

早瀬の波立ちに着目した環境特性の把握

ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS IN RIFFLES FOCUSING ON WAVE PATTERNS

岩本秀仁¹・知花武佳²・辻本哲郎³

Hidehito IWAMOTO, Takeyoshi CHIBANA and Tetsuro TSUJIMOTO

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 修士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

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

³正会員 工博 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 客員教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

Since riffles change their environmental characteristics in every big flood, it is important to understand them in consideration of hierarchical structure of spatial scales for the maintenance or the evaluation of habitats in the riffles.

Then, we focused on wave patterns which are elements of landscape in the riffle. Waves are generated due to the physical elements which signify fluid and riverbed material properties, that is, waves will show the environmental characteristics visually. So, the objective of this paper is to show that waves are useful to understand the environmental characteristics in researching the relation between waves and these physical elements. Then, we categorize waves into 9 types by consideration of spatial scale of wave.

After some field observations and hydraulic experiments using the concept of scale, we found that the physical elements which defined wave patterns were Fr number, h/d (relative depth to gravel diameter), water surface slope, and gravel protrusion ratio (to mean riverbed surface). Finally, we showed that the physical environment in riffles was understood visually through the wave patterns which were main components of landscape in riffles.

Key Words : riffles, wave patterns, scale, landscape, environmental characteristics

1. はじめに

河川中流域に見られる早瀬は、魚類や底生昆虫、付着藻類など様々な生物の生息場を提供しているのみならず、その多様な流水表情から人を魅了する河川景観を創出している点でも重要な空間と言える。しかし、早瀬は洪水の度に環境特性を変化させる動的な空間でもある。

では、そのような動的な早瀬の管理や生息場評価を考えると、まずマクロな視点で早瀬の物理環境、例えば流量や土砂供給量に着目する必要がある。ただし、そのマクロな環境の変化により、同時にミクロな視点での物理環境、例えば水深や流速、河床材料の質も変化する。すなわち、早瀬の機能や管理などの問題は空間的なスケールという観点から議論すべきであり、まずは早瀬の物理環境をスケール別に把握する必要があると考えられる。

ここで、本研究で用いるスケールであるが、これは知花¹⁾が用いたものであり、早瀬全体を表すユニットスケール、ユニットスケールの構成要素で川幅や水深の大きさ程度に規定されるサブユニットスケール、そして河床の礫1つの周り程度の大きさを示すポイントスケールに分かれる。これら各スケールを特徴付ける物理因子は

各スケールで異なるにも関わらず、これまでは、階層構造による早瀬の物理環境の把握ということすらあまり行われていなかったことに加え、把握するとしても、時間や労力を費やして観測を行うことが主要な手段となる。

さらに、生物生息場の研究に関して、早瀬というユニットでどのような生物が生息しているかということや、ポイントスケールにて底生昆虫や付着藻類がどのような生息場を選好するかなどの研究は多いが、それらを繋ぐサブユニットの環境特性に関する研究はほとんど見られない。これは、サブユニットの境界を決定する有用な手段が未だ明確になっていないことが原因に挙げられる。

そこで、本研究では先に挙げたような問題点を解決すべく、早瀬における「波立ち」に着目した。波立ちは早瀬景観の主たる構成要素であり、波立ちが生じる場の環境を構成する物理因子、すなわち流体及び河床材料の性質が複合的に作用することで形成されるものである。つまり、このことは波立ちという早瀬景観が物理因子の複合的な情報を視覚的に表しているに他ならない。さらに、早瀬における波立ちを類型化することで、先の問題点であるサブユニットも区分することができると考えられる。そこで、波立ちに対しても空間スケールの階層性を考慮した上で、波立ちと物理因子の関係をスケール毎に調べ、

