

DNS解析による砂堆型河床上の組織的渦構造の解明

STUDY ON COHERENT VORTEX STRUCTURES OVER DUNE TYPE WAVY BED
IN AN OPEN-CHANNEL FLOW BY DIRECT NUMERICAL SIMULATION

林 俊一郎¹・大本 照憲²・滝川 清³

Syunichiro HAYASHI, Terunori OHMOTO and Kiyoshi TAKIKAWA

¹正会員 熊本県土木部 (〒862-8570 熊本市水前寺6-18-1)

²正会員 工博 熊本大学助教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

³正会員 工博 熊本大学教授 沿岸域環境科学教育研究センター (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

In this study, fully developed three-dimensional turbulent flow over plural solid dune bed in an open-channel was reproduced by direct numerical simulation (DNS). Its coherent structures were also examined using time-line technique and identification of cylindrical vortex tubes. "Boil of the first kind", which was unique to the flow field on dune-type sand wave, was numerically reproduced. It was found that kolk which causes boil of the first kind can be detected as cylindrical vortex tubes rising from the bed. It was also found that boil of first kind and kolk were generated not only from "hairpin vortices" as conventionally noted but also from "reverse hairpin vortices" with their head near the bed and cyclonic vortices at their foot.

key words: DNS, coherent structure, identification of vortex, kolk-boil vortices, dune bed, open channel turbulence

1. はじめに

河床波の形成機構や乱流構造の解明は、洪水制御を考える上で最も興味深い対象の一つである。このため、古くから多くの研究者や技術者が様々な観察や実験的研究に取り組んでいるものの、河川水面において間欠的に観察される円形状のボイルを始めとした大規模渦構造については依然不明な点も多い。このボイルの生成に関しては、古くは Matthes¹⁾ が河床から水面へ達する竜巻状の上昇渦が発生するためと予想し、この上昇渦をコルク渦と定義した。また Jackson²⁾ は、観測から河床波の谷部においてボイルが生じやすく、その発生周期はバースティングと同程度であったことから、バースティングがボイルになると推測した。現在では直線河道に見られるボイルは、その発生機構より第1種から第3種に分類されている³⁾。このうちバースト現象に起因する第3種は、河床形状にかかわらず形成され得るのに対し、第1種と第2種はそれぞれ流下方向と横断方向の河床波に起因するものと考えられている。河川のような高レイノルズ数流れでは、第3種は弱くなると見られることから、Dune 型河

床波に出現するボイルは、主としてコルク渦に起因する第1種ボイルであることが予想される。なお、Nezu and Nakagawa⁴⁾、棚津ら⁵⁾ は、レーザー流速計や水素気泡法による観測と時空間相関解析を行い、連続河床波背後に発生する組織渦について、横断特性や三次元性から馬蹄型渦モデルで説明できるとしている。今後、PIV や PTV のような面的な画像処理技術の進展に伴い、組織構造のより詳細な解明が期待される。

一方、乱流の組織構造の解明には、飛躍的發展を遂げるコンピュータと数値流体力学 (CFD) の貢献が大いに期待される。特に DNS や LES は、乱流中の三次元組織構造に関する瞬時情報を提供するなど、乱流に対する我々の世界観を大きく広げている⁶⁾。また、水素気泡法や染料注入法に代表される従来の可視化法が、組織構造を断片的かつ間接的にしか捉えきれず組織構造の解明に限界があるのに対し、CFD では圧力を含めた多様な検出パラメータを用いることにより渦構造そのものを時空間的に同定することが可能である。このため、渦構造の詳細な議論はもちろん、従来の可視化結果と組織構造の対応関係を明らかにすることにより、可視化結果の判読への寄与が期待される。

本研究では、Dune 型固定波面を有する開水路乱流場に DNS を適用し、大規模渦の組織構造を直接同定するとともに、コルクや第 1 種ボイルとの相関を検討することで、大規模渦の形成機構を明らかにする。

2. 数値解析法

(1) 解析対象および計算方法

解析対象は、Dune 型の連続固定波面を有する完全発達した直線開水路乱流場とし、底面形状や河床高については瀬津ら⁷⁾を参考に図-1 のように設定する。なお、流下方向とスパン方向には周期境界条件を与え側壁の効果がない流れ場とする。

