曲率によるリップル形態の解析：複合流リップルの例

井出 典孝*・横川 美和*・佐伯 和人**

Morphological analyses of ripples using curvature distribution: A case of combined-flow ripples in a flume

Noritaka Ide*, Miwa Yokokawa* and Kazuto Saiki**

Curvature profiling software used in this study adopts cubic parametric spline function. Three types of ripples such as wave ripples and two kinds of combined-flow ripples with adverse currents and favorable currents, respectively, were formed in a recirculating flume with a wave generator. These bed forms were investigated.

Wave ripples are characterized by symmetric profiles, while current ripples by asymmetric profiles. Some combined-flow ripples are symmetric profiles other are asymmetric. Both of symmetric and asymmetric combined-flow ripples have rounded profiles. Ripple Index (RI) and Ripple Symmetry Index (RSI) have been known for the distinction of morphology of ripples. But there is no good index for representing the roundness. In this paper, distribution profiles of curvature are calculated to distinguish the combined-flow ripples from wave ripples. Results from investigating morphological feature of combined-flow ripples are presented as examples.

The results of analyses were that it is possible to distinguish differences of these ripples by calculating distribution profiles of curvature. Consequently it turned out for the first time that stoss sides of combined-flow ripples with favorable currents became longer than lee sides as relative magnitude of unidirectional velocity to oscillatory velocity became higher, while combined-flow ripples with adverse currents kept symmetric profiles of ripples.

Key words : combined-flow ripples, curvature, ripple profiles, Ripple Index, Ripple Symmetry Index, wave ripples

はじめに

リップルには、それをつくる流れのタイプによっ

受付：1999年2月17日 受理：1999年4月12日

* 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻

Department of Earth and Space Science, Graduate
School of Science, Osaka University, Osaka 560-0043,
Japan

** 秋田大学工学資源学部附属素材資源システム研究施設

Research Institute of Materials and Resources, Faculty
of Engineering and Resource Science, Akita University,
Akita 010-8502, Japan

て、ウェーブリップル、複合流リップル、カレントリップルと大きく3つのタイプがあり、それぞれ特徴的な形態をもつ。また、リップルの形態は、それを作る流れの流速や堆積物の粒径を反映するので、地層から古水理条件を読み取る道具として使われている（例えば、増田・牧野，1987；横川ほか，1992）。

それらのリップル形態を区別する指数として、リップル指数（Ripple Index, 以下 RI と略す）、リップル対称度指数（Ripple Symmetry Index, 以下 RSI と略す）（Tanner, 1967）がよく知られている。

もともと RI および RSI はウェーブリップルとカレントリップルを区別するために提唱された指数で、波と流れが同時に作用する複合流リップルを他の2者から区別するには不十分である。例えば、Boersma (1970) は、RI が4.0以下ならウェーブリップル、15.0以上ならカレントリップル、RSI が2.5以下ならウェーブリップル、3.0以上ならカレントリップルと分類している。Harms (1969) の実験的研究では複合流のうち流れの方向と波の伝播方向が同じである順方向複合流リップルを形成しているが、その RI は6.20から11.0、RSI は1.57から2.17に分布する。また、Yokokawa (1995) の実験では逆方向複合流リップルの RI が5.15から7.13、RSI は1.10から2.17であり、ウェーブリップルの RI は5.42から6.80、RSI は1.10から1.41で、RI と RSI ではウェーブリップルと複合流リップルは区別がつかないことが指摘されている。複合流リップルの特徴は、順方向複合流リップルでも逆方向複合流リップルでも、断面形が丸い上に凸の形を示すことである。そこで他のリップルと区別するために丸さを表す指数を作りリップルの形態を表現することを試みた。