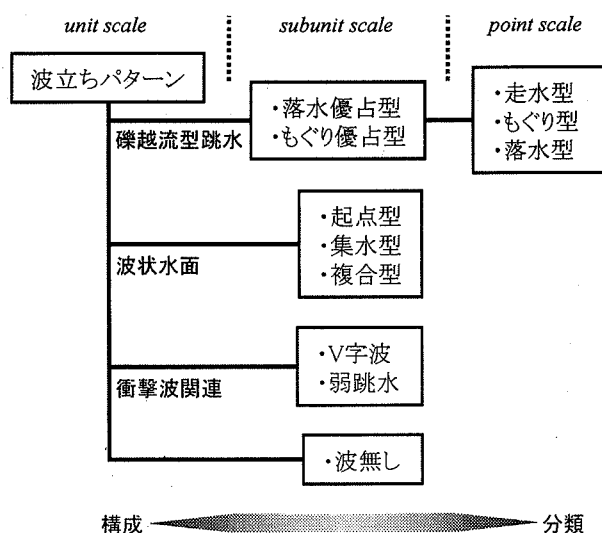


図-1 波立ちの種類

波立ちという景観要素を用いることが早瀬の物理環境の把握に有用であることを示すことを本研究の目的とした。

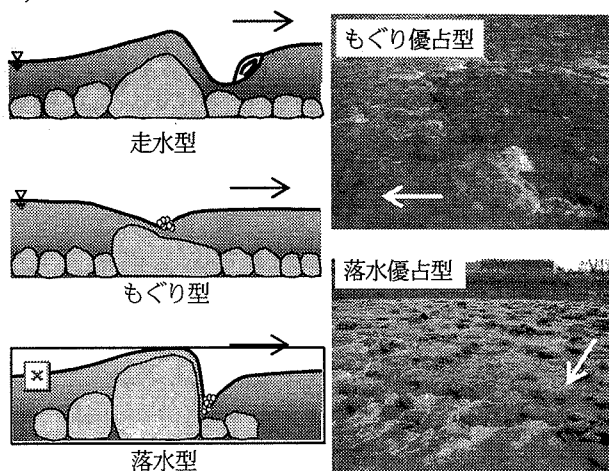
2. 早瀬における波立ちの種類

様々な景観の早瀬を視察した結果、発生要因や現象の類似性から図-1のようにサブユニットスケールの波立ちを8つ、そしてポイントスケールにおける波立ちを3つ分類した。ただし、後に示す現地観測の対象とした早瀬において多く見られなかったものに関してはここでは省略してある。具体的な図や写真を図-2以降に示す。

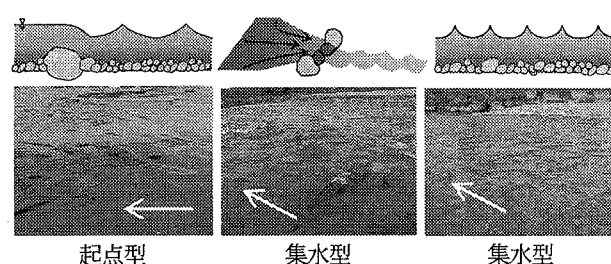
まず、礫越流型跳水のポイントスケールにおける波立ちについて、走水型は礫を越流した射流の水深が、下流の水深と共役関係になったときに跳水を起こすという礫周りの一般的な跳水を指す。もぐり型は越流後の流れに下流の水が覆いかぶさっているような現象であり、落水型は越流後の流れが勢いを失い、落ち込んで泡立つ現象である。これらはすべて、河床の礫1つの周り程度で起こるポイントスケールの波立ちである。また、ポイントスケールの波立ちが集合することにより、サブユニットスケールにおける礫越流型跳水の波立ちが構成される。本研究では、落水型の波立ちが優占してサブユニットを構成しているものを落水優占型、もぐり型が優占しているものをもぐり優占型と名付けた。その際、走水型はどちらにも含まれているものであり、また、これだけが優占しているものはほぼ見られなかった。

次に波状水面に関して、これは基本的におおよそ規則正しい波長を持った定在波が生じているような波立ちを指す。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。定在波の中に碎波している部分はほとんど見受けられない。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

1) 礫越流型跳水



2) 波状水面



3) 衝撃波関連

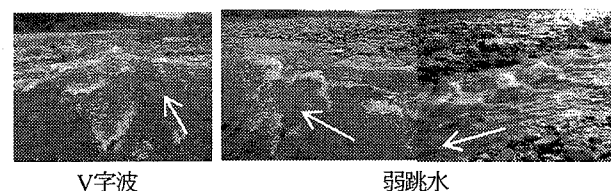


図-2 各種波立ちの様相

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、図のような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。また、複合型の波状水面は、いくつかの定在波は存在するも、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を言う。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た。

