

河床近傍の渦と乱れ

松岡保正*

On the Characteristics of Vortices generating on a River Bed.

Yasumasa MATSUOKA

The vortices generating on a river bed were observed with 3 electro-magnetic flowmeters. Using obtained digital data, the distributions of velocity components, Reynolds stress, and energy spectrum were calculated. Distributions of diameter and velocity are represented in this paper.

A conceptual model of river turbulence is proposed on the base of the results. Generating mechanism of horse-shoe vortices, sweeps, ejections, and boiles are explained based on the model.

1. ま え が き

河川乱流場に於いては、乱れのエネルギーは先ずレイノルズ応力という形で平均流から取り込まれる。レイノルズ応力は、平均流のシアーが大きい河床近傍で最大となる。乱れのエネルギーの大部分はこの領域で生成され、それは渦の放出という形でなされる。この渦が鉛直流速分布や移動床の問題に本質的役割を果しているにもかかわらず、これまで実河川ではほとんど評価されていない。

室内実験における流れの3次元構造に関する研究は、1970年代に幾つかのモデルが相次いで提唱された。1980年代に入ると、計測処理技術も含めた可視化技術の発展に伴い流れの組織的構造は、かなり明らかになってきた。これらのモデルの多くは、粘性底層の存在が意味を持つ、固定床上の微流速流れでの可視化実験が基礎になっている。

河床近傍は、個々の粗度要素から剝離した小さな渦が干渉しあい混ざり合った状態にある。また、河床を構成する石は粘性底層の厚さをはるかに上回る大きさである。従って、室内実験で得られたモデルをそのまま実河川に適用するわけには行かないが、参考にすべき多くを含んでいる。

本文では、現在までに提唱されているモデルの主なものを紹介するとともに、二成分電磁流速計による河床近傍の速度変動記録から求めた渦について、若干の考察を加える。

2. 乱流構造の物理モデル

乱流研究の発達史は、計測技術や解析手法等の発達と大きな関わりを持っている。熱線流速計の登場する1960年までは、壁面近傍の層流底層の存在が明示してあった。その後の乱流

* 土木工学科 助教授
原稿受付 平成2年6月30日

研究のほとんどは微小ケスールの乱れに集中し、石原・余越¹⁾や木下²⁾のような、河川工学上の問題に対処する事を意図とした大スケールの乱れに関する研究は少ない。

流れは、もともと3次元的な構造をしており、近年の宇民・上野³⁾に代表されるような、可視化手法を併用した研究方法は乱れの空間構造究明に大きく貢献しているが、以下にこれまで提唱されているモデルの主なものを紹介する。

図1はTheodorsen⁴⁾の提唱したhorseshoeモデルである。Secondaryhorseshoeの発生機構、渦管の足と固定壁とのつながり方等不明な点も多いが、壁面近傍のシアを渦管という形で放出解消する基本的考え方は今も有効である。

図2、図3は先出の石原・余越が提唱した馬蹄型渦モデルである。余越は、川面に発生するボイルに着目し、馬蹄型渦の生成から水面に到達してボイルを発生させるまでを説明した。基本的には渦管をカルマン渦管として捉えているが、渦管としての詳細な測定はしていない。

図4、図5はKline⁵⁾の提唱するモデルである。彼らは可視化実験により、bursts, sweepsの特性を明らかにした。流れの中にこうした特徴的な構造の存在することを定量的に示した意義は大きく、乱流研究が、それまでの平均値と変動の時系列としての扱い方から大きく前進することになる。

図6はWillmarsh⁶⁾らのヘアピンモデルである。このモデルは、層流から乱流に遷移する問題の理論的・実験的研究が基になっており、conditionalsampling法を用いてヘアピン渦を確認している。

図7はLaufer⁷⁾の渦塊モデルである。大スケールの3次元渦塊が小スケールの渦塊を引き上げながら流下すると考えている。実河川においては、水深と流速がある程度以上大きな値をとる場合の、かなり大きなボイルがそれ自身の中でも次々に新しいボイルを発生させながら流下するケースに相当するものと考えられる。

