

河床における諸種の長波長うねり現象について

On Bed Undulations With Long Wavelength Found In Rivers

北海道大学工学部
北海道大学大学院

○学生員 杉本 光 (Hikaru SUGIMOTO)
正会員 長谷川和義 (Kazuyoshi HASEGAWA)

1. はじめに

河川形態の特徴的スケールを考える場合、小さいものから順に粒径、水深、小規模河床波(砂漣・砂堆)形状、川幅、中規模河床波(交互砂州)形状、流路蛇行長、谷幅などが挙げられ、現象を代表するものとして利用されている。しかし、これらのほかに、さらに大きなスケールの形態の存在が木下¹⁾によって指摘されている。その一つは、すでに50年前扇状地を流れるサビ川において見出されたもので、4度の洪水前後における横断河積の差に測線間隔を乗じて求めた河床砂礫増減の流下方向変化が、平均2600mの波長をもって周期変化を示すことを指摘し、後に「掃流うねり」と名づけられた(図-2)。木下²⁾は、うねりの波長が河道内の砂礫堆(交互砂州)長のおよそ6倍になっていること、川幅の広狭変化にも対応していることを指摘している。ごく最近、木下³⁾は利根川下流部87km区間における平成10年洪水前後の河床横断測量の結果から河床砂礫増減を求め、波長6~7kmの美しい周期変化を示すことを見出し、掃流うねりが扇状地河川に特有なものではないことを明らかにしている(図-3)。その二は、同じく木下¹⁾によって指摘された「大蛇行」と呼ばれる形態であり、主に扇状地河道に見られ砂礫堆の4~7倍の波長をもっている。掃流うねりとの関連が指摘されている。

一方、長谷川ら⁴⁾は山地河川の河床形状を測定し、諸種の河床形態の中に大規模波と呼称される砂礫堆長の数倍の起伏があることを見出している(図-1)。また、加治ら⁵⁾は、非砂州条件にある浮遊砂の卓越する非定常流実験において水路幅の30倍を超える長波長河床波の成長を認めており、これらの起伏上には6個程度の砂堆が重畳している(図-4)。

このように、長波長の河床起伏・うねりは山地河川、扇状地河川、低平地河川のいずれにも存在するようであり、また砂州の有無によらないもののように見える。しかし、これらの成因についてはまったくといってよいほど不明であり、同一の成因か否かも明らかでない。本研究は、上述の例を含むさまざまな野外観測・実験データをもとに、MEMによるスペクトル解析によって卓越波長を見出し河床の形態学的な性質を調べようとするものである。成因解明の一助にしたいと考えている。

2. 長波長うねり現象の例と使用データ

(1) 図-1は1989年7月に測量された白水川上流の河床縦断変化図で、平均勾配を差し引いて描いてある。図中の細かい波が階段状の小規模河床波であり、この小規模波がいくつか集まって波長30~50mの波を形成しているのがわかる。