また、衝撃波関連に関して、本研究では主に礫越流後の擾乱が周りの速い流れによって斜めに伝播することを衝撃波としている。そして、V字波というのは写真に示すように衝撃波が礫下流で左右に広がっていく現象を示し、弱跳水は、左右からの衝撃波が交差して碎波する現象が連続的に続いているものを指す。ちなみに、波状水面や衝撃波関連の波成ちは広がりを持って起こる現象でありサブユニットスケールに属する。また波無しに関しても、ある点で波が無い状態ではなく、波の無い部分が広がっていること示すのでサブユニットスケールとなる。

表-1 各スケールにおける物理因子と波立ちの対応関係

スケール	早瀬を表す物理因子	波立ち
ユニット スケール	(平均的な) ◆水深、◆流速、◆河床勾配 ◆平面形状 (狭窄型、平行縦長/横長型)	<物理環境の把握> ◆波立ちパターン
サブユニット スケール	◆流量、◆相対水深、◆水面勾配 ◆Fr数、◆河床礫径	◆礫越流型跳水 ◆波状水面 ◆衝撃波関連 ◆波無し
ポイント スケール	(局所的な) ◆水深、◆流速、◆水面勾配 ◆河床勾配	◆礫越流型跳水 (礫周りの現象)

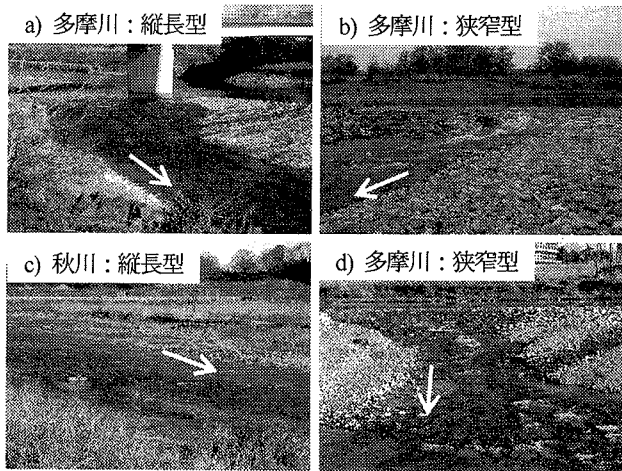


図-3 現地観測対象地の様子

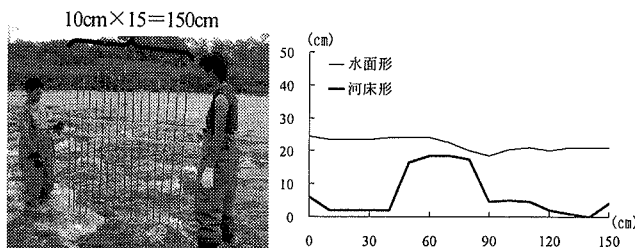


図-4 河床凹凸調査と結果の一例

3. 現地観測概要・結果

前節において、波立ちの種類とそれに対応するスケールの説明を行った。ここで、表-1に各スケールの特徴を表す一般的な物理因子と波立ちをまとめたものを示す。

ここで、表に示すように、物理因子と波立ちともに、各スケールはその上位スケールの構成要素になっており、スケール間でも縦の関係性があることを考慮する。そこで研究の手順としては表の矢印のように、まずユニットスケールにおける物理因子の異なる、複数の早瀬に対して現地観測を行い、サブユニットスケールにおける波立ちが各物理因子によってどのように区分されるか調べることから始めた。その際、ユニットスケールで早瀬を表す物理因子としては、上流からの土砂供給量に影響され