基礎方程式は、任意境界への適合を可能とするため、式 (1)、(2) に示す 3 次元一般座標系へ写像したナビエ・ストークス方程式と圧力ポアソン方程式を用いる。境界条件には、底面において流速にノンスリップ条件、自由水面では流速 u 、 w にスリップ条件、 v に 0 を与え、圧力はノイマン条件とする。格子は $96 \times 65 \times 64$ とし、Steger & Sorenson の方法⁸⁾により生成した。なお、レイノルズ数は平均流速と平均水深を用い 3300 とする。その他のアルゴリズムについては、既報^{9), 10)}のとおりである。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \xi_j}{\partial \xi_k} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_k} = - \frac{\partial \xi_j}{\partial \xi_i} \frac{\partial p}{\partial \xi_j} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_k}{\partial \xi_i} \frac{\partial^2}{\partial \xi_j \partial \xi_k} + \frac{\partial^2}{\partial \xi_i \partial \xi_i} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \right) u_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_k}{\partial \xi_i} \frac{\partial^2}{\partial \xi_j \partial \xi_k} + \frac{\partial^2}{\partial \xi_i \partial \xi_i} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \right) p = & \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial \xi_i} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_j} \right) \frac{\partial \xi_k}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_l}{\partial \xi_i} \frac{\partial u_l}{\partial \xi_k} \\ & + u_j \frac{\partial \xi_k}{\partial \xi_j} \frac{\partial}{\partial \xi_k} \left(\frac{\partial \xi_l}{\partial \xi_i} \frac{\partial u_l}{\partial \xi_j} \right) \\ & + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial \xi_i} \frac{\partial \xi_k}{\partial \xi_i} \frac{\partial^2}{\partial \xi_j \partial \xi_k} + \frac{\partial^2 \xi_j}{\partial \xi_i \partial \xi_i} \frac{\partial}{\partial \xi_j} \right) \left(\frac{\partial \xi_m}{\partial \xi_i} \frac{\partial u_l}{\partial \xi_m} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 計算結果

図-2、3 は、主流速 U の鉛直分布と等値線を示す。なお、上付き添字+は内層表示された物理量を示す。クレスト背後において剥離が生じ、逆流域と再付着点が存在することを捉えている。また、再付着点距離と波高の比は約 4.8 程度であり、連続河床波における瀬津ら¹¹⁾の実験結果と一致している。図-4 は、レイノルズ応力 $-\overline{u^+v^+}$ の空間分布を示したもので、実験と同様、クレストから再付着点に至る変曲点上に沿ってピーク領域が続いている。特に、再付着点の直上において最大値を示しており、同位置での剥離渦の河床への衝突等により強いレイノルズ応力が生成されていることが示唆される。