リップルの形を特徴付けるものとして曲率を考えた。曲率とは、曲線上の各点における曲線の曲がりの程度を示す値で、曲率半径の逆数で与えられる。曲率が大きいのほど湾曲は大きくなる。解析には、曲率計算のために Saiki (1997) によって開発されたソフト“Curvature Profiler (C-Pro)”を使用した。解析の原理は、任意の曲線を3次スプライン関数で近似し、その関数から曲率を計算するというものである。ここでは、実験水槽で作られたリップルの形状を曲率解析した例を紹介する。

実験方法

大阪大学大学院理学研究科の造波機付循環水路を使って実験を行った。水路（片面ガラス張り）は、長さ10m、高さ50cm、幅20cm で、造波装置と流れを起こす循環ポンプがついている。

実験は水路に砂（平均粒径0.2ミリ）を敷き底面を平らにしたのち、水を入れて、造波機とポンプで波と流れを発生させリップルを作る。波だけで形成されたウェーブリップルと、波の進行方向に逆らって流れを加えた条件下で作られた逆方向複合流リップル（以下、逆方向リップルと略す）、さらに波の進行方向にそって流れを加えて作られた順方向複合流リップル（以下、順方向リップルと略す）の各断

第1表 曲率解析したリップルの形成条件.

形成されるリップル	最大振動流速 U_w (cm/s)	一方向流速 U_c (cm/s)	流れの相対的強さ U_c / U_w	結果の図
ウェーブリップル	18.7	0	0	第3図
逆方向リップル	21.3	12.3	0.58	第4図(a)
逆方向リップル	7.7	19.2	2.49	第4図(b)
逆方向リップル	11.2	31.5	2.81	第4図(c)
順方向リップル	21.9	11.7	0.53	第5図(a)
順方向リップル	27.7	19.9	0.72	第5図(b)
順方向リップル	14.7	22.0	1.50	第5図(c)

面形をカメラで撮影した。解析に使ったリップルの形成条件は、第1表の通りである。最大振動流速 (U_w) に対する一方向流速 (U_c) の大きさの比（第1表の流れの相対的強さ U_c/U_w ）が異なるように三段階の条件を選んだ。撮影した画像をパソコンに取り込みリップルの断面形がわかりやすいように画像処理してその形状を曲率解析した。

曲率解析

xy平面上のある点での曲率 κ は次式で与えられる無次元数である。

$$\kappa = (y''x' - x''y') / (x'^2 + y'^2)^{1.5}$$

ここで、 x , y は曲線の媒介変数 (t) で表された関数とし、 x , y の右肩の “'”, “''” はそれぞれ t による1階、2階の導関数とする。

今回解析に使った C-Pro のプログラムは曲率測定を効率良く行うために、取り込んだ曲線の画像をパラメトリック3次スプライン関数でフィッティングする方法を採用している。まず始めに、入力としてデータの標本点 (x , y) 座標をあたえる。標本点のうちの適当な間隔で点を抽出し、その点列をノット（節点）とよぶ。各ノット間を3次関数で補間する（第1図(a)）。このとき、1階、2階までの導関数が連続という条件をつけると各ノット間ごとにユニークな3次関数が決定する。その関数から上式のような計算式を用いて各点における曲率を求める。

第1図(b) は正弦波形（第1図(a)）を例として、C-Pro でノットごとに曲率を計算しグラフにしたものである。なお曲率が正の時は曲率解析した図形が上に凸、負の時は下に凸であることを示す。曲率が0の点は、曲線がその点において直線であることを示す。

リップル断面の曲率解析の手順を以下に示す。

第1図 曲率解析の手順。(a) 正弦波の波形(網線)をデジタル化したピクセルを間引きしてスプライン関数で補完する(実線)。○は、間引きして取り出されたノット。(b) ノットごとの曲率。曲率が正(負)とは曲線が上(下)に凸であることを示す。(a)で縦線より外側の直線部分(ノット0および15)は曲率解析(b)には含まれない(本文参照)。