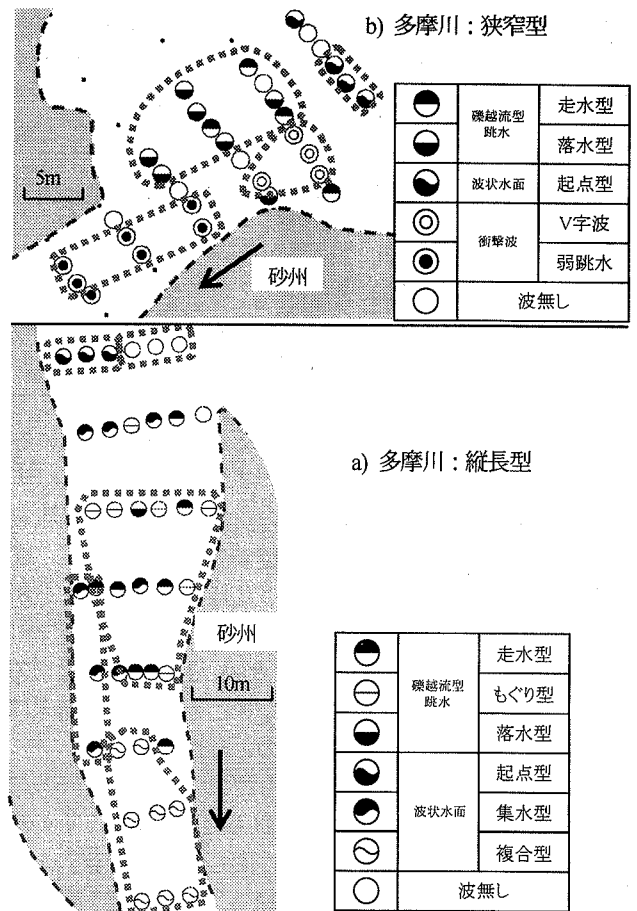


図-5 波立ちの分布 (他の2箇所は省略)

る平面形状²⁾が適切であると考え、波立ちの多様性から、本研究では対象を狭窄型と平行縦長型に絞った。

現地観測は図-3に示すように多摩川中流部を中心として、波立ちパターンの異なる4つの早瀬を対象とした。サブユニットスケールにおける物理因子及び波立ちの把握の仕方は、各早瀬において等間隔に測点を設定し、各点における様々な物理環境の観測を行い、それらを平面状にプロットしたときの物理因子や波立ちのまとまりをサブユニットとして理解するものとする。各測点における観測内容を以下に列挙する。

- ・ 地形、平板測量、流速、水深測定
- ・ 測点を中心として60cm方形枠内で、片手で掘り起こせる中間径10cm以上の表層礫の採取、径測定
- ・ 自作道具を用いた各測点付近の河床凹凸調査(諸事情により五日市狭窄を除く)
- ・ 各測点周りでどの波立ちが優占しているか調査

なお、自作道具による観測風景を結果の一例とともに図-4に示す。測点間隔は10cmで流下方向に150cm分の水位と河床高を計測してある。

ここで物理因子の結果については省略するが、波立ちの分布について、図-5にその例を示す。すると図を見てもわかるように、各波立ちがまとまりをもって存在している。この1つ1つのまとまりが波立ちのサブユニットであり、それらが早瀬における波立ちパターンを構成し

ている。このように類型化できる理由は、波立ちの発生要因である何らかの物理因子も、波立ちと同じような分布のサブユニットを持っているからと考えられる。

4. 物理因子による波立ちの分類 (subunit scale)

波立ちパターンは波立ちのサブユニットから構成されていることから、サブユニットスケールの波立ちと物理因子の関係性を示すことが本研究で最も重要な部分と言える。そこで、前節の最後で説明したように、ここでは波立ちがどのような物理因子によって支配されているかを、現地観測で得られた結果に基づき考えることにする。

波立ちを支配する物理因子の条件としては、流れを規定する要素と河床の状態を規定する要素から成り、また複数の早瀬間で比較できるように無次元であることが望ましい。この条件にあてはまるものとして本研究では、まずはFr数と相対水深 h/d (h : 水深, d : 礫径)が適切であると考えた。Fr数は流れの勢いを、相対水深は河床による流れへの影響具合を表すものとする。