3. 組織構造の可視化

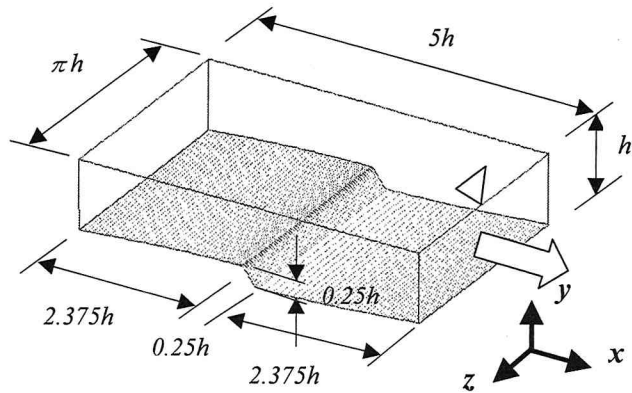


図-1 計算対象の概要

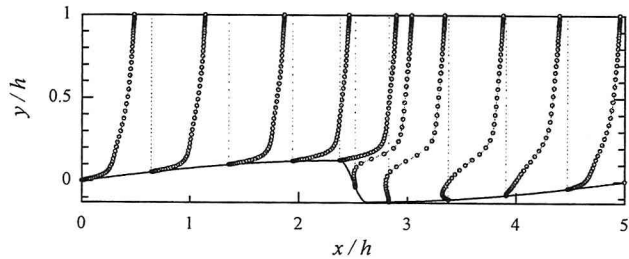


図-2 主流速 U^+ の分布

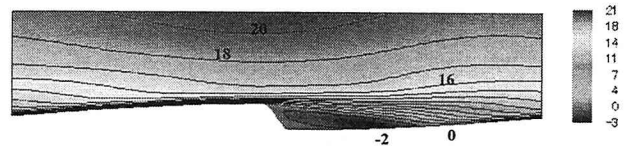


図-3 主流速 U^+ の等値線

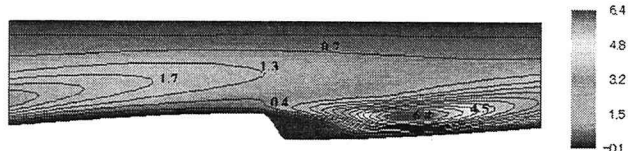


図-4 レイノルズ応力 $-\overline{u^+v^+}$ の等値線

(1) タイムライン

組織構造を可視化する手法としてタイムラインがある。図-5 は、水面近傍 ($y/h=0.95$) において水平方向に 200 点のトレーサ源を配置し、一定間隔毎にマーカー粒子を発生させたものである。壁面近傍で観察される低速・高速ストリークは見られない代わりに、水深規模の直径を有する楕円状の空白領域が認められる。これは、開水路乱流に特徴的な上昇流による splat と考えられるが、平坦開水路のタイムラインには、水深規模の splat は見受けられなかったことから、ボイルを捉えていることが期待される。そこで、この splat の中心 ($z/h=1.25$) を通る鉛直方向のタイムラインを示したものが図-6 である。河床変化に伴い加速と減速を生じることから、平坦河床のタイムラインに比べ大きく乱れており複雑な様相を呈してい

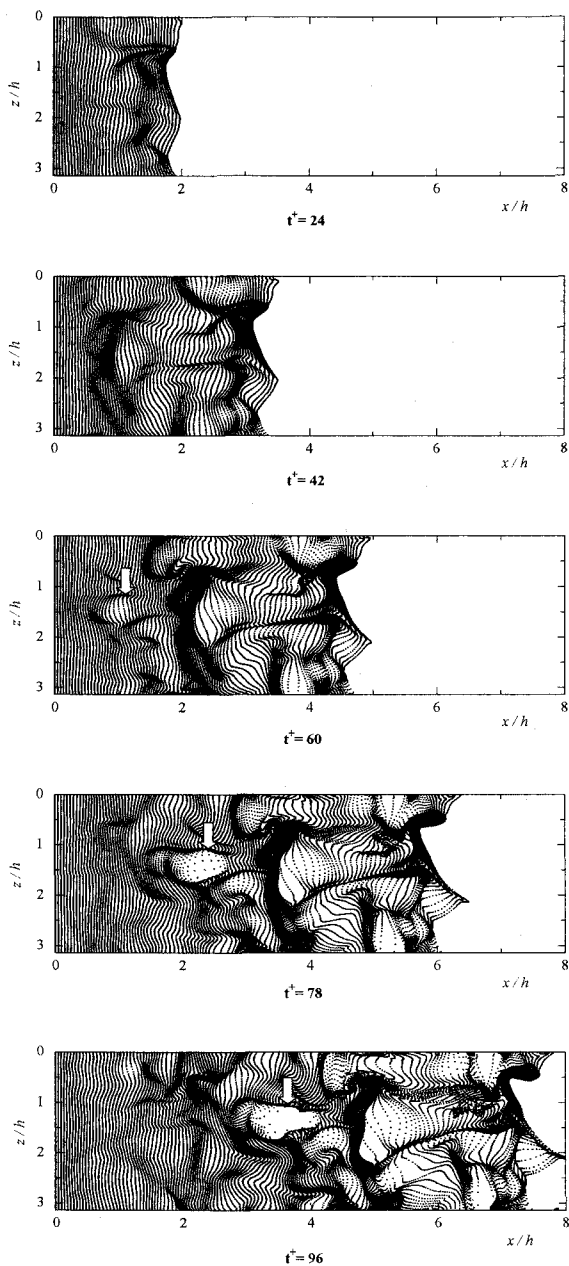


図-5 水平タイムライン ($y/h=0.95$)

る。しかし、流下方向に傾斜したらせん状の大規模渦が、河床から *splat* へ向けて次第に発達している様子が認められる。すなわち、この渦は河床材料を巻き上げるコルク渦であり、*splat* は第1種ボイルと判断される。ただし、タイムラインが描く紋様には、過去に受けた履歴も映し出されていることから、各時刻において組織渦をリアルタイムに正しく識別できているか疑問が残る。

(2) 管状旋回渦 (低圧力渦)

近年、管状の組織構造を直接可視化する方法が提案され、そのメカニズムや詳細な特性が明らかにされつつある^{12), 13)}。そこで、本研究では以下の Q 定義法¹²⁾ を適用し考察する。