(1) リップル1波長の断面形をスキャナでとりこみ、白黒に2値化したデジタル画像に変換する。曲率は曲線上の各点に接する円の半径の逆数なので、例えば同じ円でも半径1 cm と半径5 cm のものでは半径1 cm の円の方が曲率が大きくなってしまふ。このことは、リップルの大きさの違いによっても生じ、同じリップルでも解析する画像の大きさによって曲率解析の結果が異なってしまう。そこで、リップルの波長を1.0という長さ揃えに揃えることで規格化を行う。第2図は波長の異なるリップルの比べ方を簡単な正弦波の例で表したものである。このように実際の解析では、波長の異なるリップルを全て同じ波長に規格化してから曲率解析を行っているの、曲率の絶対値を使って形を相対的に比較することができる。

第2図 曲率分布比較のための規格化。波長と振幅の異なる二つの正弦波(a)の曲率を比較する時、大きさの影響が出ないように、相似形で波長を揃える。(b)は、波高のみが異なる二つの正弦波になっている。(c)は二つの正弦波を曲率解析して比較したもの。波高が大きいほうが曲がり方はきついたので点線のグラフの方が曲率のピークの絶対値が大きくなっている。なお、(b)で枠外に出ている直線部分は(c)の曲率解析に含まれていない。

(2) 曲線を構成する点列はデジタル画像の上では細かい正方形（ピクセル）のつながりで構成される。源データのリップルの断面を表す曲線も、デジタル画像に表示されるとピクセルに変換される。しかし、元の曲線は必ずしもピクセルの中心を通るとは限らないので実際には細かい屈曲が現われてしまう。スプライン関数はノットを全て通過するので、もし、曲線を構成するピクセルを全てノットに採用すると、解析した曲率分布は元の曲線の特徴をうまく表せない。そこで、解析においては曲線を構成する全てのピクセルのうち $n-1$ 個おきにノットを採用する。これをピクセルの“間引き”とよぶ。間引きによって得られたノットによるスプライン関数が、源データのリップルの形に最もよくフィットするように間引きの割合 n を決定する。また、このとき曲率を測定する曲線の両端に直線を付け足す。これは、ピクセルの“間引き”をするので、元の曲線の末端では曲率を測定できないため、元の曲線全体を曲率解析するために必要である。この付け足す直線の長さは、元の曲線をすべて曲率解析するのに十分な長さにしてある。第1図(a)の正弦波形の両端のたて棒より外側は解析のために付け足されたものである。ここでは曲線のすべてのデータにこのような直線が付け足されている。

(3) ノットごとに曲率を計算させる。その結果を表計算ソフトでまとめ、曲率の水平分布をグラフで表す。

結 果

形成されたリップルの形態

第1表で示した条件のもとで形成されたそれぞれのリップルの形態を、第2表にまとめた。また、規格化したリップルの断面形を第3図、第4図、第5図のグラフの上に示した。ウェーブリップルは $RSI=0.946$ でほぼ対称形になっている。また、ウェーブリップルの断面形はクレストが尖っているのが特徴である。複合流リップルの断面形は順方向、逆方向ともにクレストが丸みを帯びた形をしている。また、逆方向リップルは、一方向流速が振動流速に対して大きくなっても RSI はほぼ1のままで対称形を保っている。これに対して、順方向リップルは、一方向流速が振動流速に対して大きくなるにしたがって RSI が1より大きくなりリップルの上流側が伸び非対称形になって行くのがわかる。また、第2表の RI ではウェーブリップルと複合流リップルを

第2表 曲率解析したリップルの形態。 RI ：リップル指数。 RSI ：リップル対称度指数。(a：クレストから下流のトラフまでの水平距離、b：クレストから上流のトラフまでの水平距離)

形成されるリップル	波長 λ (cm)	波高 η (cm)	$RI (\lambda/\eta)$	$RSI (a/b)$	結果の図
ウェーブリップル	3.70	0.618	5.99	0.946	第3図
逆方向リップル	4.65	0.470	9.89	1.15	第4図(a)
逆方向リップル	4.98	0.936	5.32	1.06	第4図(b)
逆方向リップル	7.98	1.33	6.00	1.05	第4図(c)
順方向リップル	3.65	0.752	4.85	1.52	第5図(a)
順方向リップル	9.41	1.57	5.99	1.62	第5図(b)
順方向リップル	8.87	1.23	7.21	2.43	第5図(c)