そこで、これらを軸としてサブユニットスケールにおける波立ちを分類することを試みた (図-6)。その結果、衝撃波関連のV字波や弱跳水に関しては他の波立ちと区分することが出来たが、それ以外については明確に区分することができなかった。また、V字波と弱跳水を明確に区分するにはこのままでは不十分である。これは、例えば同じようなFr数や相対水深の条件を与えても、それ以外の物理因子の条件を与えることで波立ちが区分されることを示唆している。そこで、その条件を得るために、各波立ちの発生要因をサブユニットスケールより下位のポイントスケールで考察することにした。

まず、礫越流型跳水に関しては筆者らの研究³⁾により、発生要因として礫前後の水位差が重要であることが示されている。V字波についても、これを実験水路で人工的に発生させた結果、礫越流後の擾乱が左右に広がって伝わるためには礫前後の水位差が必要であることがわかった。この水位差というのはポイントスケールにおけるものであるが、ポイントスケールにおける物理因子はサブユニットスケールにおける物理因子によってある程度規定されることを考えると、ポイントスケールにて水位差を発生させるようなサブユニットスケールの物理因子は、現地河川の現状とも照らし合わせて「水面勾配」および「礫の突出具合」と考えた。すなわち、サブユニットスケールにおいて水面勾配や礫の突出具合が大きいような空間は、ポイントスケール (礫前後) で水位差がつきやすいと考えられる。

また、波状水面に関しても例えば起点型と複合型の違いは、その発生要因からも分かるように礫の突出具合であると推測される。したがって、Fr数と相対水深に加えて新たにこれらの物理因子を加える必要があるが、その

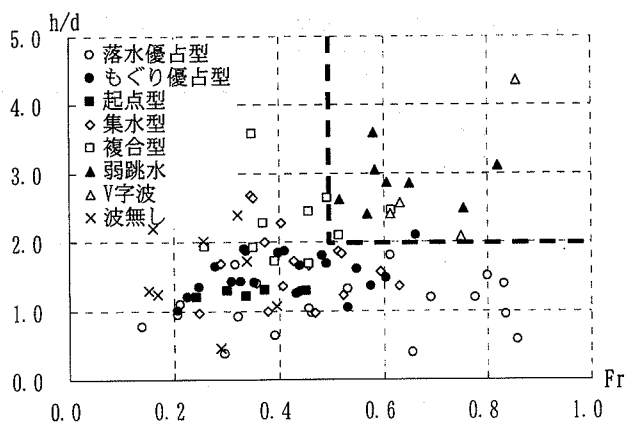


図-6 Fr数、相対水深と波立ちの関係

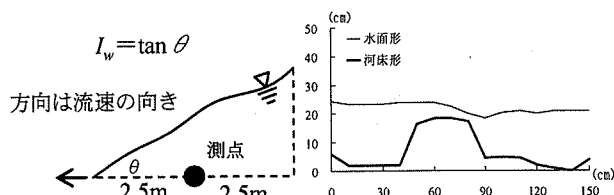


図-7 水面勾配、礫突出率について

前に水面勾配や礫の突出具合を本研究で新たに定義する必要がある。

そこで水面勾配については、各測点の縦断方向の間隔を考慮し、測点を中心として前後2.5mの長さに対して水面がどれだけ変化したかを観測結果より得られる水面コンター図より読み取り、それを水面勾配 I_w とした。また、礫の突出具合に関しては、図-7に示すように現地観測にて河床の凹凸を各ポイントで計測したので、その凹凸の最大値 d_p を平均水深 h で割ったものを礫突出率として定義した。この値は各測点で得られるものであるが、この意味はあるサブユニットにてどれくらい (全体的に) 突出した礫の存在割合が大きいということであり、決してポイントスケールにおける礫の突出具合の指標でないことに注意する。

以上より、サブユニットスケールにおける波立ちの物理指標をFr数、相対水深、水面勾配、礫突出率の4つ示した。これらを用いて、ある波立ちが存在している空間の物理因子がどの範囲にあるかということを示したものを図-8になる。図は範囲として現地観測にて得られた値の最大値、最小値、それに平均値を示している。ただし、サンプル数は各波立ちで異なり、起点型の相対水深や、弱跳水、波無しの礫突出率に関してはサンプル数が少なかったため範囲が狭くなっている。