Q 定義法は、速度勾配テンソル ∇u の第2不変量 Q が

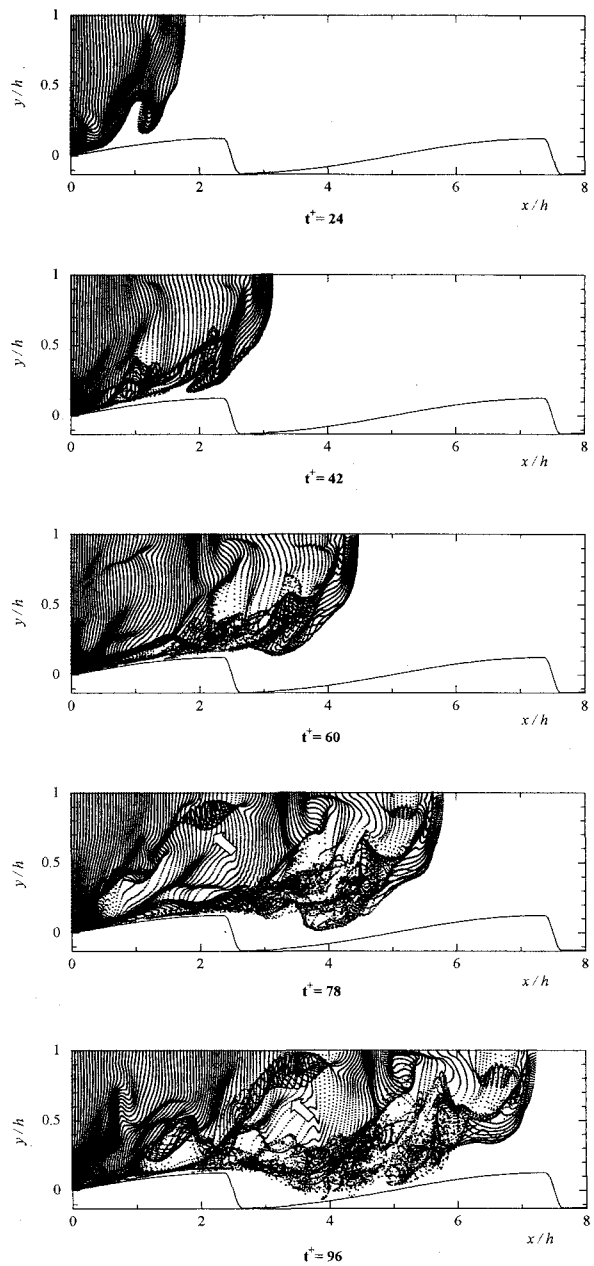


図-6 鉛直タイムライン ($z/h=1.25$)

正となる領域を渦と定義する。これは、第2不変量 Q が式 (3) のように表され、渦度がせん断歪みより卓越する場合、 Q が正になることを利用している。

$$Q \equiv \frac{1}{2}(u_{i,j}^2 - u_{i,j}u_{j,i}) = -\frac{1}{2}u_{i,j}u_{j,i} = \frac{1}{2}(\|\Omega\|^2 - \|S\|^2) \quad (3)$$

$$\text{ただし、 } S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), \Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$$

一方、この条件は圧力ポアソン方程式 ($\nabla^2 p = 2\rho Q$) のソース項とも対応することから、 $Q > 0$ の領域は、圧力の極小値をもち局所低圧部分であることを示すとともに、 Q が大きいほどより強い渦であることを示す。つまり、 Q 定義法は圧力のラプラシアンを正とする定義法¹⁴⁾ と一致するほか、 λ_2 定義法¹³⁾ とほぼ同じ結果を与える¹⁵⁾。