図8は宇民・上野が提唱したものである。壁面近傍に存在する渦糸群(1次渦)が引き上

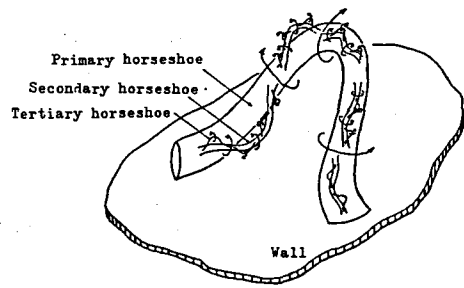


図1 Theodorsenによる馬蹄形渦モデル

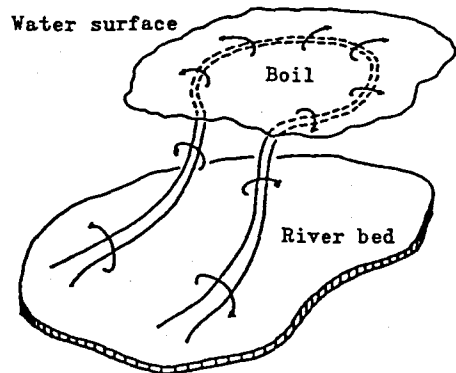


図2 余越による〇形渦とボイル

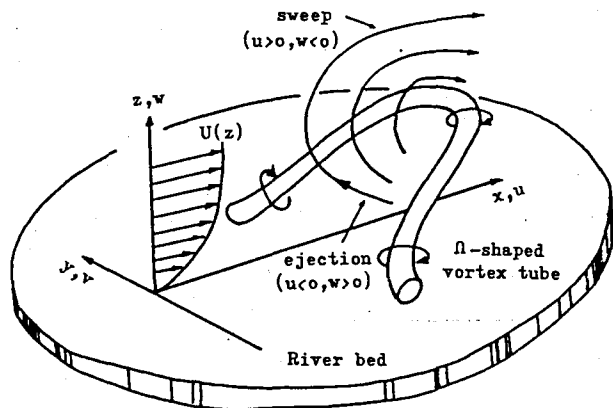


図3 余越による〇形渦とejection

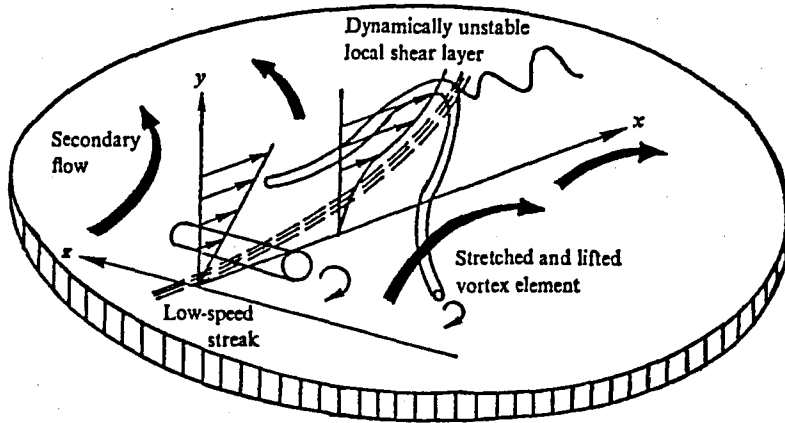


図4 Klineらによる burst モデル

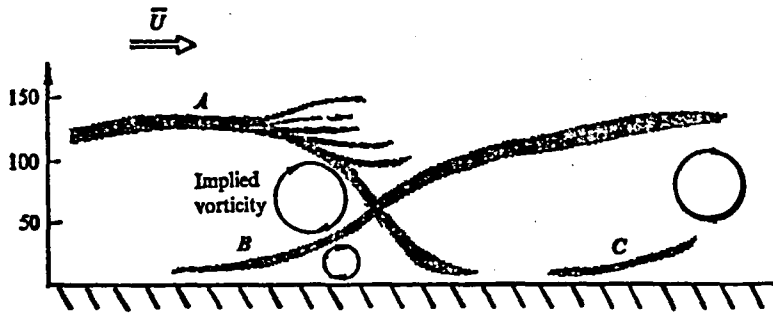


図5 Klineらによる流れのイメージ

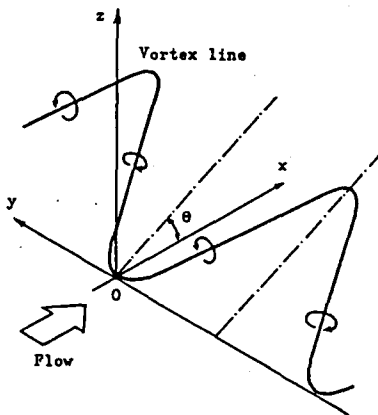


図6 Willmarthらによるヘアパン渦

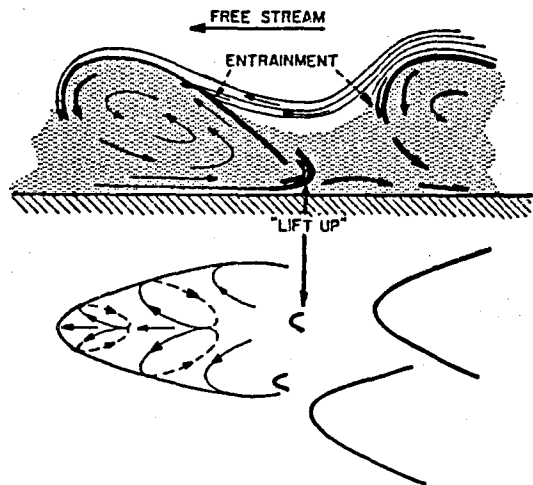


図7 Laufer による渦塊モデル

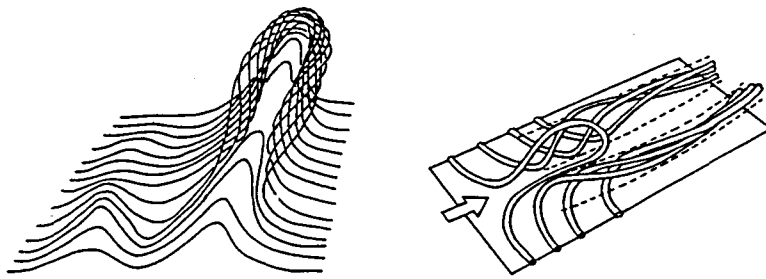


図8 宇民らによる渦糸モデル

げられ集中して束状の太い渦管（2次渦）を形成すると考えている。

彼らはまた、水素気泡では捉えにくい断面内の渦度分布の3次元構造を、ビーズを流した流れの断層撮影により明らかにして、モデルの妥当性を確認している。