この図より、各波立ちが生じている空間がどのような環境にあるかということがある程度把握できる。そして、図-9のようにサブユニットスケールにおける波立ちは各物理因子によっておおよそ分離することができる。しかし、このような現地観測に基づく分析は、各波立ちが生じる物理因子の範囲を示した、すなわち各波立ちが生じる必要条件を示したに過ぎず、逆にある物理因子の条件を与えたときに生じる波立ちが何であるかを示したこと

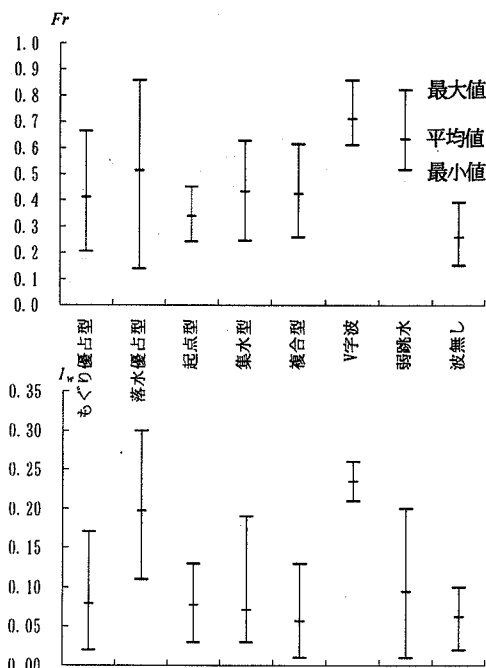


図-8 現地観測に基づく、各波立ちが生じる各物理因子の範囲

にはならない。そして、それを示すことによって始めて波立ちと物理因子の関係を把握したと言えるであろう。

5. 物理因子と波立ちの関係 (まとめ)

本研究では時間と設備の都合上、図-9の右下にある波立ちの区分が特に困難であったもぐり優占型と起点型、それに複合型と波無しに関して、どのような条件を与えれば各波立ちが生じるかということを説明するために簡単な水理実験を行った。

実験の概要について、複合型（波状水面）と波無しに関しては水路に一樣な礫（中間径7.8cm）を敷き詰め、そこでFr数と水深の条件を変えて、波無しと複合型の区別がどこにあるのか考察した。また、もぐり優占型と起点型に関しては、先の礫を敷き詰めた状態に突出した礫の代わりとなる障害物を置き、その高さを d_p として実験を行った。そしてFr数と礫突出率を d_p/h を変化させることにより2つの波立ちの区別に関して考察した。それらの結果を図-10に示す。

まず、a)の結果に関して、波無しと複合型を区別する条件は「Fr数が大きい」、もしくは「相対水深 h/d が小さい」といった独立した条件ではないことがわかる。そこで視点を変えて、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⁴⁾（本研究ではAiry条件とする）

$$Fr = \sqrt{\frac{\tanh kh}{kh}} \quad (1)$$

を考える。ただし、 k は波数で、グラフでは平均礫径 d が実験に即して7.8cm、波長が10cmの場合のAiry条件を示してある。これが意味するところは、河床の平均的な礫径が7.8cmの場合において、波長10cmの波（曲線より右