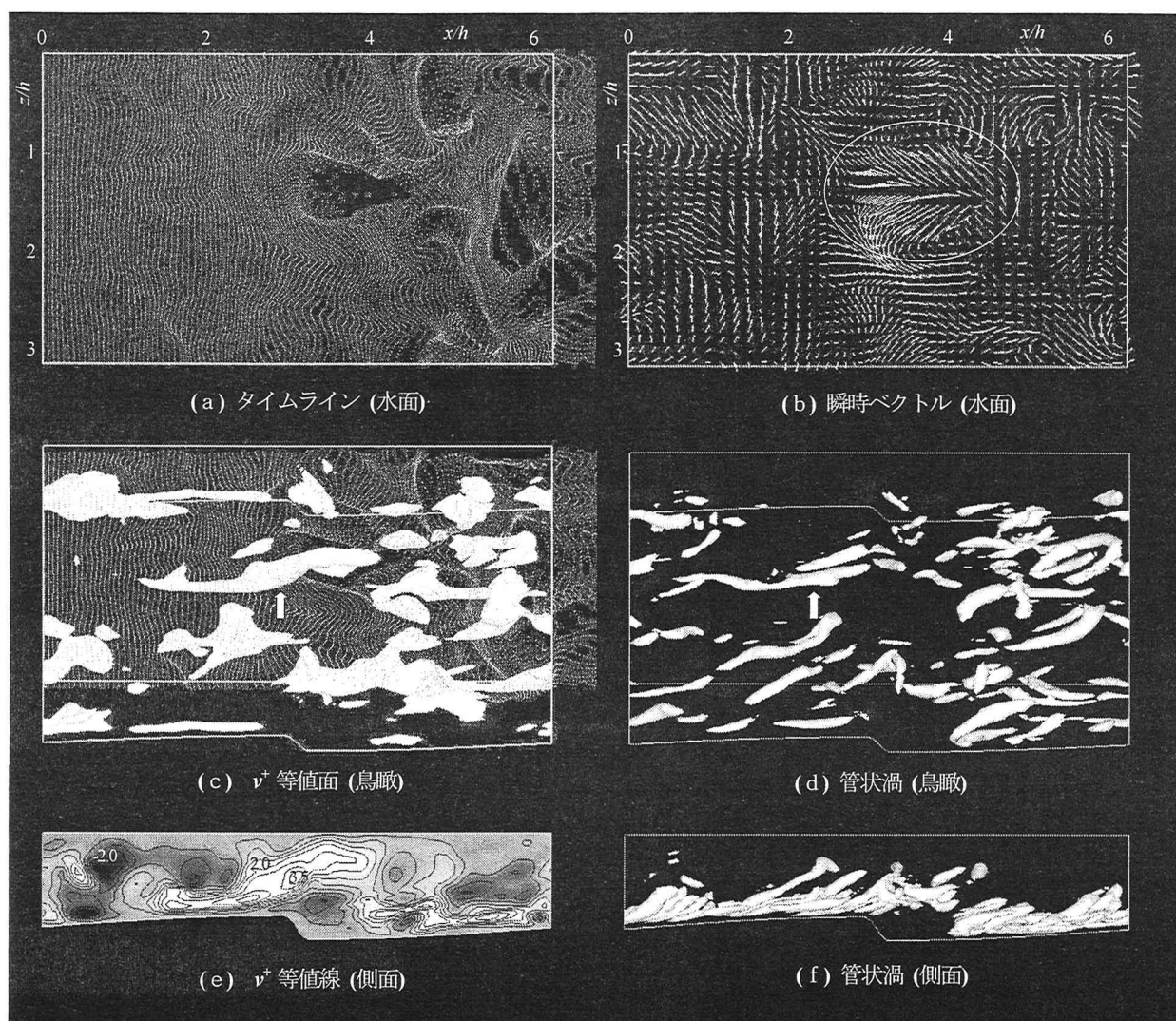


図-7 Dune 上の各種可視化図

図-7 は、 $t^*=95$ における、(a)タイムライン ($y/h=0.95$)、(b)瞬時流速ベクトル ($y/h=0.95$)、(c) v^+ の等値面 ($v^+=2.0$)、(d)管状渦、(e) v^+ のコンター ($z/h=1.25$)、(f)管状渦の鉛直面をそれぞれ示したものである。(a),(c),(e)から、ボイルは河床から発達した強い上昇流を伴うコルク渦に因ることが一目瞭然であり、(d),(f)は、このコルク渦が管状旋回渦であることを示している。しかし、(b)の水面における瞬時ベクトルは、流下方向へ伸びるほぼ楕円状の広がりを出すだけで、水面では回転する成分は認められない。

そこで、このコルク渦周囲の流れ場を詳細に検討することにする。図-7(d)の矢印で示すコルク渦近傍の横断 ($y-z$) 面の瞬時ベクトルを上流から見たものを図-8 に、水平 ($x-z$) 面の瞬時ベクトルを上方から見たものを図-9 にそれぞれ示す。両図から、このコルク渦の周囲には、強い旋回流が形成されていることが確認される。また、コルク渦の下流では、この旋回流が急速に減衰する一方、反対回りの補償渦を伴い、互いに逆回転の渦対が水面へ浮上しボイルとなる様子が伺える。この結果、水面で観察されるボイルは、流下方向へ伸びた楕円状の広がりを

示すことが分かる。なお、このコルク渦は下流に向かい反時計回りの旋回流を伴っており、スパン方向の傾斜は、縦筋上の管状渦ほど顕著ではないものの¹⁵⁾、下流に向かい右寄りに傾いている。すなわち、コルク渦は、渦度のスパン方向成分が平均流の渦度と同一符号となるように傾くサイクロニック渦¹⁶⁾であることが分かる。