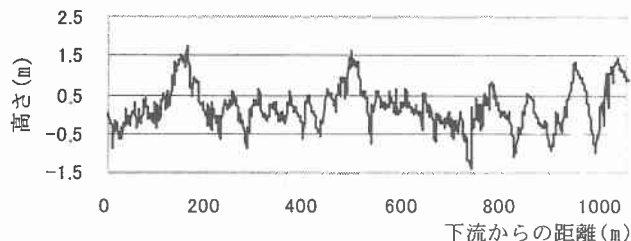


図-1 白水川河床縦断変化図

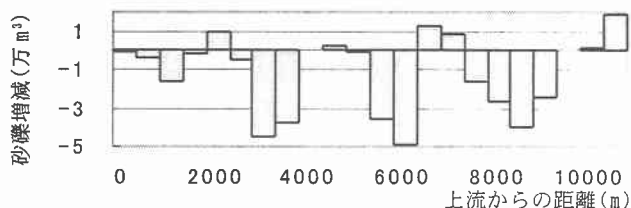


図-2 サビ川河床砂礫増減変化図

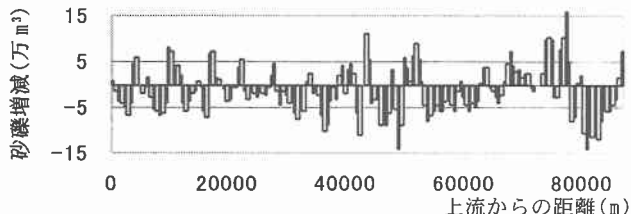


図-3 利根川河床砂礫増減変化図

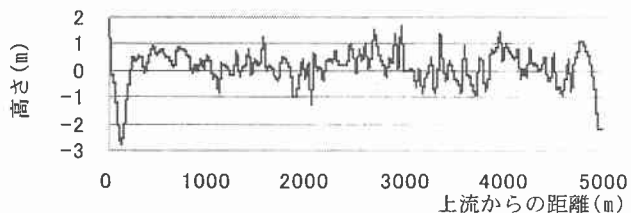


図-4 浮遊砂実験河床縦断変化図

これが中規模波である。これらが5~7波集まって長波長の波の形づくられている様子がわかる。

(2) 図-2は1947年8月と1950年11月に測定された河床形状から求められたサビ川の河床砂礫増減変化図である。この間にカサリン、アイオン、キティの各台風と長雨による4度の洪水が生じている。

(3) 図-3は1995年と1998年に測定された河床形状から求められた利根川下流の河床砂礫増減変化図であり、6~7km程の波が明瞭に現れている。

(4) 図-4は1996年に北海道開発局・開発土木研究所が実施した、50m水路による浮遊砂をとまなう洪水流実験の河床縦断変化図で、平均勾配を差し引いて描いてある。2m程度の起伏とそれらが6個程度集まって形成された10m程度の長波長の存在がわかる。

(5) このほかに解析に用いたデータは表-1に示す4例であ

表-1 解析に用いたデータ

	測量年	区間長	データ間隔	流路幅	谷幅	文献
白水川河床高（全流路幅）	1989	1054m	不等（平均1.9m）	37.75m	60.55m	4）
白水川河床高（主流路幅）	1989	1054m	不等（平均1.9m）	10.58m	60.55m	4）
小川河床高	1986	1005m	不等（平均4.0m）	8.41m	21.49m	4）
サビ川河床高Ⅰ	1947	17500m	500m	124.00m	220.27m	2）
サビ川河床高Ⅴ	1950	17500m	500m	140.00m	247.73m	2）
サビ川河床砂礫増減Ⅰ-Ⅴ	1947-1950	17500m	500m	132.00m	234.00m	2）
利根川河床砂礫増減	1995-1998	86500m	500m	346.00m	557.21m	3）
大井川河床高	1974	24800m	200m	160.00m	800.00m	6）
浮遊砂実験河床高	1996	49.5m	3m	0.30m	—	5）