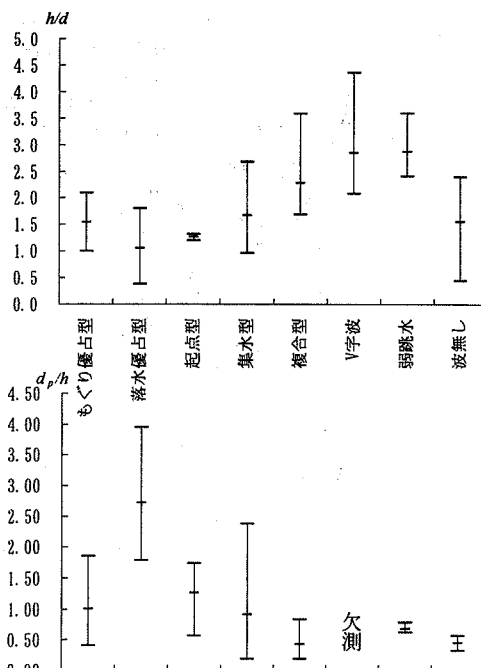


図-9 各物理因子による波立ちの分離

上)は安定して定在するが、その波長を越えるような波は波速より流速の方が大きく、従って、複合型の説明でも書いたように安定せずに存在する。また、10cm以下の波はその波自体が消滅し、波無しの状態になるということである。したがって、現地の河川においてもあるAiry条件によって波無しと複合型が区別されることが示唆される。また、もぐり型と起点型の実験においても図の点線で示すような境界によって波立ちが区分されている。これが意味するところは、Fr数が大きいほど、もしくは礫突出率が大きいほど波無しから起点型、もぐり型に遷移することを示している。

ここまで観測・実験結果を通じて波立ちと物理因子の関係を示してきた。そこで、まとめとして波立ちと物理因子の関係を系統的にまとめたものを図-11に示す。

まず、礫突出率を考慮する必要のないものに関して、V字波と弱跳水はFr数と相対水深に加えて水面勾配を加えることにより区分される。また、複合型と波無しに関しては実験結果を通じてあるAiry条件によって区分される。次にそれ以外で礫突出率が2.0以上のものは落水優

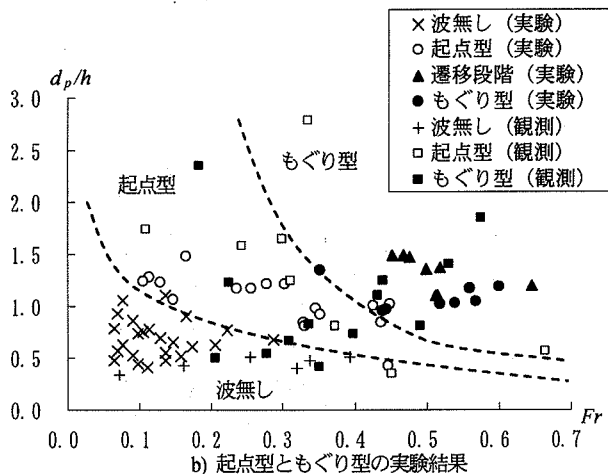
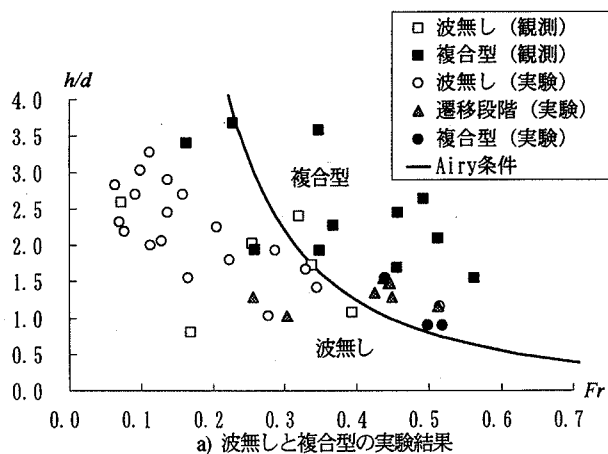


図-10 各実験結果 (現地観測の結果を含む)

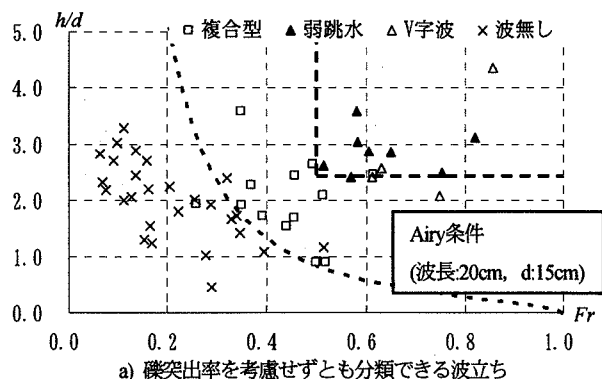
占型のみが属する。また、残るもぐり優占型と起点型については実験結果も踏まえ、およそFr数が0.45を基準にして区分される。ただし、礫突出率が0.5未満のものに関しては礫が突出していないとみなしている。