4. コルク・ボイル渦の発生形態

Dune 上の組織構造は、図-7(f)が示すように、再付着点から下流において発生しているのが特徴的であり、紙数の関係で今回は示せなかったが、ヘアピン渦が頻繁に形成されているのが観察される。ボイルは、このヘアピン渦モデルにより説明可能とされているが、ボイルが横断方向に並ぶ理由が説明困難など、コルク・ボイル渦はヘアピン渦モデルと異なった構造を有している可能性がある。そこで、管状渦をアニメーションにより長時間観察した結果、ヘアピン渦とは別に、図-10(a),(c)に矢印で示すもう一つの特徴的な組織構造の存在が判明した。

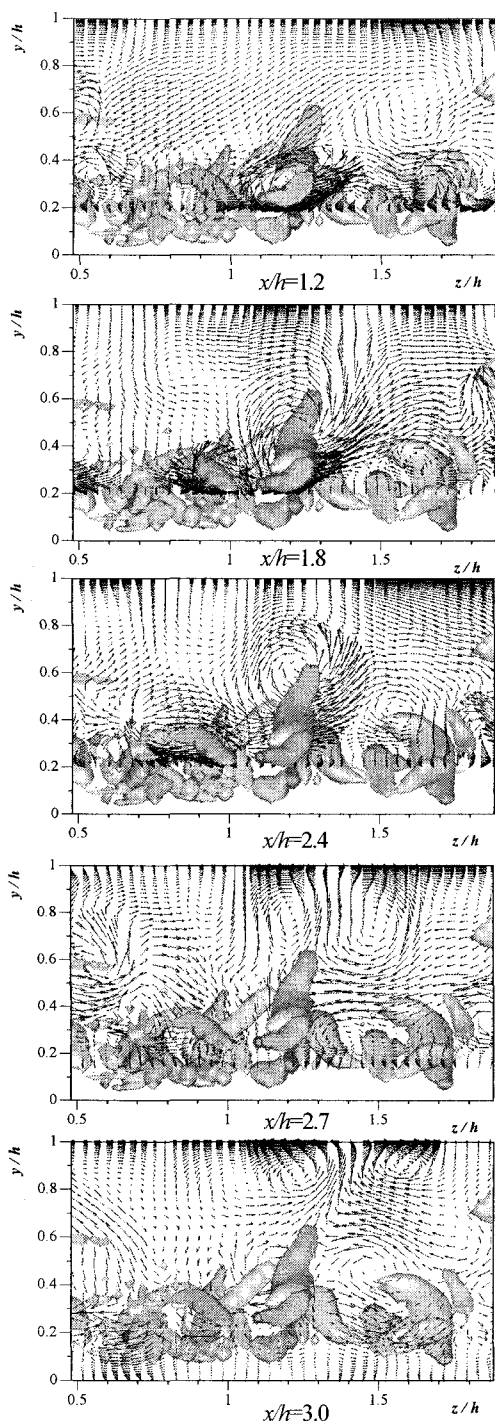


図-8 コルク渦周辺の瞬時ベクトル (y - z 面)

この構造は、形状や傾斜角など、ヘアピン渦と類似しているが、ヘアピン渦の頭部に相当する部分が河床側に、脚部が水面へ向け開いたU字状の「逆ヘアピン渦」となっている。(d)に、この渦の脚部を横切るA-A側線における y - z 断面の瞬時ベクトルを示す。これから「逆ヘアピン渦」の、上流から見て右側の脚部は反時計回りで右寄りへ、左側の脚部は時計回りで左寄りへ伸びる逆回転する一対のサイクロニック渦で構成され、それらが水面へ向け成長していくことが分かった。確認のため、3章で

