実験では、扁平な南秋川の礫を用いたため、平均礫径が多少小さくとも、波長と短径の関係は現地と大きくは異なっていないと考えられる。そうした条件におい

て、現地よりも高い最大短径水深比の条件を設定したために、結果としてごちゃ波としわ波の境界が現地で得られたものよりも高いように見受けられた。

このように、地質の違いは、礫一つの形（結果として最大短径水深比）、河床表層礫の構造（空隙＋粗度）、礫の集積（結果としてFr数）、の3つに影響し、それらが複合して早瀬の波立ちを決定しており、上述した両サイトの景観の違いを生み出していることが把握できた。

8. まとめ

本研究では以下の点を解明した。

- ・地質の違いに起因する礫の扁平度は、局所的な河床の凹凸のみならず、礫の集積しやすさに影響し、早瀬の河床構造に大きく影響する。
- ・礫の集積しやすい丸い礫が卓越する場合、きれいな形の定在波は見られない。
- ・波立ちのタイプを支配する因子として、Fr数に加え、最大短径水深比が重要である。
- ・定在波の重ね合わせであるごちゃ波と定在波が形成されていないしわ波の境界はAiry条件によって説明できる。
- ・ごちゃ波としわ波の境界となる限界Fr数を決定する上で重要な、波長と最大短径の比は地質によってほぼ一定である可能性がある。これは波長が平均礫径に、最大短径が平均礫径と扁平度に依存するためではないかと推測される。

参考文献

- 1)池田駿介，戸田祐嗣：瀬の水利特性に関する現地観測，水工学論文集，第40巻，pp.901-906，1996。
- 2)池田駿介，戸田祐嗣，佐野貴之：瀬の空間構造と水利特性に関する現地観測，水工学論文集，第41巻，pp.277-282，1997。
- 3)岩本秀仁，知花武佳，辻本哲郎：早瀬の波立ちに着目した環境特性の把握，河川技術論文集，第11巻，pp.517-523，2005。
- 4)三宅基文，知花武佳，辻本哲郎：早瀬における礫の分級構造の解明，河川技術論文集，第10巻，pp.399-404，2004。
- 5)高瀬康生，戸村健太郎，藤森信也，鈴木隆介：崖錐，沖積錐および扇状地の縦断勾配と構成礫の円形度との関係，地形，第23巻第1号，pp.101-110，2002。
- 6)山田正，池内正幸，堀江良徳：不規則底面をもつ開水路流れに関する研究，第28回水理講演会論文集，pp.149-155，1984。

(2008. 4. 3受付)