3. 現地観測及び解析結果

著者の砂礫河床上の乱れの解析結果⁹⁾から、主たる渦管は河床上20cm~30cmで生成されているものと考えた。渦管の分析用の観測は、長野市内を流れる千曲川、犀川の2地点において、2成分電磁流速計を用いて行った。電磁流速計からのアナログ出力は、磁気テープに収録し、0.1秒間隔でAD変換したデータを解析に用いた。

観測諸元を表1に示す。参考までに、B地点は、ある程度の規模の流量変動が水深に反映する度合がA地点よりも強い。

表1 観測諸元

	H (cm)	Z (cm)	$u(z)$ (cm/s)	u'^2 (cm^2/s^2)	v'^2 (cm^2/s^2)	$-u'v'$ (cm^2/s^2)
A 1	55	20	88.0	201.9	24.4	28.9
A 2	53	20	87.6	130.4	18.2	20.8
B 1	75	20	64.0	11.9	28.0	27.7
B 2	75	35	67.9	80.9	27.6	17.6

図9~図11はAD変換後のB1の流れ方向流速変動 u' 、鉛直方向流速変動 v' 、レイノルズ応力 $-u'v'$ の70秒間の時系列記録である。図12はB1と同時刻のB2のレイノルズ応力 $-u'v'$ 、図13は同じく鉛直方向流速変動 v' のものである。渦管、湧昇流、流れ込み等を説明するため、対応する時刻に番号をつけてある。