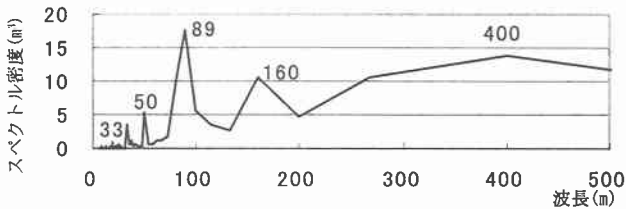


図-5 白水川データに対するスペクトル密度（ $m=38.0\%$ ）

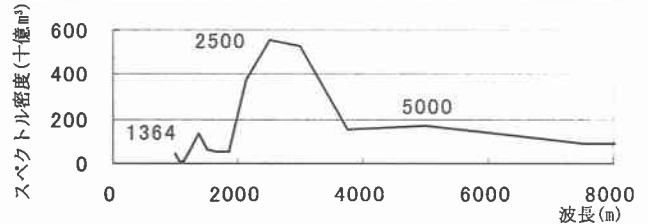


図-6 サビ川データに対するスペクトル密度（ $m=68.2\%$ ）

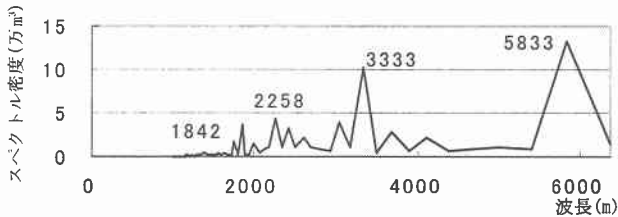


図-7 利根川データに対するスペクトル密度（ $m=40.2\%$ ）

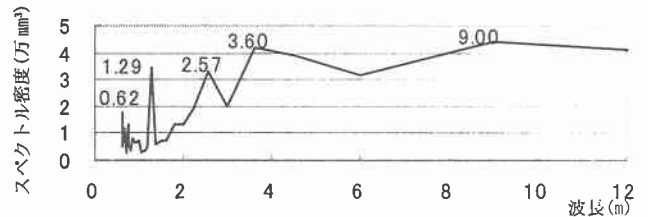


図-8 浮遊砂実験データに対するスペクトル密度（ $m=18.1\%$ ）

り、出典とともに掲げる。

3. スペクトル解析による卓越波長の推定

本研究においては、スペクトル解析の方法としてMEMを用いた。MEMは従来のスペクトル推定法に比べて、①短いデータからもスペクトルの推定が可能、②スペクトルの分解能が極めて高い、という圧倒的な優秀性をもっているといわれている⁷⁾。

(1) スペクトル解析結果の例

図-5は予測誤差フィルターの項数 $m=38.0\%$ にとったときの図-1の白水川に対する結果であり、400m、160m、89m、50m、33mという波長が卓越していることがわかる。同様に、図-6はサビ川($m=68.2\%$)、図-7は利根川($m=40.2\%$)、図-8は浮遊砂実験の結果($m=18.1\%$)であり、それぞれ複数列の卓越波長が見て取れる。

(2) 卓越波長による形態分類

交互砂州の波長 λ は、以下のような幅をもって流路幅 B に比例していることが知られている。

$$\lambda = (2 \sim 10) B$$

図-9は、流路幅と卓越波長の関係を描いたものであるが、上式の範囲内に存在する波長を中規模波長、それより上方に位置する波長を大規模波長として区分し、各範囲内に複数の波長が存在する場合はそれらの平均値をその河川の中規模波長・大規模波長とした。さらに、横軸に中規模波長、縦軸に大規模波長をとると図-10に見られるような相関があり、大規模波長と中規模波長の比の平均値は3.53とな

り、当初予測した6倍という値は得られなかった。

(3) 大規模波長と谷幅の関係

図-11は谷幅 W と大規模波長に分類された波長との関係を見たものである。図中には、 $\lambda = (2 \sim 10) W$ の関係線も描かれている。図-11より大規模波長の多くが上式の範囲内に存在することがわかる。このことから大規模波長が谷幅いっぱいにも流れる大洪水時に形成された交互砂州ではないかという疑問が生ずる。しかし、MEMによる解析が正しく形態ごとの代表波長を捉えているかどうか不安もある。以下にこの点を検討する。

4. MEM についての検討

(1) 模擬データの発生と m 値の検討

MEMによるスペクトル計算において、予測誤差フィルターの項数 m を決定するとき、スペクトルの精度を保つためには $m = (2 \sim 3) N^{1/2}$ (N : データ数) 程度でなければならないとされている。しかし、この範囲で m を決定すると大規模波長を捉えきれないことがあるので、今回の解析においては m の値を大きくとったものもある。一方、砂礫堆の長さは、同一条件下の流れにおいてもさまざまな値をとることが知られている。図-12は木下⁷⁾によって得られた一定条件下の砂礫堆長の頻度分布である。ここではこの結果にガンマ分布をあてはめ、検討をおこなう。

図-12中に平均62cm、標準偏差13.3cmとして、ガンマ分布をあてはめ、密度関数 $f(\lambda)$ とした。結果を併示する。密度関数 $f(\lambda)$ を積分することによって分布関数 $F(\lambda)$ を求めたものが図-13である。縦軸に対して0～1の乱数を与えて