第3図 ウェーブリップルの断面形と曲率分布。造波機側が沖で波は左から右へ伝播している。ウェーブリップルの断面形はほぼ対称で、クレストが尖った形をしている。曲率分布もほぼ対称的で鋭いピークを示し、ウェーブリップルの断面形の特徴をよく表す。

区別することができないことがわかる。

リップルの曲率分布

(1) ウェーブリップル（第3図）の曲率分布の特徴は、ほぼ対称でクレストの部分に曲率のピークが鋭く出ることである。ウェーブリップルの特徴である

第4図 逆方向リップルの断面形と曲率分布．造波機側が沖．流れは右から左．矢印は流れの流速の相対的強さを表す．逆方向リップルの断面形は，(a) から (c) に向かって一方流速が大きくなっても比較対称のままで，丸みを帯びた形をしている．曲率分布はやはり対称に近く，丸みを帯びているため曲率の鋭いピークは現れない．

第5図 順方向リップルの断面形と曲率分布．造波機側が沖．流れは左から右．矢印は流れの流速の相対的強さを表す．順方向リップルの断面形は丸みを帯びた形をしているが，(a) から (c) に向かって一方流速が大きくなると流れの上流側の斜面が伸び非対称になっていく．曲率分布は下流側の斜面の曲がりのきつところのピークが大きく現われ，一方流速が大きくなるとそのピークが下流側にシフトする．上流側の斜面は平なので曲率分布は0近くを振動する．

対称性をよく表している．また，曲率分布のピークが鋭いことは，クレストが尖っていることと対応している．

(2) 逆方向リップル (第4図) の曲率分布の特徴は，流れの相対的な強さが変化しても曲率分布が比較対称な形を保っていることである．これは，逆方向リップルが流れの相対的な強さに関係なく対称な形を示すことに一致する．ウェブリップルにくらべ

ると曲率分布の正の方のピークが小さくなり，それほど鋭いピークを持たない．これは，複合流リップルのクレストが上に凸で丸みを帯びていることをよく表している．流れの相対的強さが大きくなると曲率が正の部分が広くなり，それが小さいとき (第4図(a)) と比べてピークの値が小さくなる (第4図(c)) ．

(3) 順方向リップル (第5図) では，明らかに曲率

分布が非対称になっていて、流れの相対的強さが大きくなるとその非対称性が増す。これは、リップルの形態が非対称であることを示している。流れが強くなると、曲率が最も大きいピークが流れの下流側にシフトし、流れの上流側は曲率の値が0近くに分布していることがわかる(第5図(c))。このことは、流れの相対的強さが大きくなるにしたがってリップルの上流側が伸び、非対称になっていくことを示す。リップルは上に凸に見えるが、曲率0は平であることを示すので、実際はクレストの部分では平らな部分がかなり広がっていることがわかる。また、逆方向リップルより鋭いピークが現われている。

考 察

異なる流れの条件で形成されたリップル同士を比較するためにいくつかの曲率分布を一つのグラフ上にまとめてプロットした(第6図)。

まず、ウェーブリップル(第3図)と逆方向リップル(第4図(a), (c))の曲率分布を比較する(第6図(a))。曲率分布はウェーブリップル、逆方向リップルともにほぼ対称である。すなわち、これらのリップルはどれも比較的対称である。しかし、ウェーブリップルの曲率分布のピークは鋭く、逆方向リップルは鋭いピークをもたない。流れの相対的強さが増すとさらに曲率分布が平になっている。このことは、逆方向リップルがウェーブリップルに比べて上に凸の丸い(尖っていない)クレストをもっていることをよく示しており、RIでは区別できなかった両者の違いをよく識別することができる。またトラフの部分はウェーブリップルの曲率はほとんど0に近いのに対し逆方向リップルは負の方に分布している。これらは、逆方向リップルがトラフの部分も丸くくりぬいたような丸みを帯びた形であることをよく示している。