図14はA1の、渦管直径 D と渦管外縁速度 V_s の度数分布、図15はA1の渦管直径 D と渦管の鉛直方向移動速度 V_v の度数分布である。図16以下も同様に、それぞれA2~B2に対応している。

4. 考 察

本研究における観測地点の河床は、10cm~20cm程度の石や礫を主体に構成されておりお

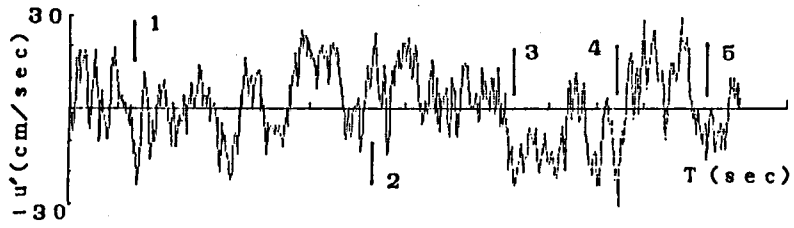


図9 流れ方向流速変動 (B 1)

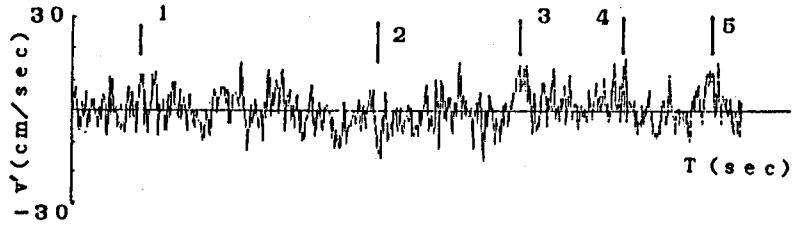


図10 鉛直方向流速変動 (B 1)

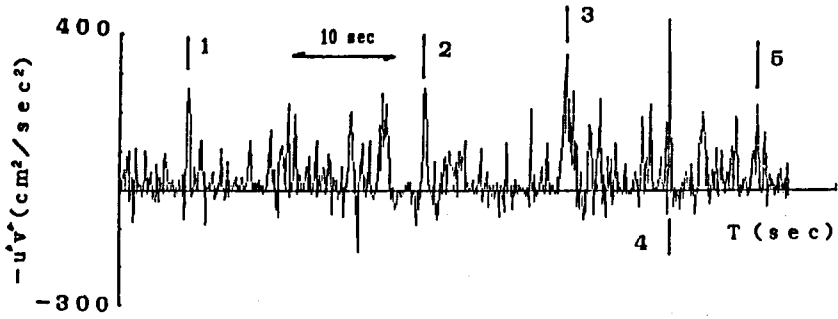


図11 レイノルズ応力 (B 1)

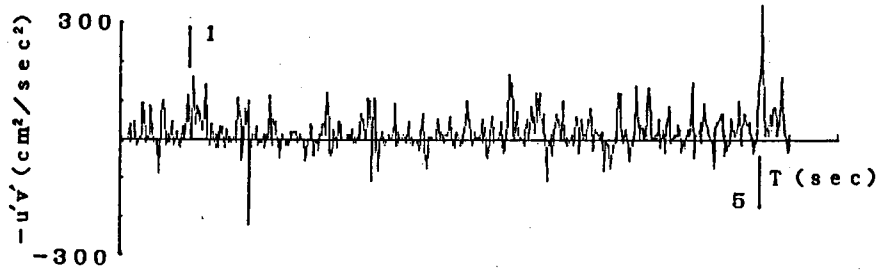


図12 レイノルズ応力 (B 2)

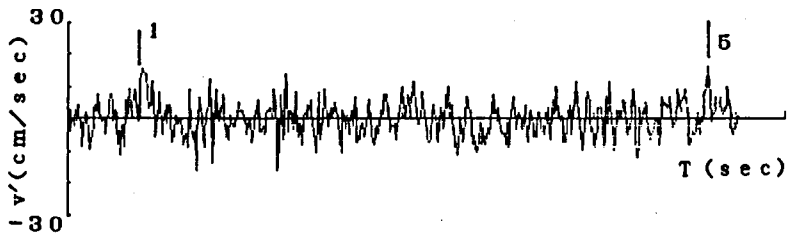


図13 鉛直方向流速変動 (B 2)