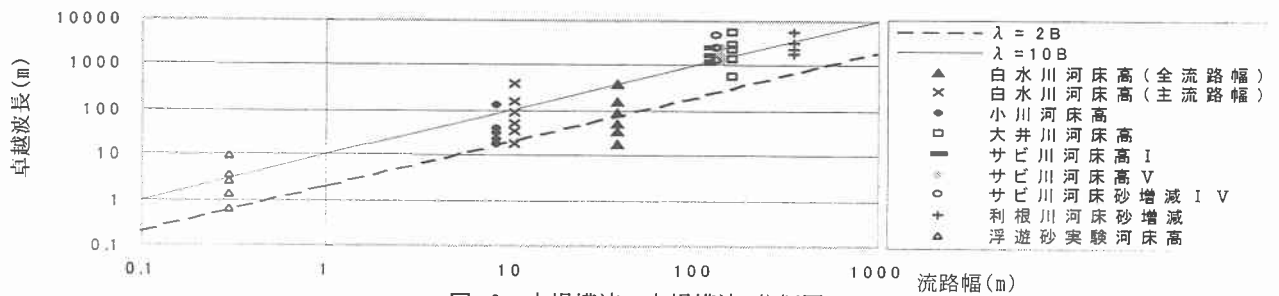


図-9 中規模波・大規模波 分類図

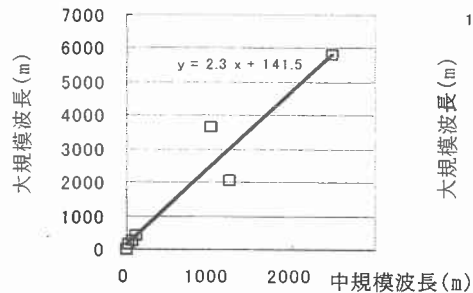


図-10 中・大規模波 関係図

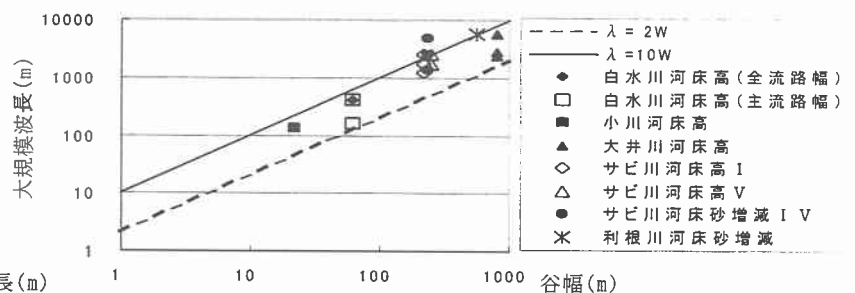


図-11 大規模波・谷幅 関係図

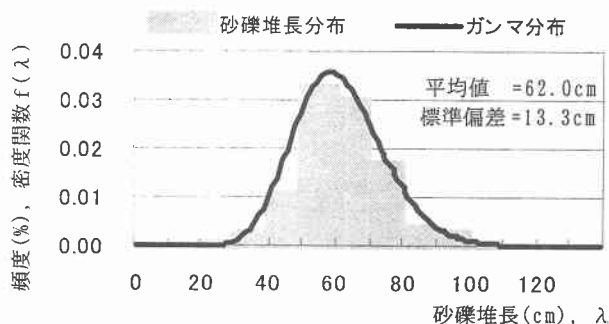


図-12 ガンマ分布 密度関数

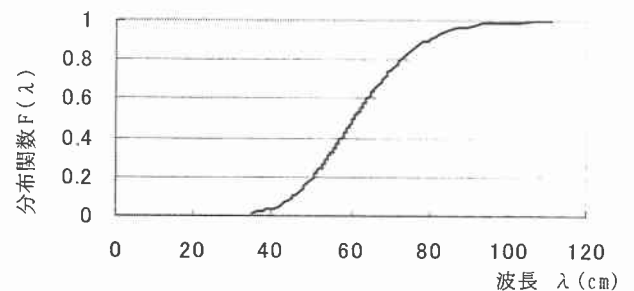


図-13 ガンマ分布 分布関数

$F(\lambda)$ を決定し対応する波長 λ を求めると、砂礫堆長に関する標本が得られる。この波長を用い、波形勾配が 0.1 であるものと仮定して次式により波形を求め、100 波長分の波形をつなげて描いたものが図-14 である。

$$\eta = 0.1\lambda \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}s\right)$$

ここに、 η は波形、 s は距離である。同様に、500 波長、1000 波長分の波形についても検討してみた。図-15 は 100 波長の波形に対するスペクトル密度を示す。また、これら 3 種類の波について m に様々な値をとってスペクトル解析した結果を図-16 に示す。横軸は m をデータ個数 N にて除して % 表示したものであり、 m の違いによる卓越波長の違いはほとんど見られない。また、このシミュレーション解析による限り、卓越波長は最頻波長ではなく平均波長に近いものとなることがわかった。