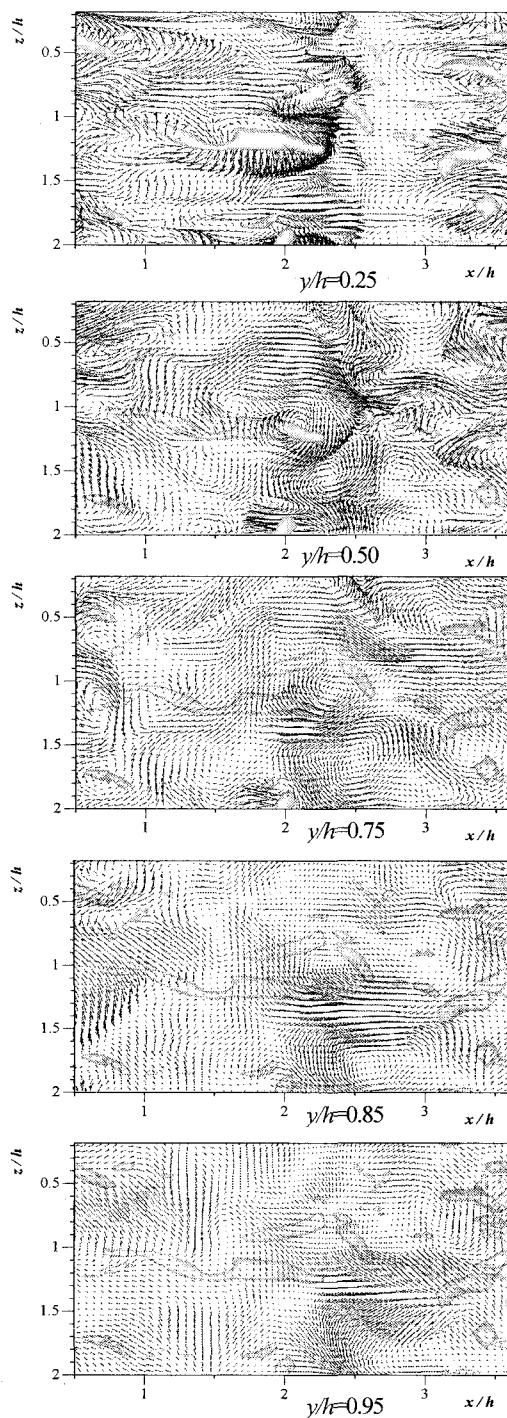


図-9 コルク渦周辺の瞬時ベクトル (x - z 面)

捕らえたコルク渦を、時間を遡って追跡した結果、逆ヘアピン渦の「右脚」に起源があることが判明した。今回の計算では捕捉できなかったが、「逆ヘアピン渦」の両脚がコルク渦として成長すれば、横断方向に並列するボイルも説明が可能である。なお、ヘアピン渦からボイルへ発展したものは今回の観察の範囲内では見出せなかった。以上から、第1種ボイルおよびその発生要因であるコルク渦は、ヘアピン渦のみならず「逆ヘアピン渦」にも起因するものと判断される。

5. まとめ

本研究では, Dune 型河床波を模擬した連続固定波面上の流れ場を DNS により再現し, タイムラインおよび管状渦の可視化から組織構造の検討を行った. 得られた知見は, 以下のとおりである.

- 1) Dune 型河床波上の流れ場へ DNS を適用した結果, 平均流特性や再付着点位置を始め, 同流れ場の特徴的なボイルを捕らえるなど, 従来の実験結果を再現することができた.
- 2) コルク渦は, 河床から上昇する管状渦として検出可能であり, その水面近傍における挙動は, 急激な回転成分の減衰と新たな補償渦の誘発にあり, この相互作用によりボイルは水面上で流下方向へ伸びる楕円状の広がりを示す.
- 3) 第 1 種ボイルおよびその発生要因であるコルク渦は, 河床近くに頭部を置き, サイクロニック渦を脚部に有する「逆へアピン渦」に起因することを見出した.

参考文献

- 1) Matthes, G.H. : Macroturbulence in natural stream flow, *Amer. Geophys. Union*, Vol.28, pp.255-265, 1947.
- 2) Jackson, R.G. : Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, *J. Fluid Mech.*, Vol.77, pp. 531-560, 1976.
- 3) Iehisa Nezu. and Hiroji Nakagawa. : Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR - Monograph, Balkema, 1993.
- 4) Nezu, I. & Nakagawa, H. : Three-dimensional structures of coherent vortices generated behind dunes in turbulent free-surface flows, *Refined Flows Modelling and Turbulence Measurements, Proc. of the 5th Int. Symp.*, pp.603-612, 1993.
- 5) 棚津家久, 門田章宏, 新橋秀樹, 倉田昌明 : 河床波上非定常開水路流れの時空間相関構造に関する研究, *土木学会論文集*, No.579/II-41, pp.125-136, 1997.11.
- 6) 大宮司久明, 三宅裕, 吉澤徹 編 : 乱流の数値流体力学—モデルと計算法, 東京大学出版会, 1998.
- 7) 棚津家久, 門田章宏, 賀建勳 : 開水路河床波上の乱流構造に関する数値シミュレーション, *水工学論文集*, 第 41 巻, pp. 669-674, 1997.2.
- 8) Steger, J.L. & Sorenson, R.L. : Automatic mesh-point clustering near a boundary in grid generation with elliptic partial differential equations, *J. Computational Phys.* 33, pp.405-410, 1979.
- 9) 林俊一郎, 大本照憲, 矢北孝一, 平川隆一 : 風上差分スキームを用いた直接数値シミュレーションの基礎的研究, *応用力学論文集*, Vol.2, pp. 599-608, 1999.
- 10) 林俊一郎, 大本照憲, 矢北孝一, 平川隆一 : 一般座標系風上 DNS による開水路乱流の構造解析, *応用力学論文集*, Vol.3, pp. 763-774, 2000.
- 11) Nezu, I. & Kadota, A. & Kurata, M. : Free-surface flow structure of space-time correlation of coherent vortices generated behind dune