このようにして、現地観測と水理実験の両側面から波立ちが生じるための各物理因子の必要十分条件を提示できるものを説明した。ただし、例えば弱跳水に関しては、先に挙げた条件の他に川幅水深比であるアスペクト比の条件が必要であると考えられるし⁵⁾、今回、集水型に関しては発生条件を明確にすることができなかった。しかし、波立ちパターンはサブユニットスケールにおける波立ちから構成されていることから、図-11に示すような波立ちと物理因子の関係を示したことで、早瀬の物理環境を波立ちパターンを通じてある程度把握することが可能になったと言える。

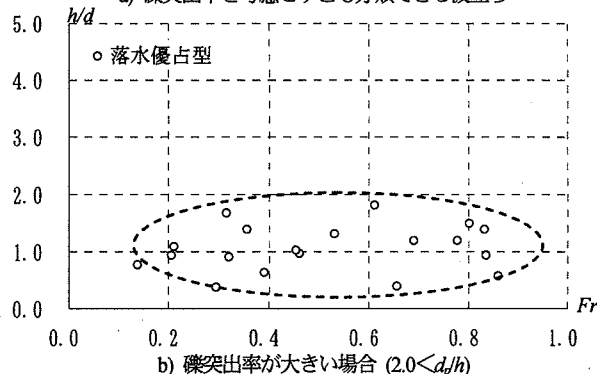
6. おわりに

本研究を通じて行ったこと、成果は以下に集約される。

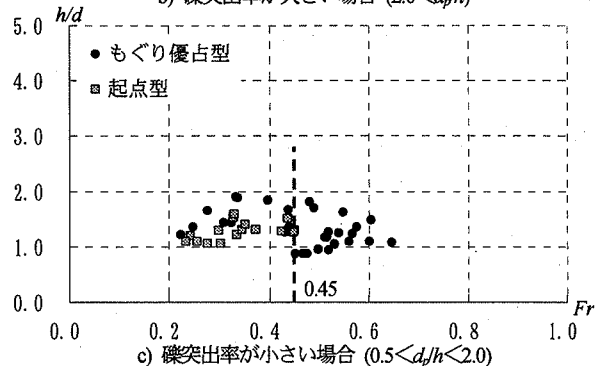
- ・早瀬景観の主たる要素である「波立ち」を、早瀬の物理環境を把握する新たな指標として位置づけた
- ・波立ちと物理因子の関係をスケールの階層性という観点から研究し、その関係性を明らかにした。
- ・早瀬における波立ちパターンを通じて、早瀬の物理環



a) 礫突出率を考慮せずとも分類できる波立ち



b) 礫突出率が大きい場合 ($2.0 < d_p/h$)



c) 礫突出率が小さい場合 ($0.5 < d_p/h < 2.0$)

図-11 波立ちと物理因子の関係 (まとめ)

境をおおよそ把握することができるようにした。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、とうきゅう環境浄化財団の研究助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 知花武佳, 辻本哲郎, 玉井信行: 物理環境の階層構造を考慮した魚類生息場評価法の開発, 水工学論文集, 第48巻, 2004
- 2) 知花武佳, 岡田久子, 鈴木一平, 岡滋晃, 辻本哲郎, 玉井信行: 形状に基づく早瀬の分類とFr数分布に関する基礎的研究, 応用生態工学会第6回研究発表会講演集, pp. 51-54, 2002
- 3) 岩本秀仁, 知花武佳, 辻本哲郎: 波立ちに着目した早瀬の環境特性に関する基礎研究, 応用生態工学会第8回研究発表会講演集, pp. 117-120, 2004
- 4) 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
- 5) 後藤浩, 安田陽一, 大津岩夫: 波状跳水の形成条件に対するレイノルズ数・アスペクト比の影響について, 水工学論文集, 第43巻, pp.299-304, 1999

(2005. 4. 7 受付)