(2) 規則性をあたえたデータの性質

(1) のガンマ分布を用いた検討において、標本波長を短波長群と長波長群に分け、それぞれの群から短波長を 6 波、長波長を 6 波ずつ順にとり出して並べ替えると図-17 のようになる。この系列に対してスペクトル解析を行うと図-18 のようになる。卓越波長には平均波長の 6 倍のスケールのは現れない。これは、複数のスケールの卓越波長が存在するのは、規模の異なる波長が足し合わされている、つまり大規模波の上に中規模波が乗っているような場合であ

ることを示している。

5. 考察

MEM による解析が妥当であるならば、3 節における推察、すなわち長波長の起伏・うねりは大規模な出水時に形成された交互砂州であるということになる(流量説)。ごく最近、目黒ら⁸⁾は山地河川における大規模波が大流量時に形成された複列砂州であるとの仮定のもとに実験をおこない、その上に小流量通水を重ねて図-1 によく似た河床状態を得ている。しかし、この説による限り図-4 のような非砂州実験の結果は説明できないほか、木下による 6 倍の指摘も偶然の結果ということになる。木下の文献ではサビ川の砂礫堆長は 500m 前後となっており、また利根川における砂礫堆長は 1km 程度と指摘されている。両川のデータとも測線間隔が 500m となっているため、スペクトル解析で捉えきれなかった可能性が高い。川幅をどのようにとるかという問題や、川幅のみからスケールを分類する方法についても吟味が必要であろう。

図-1 から図-4 の形態がすべて洪水流のもとで形成されているということも重要である。上述の流量説とは別に、非定常性が要因となって引き起こされる独自の現象が考えられる。渡邊は、河床不安定解析において非定常性の影響を時間積分の形で導入した場合、定常の場合よりかなり長い波長