次に、ウェーブリップル(第3図)と順方向リップル(第5図(a), (c))の曲率分布を比較する(第6図(b))。ウェーブリップルの曲率分布のピークはほぼ真ん中にあるが、順方向リップルのピークは流れの相対的強さが増すとともに流れの下流側に移動し、曲率分布全体も非対称性が増していく傾向がある。すなわち、流れが強くなるとリップルの上流側が伸びて非対称性が増加するのがわかる。また、曲率のピークは順方向リップルでは、ウェーブリップルと同じくらい尖っている。これは、順方向リップルがウェーブリップルと同じくらいクレストが尖っ

ているためではなく、順方向リップルの方がクレストからトラフまでの距離が短いために曲率の変化が大きいためである。実際は、順方向リップルのクレストは丸みを帯びている(第5図)。さらに、順方向リップルの下流側のトラフの曲率は、ウェーブリップルと異なり負の方に分布している。すなわち、順方向リップルの下流側のトラフはくりぬいたような丸みを帯びた形であることがわかる。

第6図(a), (b)からウェーブリップルと複合流リップルを区別できる。また、逆方向リップル、順方向リップルともに波に対する一方向流の強さの違いが曲率分布によく示されていることがわかる。

さらに、ウェーブリップル(第3図)と波に対する一方向流の相対的強さの弱い複合流リップル(逆方向:第4(a), 順方向:第5図(a))を比較する(第6図(c))。ウェーブリップルの曲率分布のピークに対して順方向リップルのピークは下流側にシフトして下流側のトラフの曲率は負になっている。順方向リップルがウェーブリップルに対して非対称で、下流側のトラフが下に凸の形になっていることがわかる。逆方向リップルはピークが尖っておらず、上流側、下流側のトラフはウェーブリップルの曲率に比べわずかだが負になっている。リップルは比較的対称だが丸みを帯びていることがわかる。これらのことから、相対的な一方向流が弱い複合流でウェーブリップルとの形態の違いが曲率分布の違いに現われていることがみてとれる。

最後に、ウェーブリップル(第3図)と波に対する一方向流の相対的強さの強い複合流リップル(逆方向:第4図(c), 順方向:第5図(c))を比較する(第6図(d))。第6図(c)と同様にウェーブリップルの曲率分布のピークに対して順方向リップルのピークは大きく下流側にシフトし、下流側のトラフの曲率は鋭いピークを持つほど負になっている。逆方向リップルは明瞭なピークがなく比較的平で、トラフ部は上流側、下流側ともにウェーブリップルの曲率に比べ明らかに負になっている。相対的な流れの強い複合流(第6図(d))の方がそれが弱い複合流(第6図(c))に比べて、順方向リップルと逆方向リップルそれぞれの特徴が顕著に現われている。第6図(c)および第6図(d)から、一方向流の強弱に関わらず波の進行方向に対する一方向流の方向によって曲率分布が異なることがわかる。