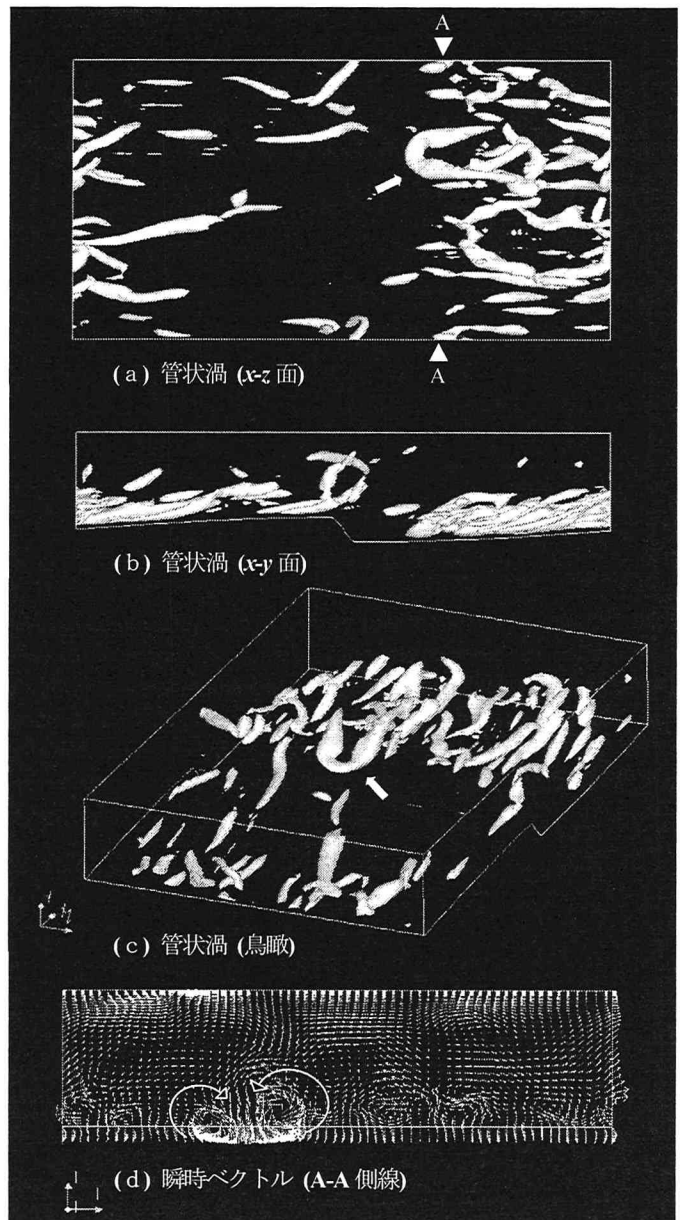


図-10 「逆へアピン渦」の空間分布

- bed, *Proc. of the 6th Int. Symp. on flow modeling and turbulence measurements*, pp.695-701, 1996.
- 12) Hunt, J.C.R., Wray, A.A. & Moin, P. : Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, *Center for Turbulence Research Report CTR-S88*, 1988.
- 13) Jeong, J. & Hussain, F. : On the identification of a vortex, *J. Fluid Mech.*, Vol.285, pp.69-94, 1995.
- 14) Kida, S. & Tanaka, M. : Dynamics of vortical structures in a homogeneous shear flow. *J. Fluid Mech.*, Vol.239, pp. 43-68, 1994.
- 15) 林俊一郎, 大本照憲, 滝川清 : 直接数値シミュレーションによる縦筋河床上の三次元乱流構造の解明, *応用力学論文集*, Vol.4, pp. 591-600, 2001.
- 16) 木田重雄, 柳瀬眞一郎 : 乱流力学, 朝倉書店, 1999.

(2001. 10. 1 受付)