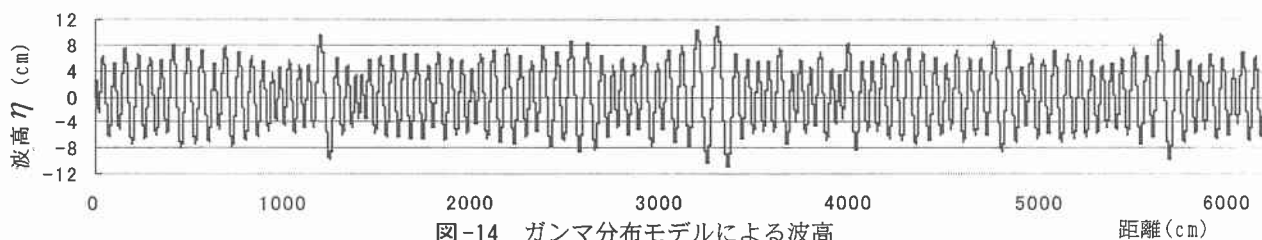


図-14 ガンマ分布モデルによる波高

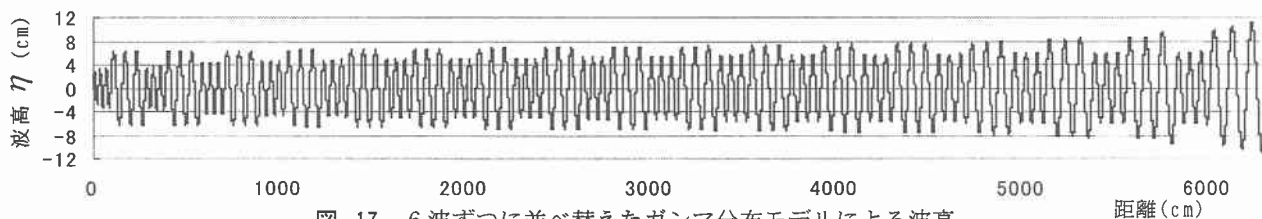


図-17 6波ずつに並べ替えたガンマ分布モデルによる波高

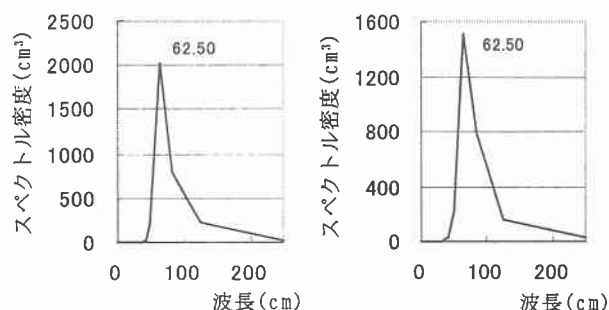


図-15 模擬データに対する
スペクトル密度

図-18 模擬データ(並べ替え)に
対するスペクトル密度

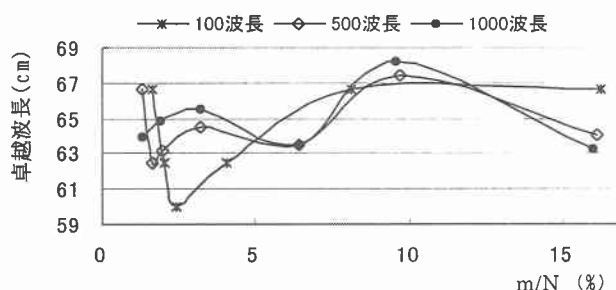


図-16 卓越波長と予測誤差フィルター項数 m の関係

の河床波が成長する結果になることを指摘している(非定常説)。

しかし、この説でもすべて説明しうるわけではない。木下²⁾は、砂礫堆走時曲線の説明において、定常流の実験においても砂州の成長が早く動きが活発な場所と発達が遅れ消滅が起こりやすい場所があり、長い水路ではそれらが交互に起こること、この現象が掃流うねりに関係している可能性があることを指摘している。4. (2)に示したように、長波長の波は独自の起伏をもっていなければスペクトルにそれという形であらわれない。定常流においても独自の長波長起伏が生じていたと判断するべきであろう(独立成因説)。

現在までの知見をもとに判断する限り、河川に見られる長波長のうねりは単一の成因によるのではなく、複数の異なる成因によってそれぞれに生じている可能性がある。今後、より立ち入った解析をおこない成因を明確にするとともに、これらの起伏がもたらす工学的問題を明らかにしたいと考える。

6. おわりに

- (1) スペクトル解析によって得られた卓越波長を、川幅のみの基準によって交互砂州の範囲で分類したとき、大規模波長は中規模波長の3.53倍となり、6倍にはならなかった。
- (2) 模擬データによる m 値の検討の結果、 m 値の違いによる卓越波長の違いはほとんど見られなかった。
- (3) 規則性をあたえたデータをスペクトル解析した結果、複数のスケールの卓越波長が現れるのは、スケールの異なる波長をもった波が和のかたちで存在している場合であるこ

とがわかった。

- (4) 長波長うねりの成因は複数存在していると考えられるが、今回の解析では「流量説」を裏付ける結果となった。
- (5) 測線間隔が砂礫堆長に近いデータを用いたものがあつたため、十分なスペクトル解析結果が得られなかった。

参考文献

- 1) 木下良作：石狩川河道変遷調査，科学技術庁資源局資料第36号，1961。
- 2) 木下良作：同上参考編
- 3) 木下良作：洪水流観測の一つの試みとその考察，第18回河川セミナー講演集別刷り，2000。
- 4) Hasegawa, K., A. Mori and S. Ishikawa: Bed topographies and sediment transport during flood in mountain rivers, Int. Cont. RIVER FLOOD HYDRULICS, (Ed. by W.R. White), John Wiley & Sons, pp.327-336, 1990。
- 5) 加治昌秀・渡邊康玄・長谷川和義・市埜順也：浮遊砂が卓越する河川の河床変動に関する実験，土木学会北海道支部論文報告集第53(B)，pp.172-177，1997。
- 6) 木下良作：大井川牛尾狭窄部開削の影響に関する「砂礫堆相似」による模型実験，建設省中部地方建設局静岡工事事務所，1980。
- 7) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1996。
- 8) 目黒嗣樹・長谷川和義・大塚剛史・竜澤宏昌：山地河川に見られる大・中・小規模共存河床形態の再現実験，水工学論文集第45巻（登載決定），2001。