第6図 曲率分布の比較。(a) ウェーブリップルと逆方向リップルの比較。太実線：ウェーブリップル（第3図と同じ）。太点線：一方向流が弱い逆方向リップル（第4図(a)）。細点線：一方向流が強い逆方向リップル（第4図(c)）。曲率分布はどれも比較的対称で、リップル断面が対称形であることを示す。流れが強くなるとピークがなくなり曲率分布が平になっていく。すなわちリップルの断面は丸くなっていく。(b) ウェーブリップルと順方向リップルの比較。太実線：ウェーブリップル（第3図）。網線：一方向流が弱い順方向リップル（第5図(a)）。細実線：一方向流が強い順方向リップル（第5図(c)）。流れの相対的強さが増すとピークが右（下流側）へシフトし曲率分布は非対称になる。これは、リップルの断面が非対称になっていくことを示す。順方向リップルのトラフ部は、曲率が負であることに注意。(c) ウェーブリップルと一方向流の弱い複合流リップルの比較。太実線：ウェーブリップル（第3図）。太点線：逆方向リップル（第4図(a)）。網線：順方向リップル（第5図(a)）。逆方向リップルのピークはウェーブリップルに比べて鋭くない。順方向流リップルのピークは下流側にシフトしている。(d) ウェーブリップルと一方向流の強い複合流リップル。太実線：ウェーブリップル（第3図）。細点線：逆方向リップル（第4図(c)）。細実線：順方向リップル（第5図(c)）。逆方向リップルのピークはなくなり0に近くなる。順方向流リップルのピークは下流側に大きくシフトしている。また、逆方向流の上・下流側、順方向流の下流側に曲率分布が負の値のピークを持つ。これは、複合流で一方向流が強くなるとリップルの断面が丸みを帯びることを示す。

ま と め

曲率をリップルの形状解析に用いると、(1) 今まで区別しにくかったウェーブリップルと複合流リッ

プルの丸さの違いをうまく表現できる。また、(2) 複合流に作用している一方向流の方向や強弱などの違いによる丸さや非対称度の違いも曲率分布で表現できる。(3) このような解析により逆方向リップル

は波に対する一方向流速を上げても対称のままであるが、順方向リップルは波に対する流れを強くするとリップルの上流側がのび非対称になることが今回初めて明らかになった。

謝 辞

大阪大学大学院理学研究科砂村繼夫教授には、粗稿を読んでいただき、議論していただいた。ここに記して謝意を表します。

文 献

- Boersma, J. R., 1970: Distinguishing features of wave-ripple cross-stratification and morphology. Doctoral Thesis, University of Utrecht, 65p.
- Harms, J. C., 1969: Hydraulic significance of some sand ripples. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **80**, 363-396.
- 増田富士雄・牧野泰彦, 1987: 古東京湾のウェーブリップル形成の波浪条件, *地学雑誌*, **96**, 23-45.
- Saiki, K., 1997: Morphology and simulation of solid state rounding process. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, No. 12, 1519-1522.
- Tanner, W. F., 1967: Ripple mark indices and their uses. *Sedimentology*, **9**, 89-104.
- 横川美和・増田富士雄・坂本隆彦, 1992: 大阪層群のウェーブリップルから推定した波浪条件, *堆積学研究会報*, **37**, 43-52.
- Yokokawa, M., 1995: Combined-flow ripples: Genetic experiments and applications for geologic records. *Mem. Faculty of Science, Kyushu University*, Ser. D, **29**, 1-38.

曲率によるリップル形態の解析：複合流リップルの例

井出典孝・横川美和・佐伯和人, 1999, 堆積学研究, No. 49, 41-48
 Ide, N., Yokokawa, M. and Saiki, K., 1999: Morphological analyses of ripples using curvature distribution: A case of combined-flow ripples in a flume. *Jour. Sed. Soc. Japan*, No. 49, 41-48

リップル形態を表す指数として、リップル指数 (RI) やリップル対称度指数 (RSI) がよく知られている。ウェーブリップルは対称形であり、カレントリップルは非対称である。これに対し複合流リップルは、対称なものも非対称なものもあり、さらに、丸みを帯びた形をしている。これらをウェーブリップルから区別するよい指標がない。そこで、リップルの形態を曲率を用いて解析することを試みた。ここでは、複合流リップルの解析例を紹介する。解析は、曲率解析ソフトを用いて実験水槽で形成したリップルについて行った。流れのタイプは、振動流、逆方向複合流、順方向複合流の三つである。曲率によってそれぞれのリップルの形態の違いを表現できた。また、波に対する一方向流速の割合を増加させると、逆方向リップルでは対称形のままだが、順方向流では、リップルの上流側が伸び非対称になることがはじめてわかった。