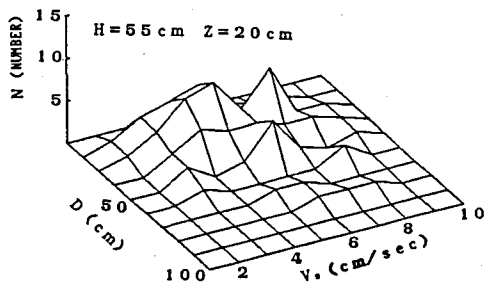


図14 渦管外縁速度頻度分布 (A 1)

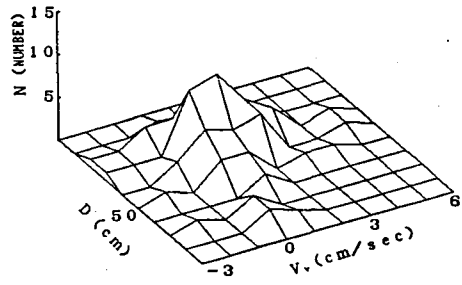


図15 渦管鉛直方向移動速度分布 (A 1)

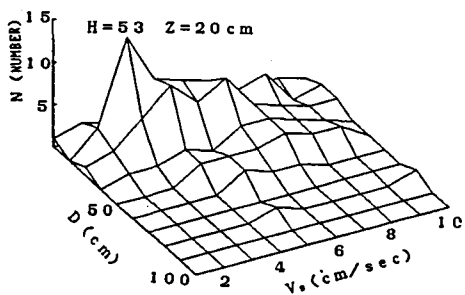


図16 渦管外縁速度頻度分布 (A 2)

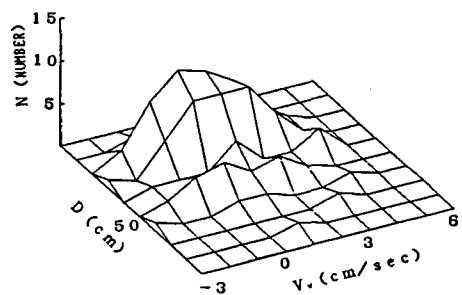


図17 渦管鉛直方向移動速度分布 (A 2)

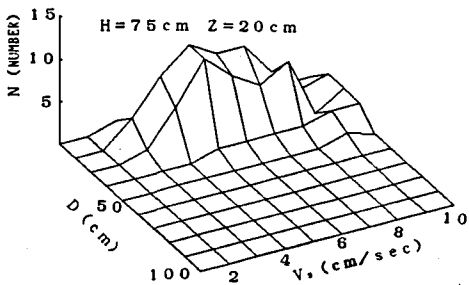


図18 渦管外縁速度頻度分布 (B 1)

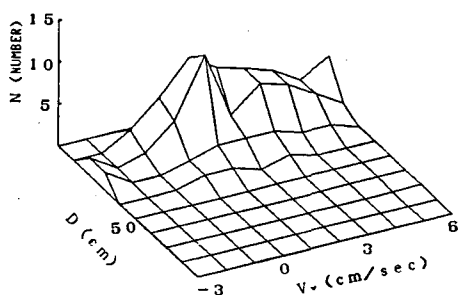


図19 渦管鉛直方向移動速度分布 (B 1)

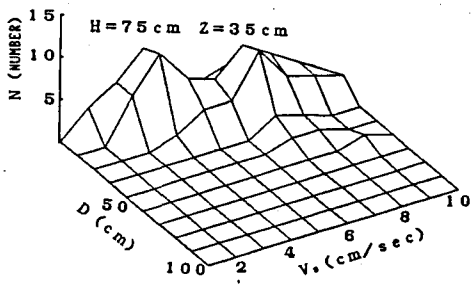


図20 渦管外縁速度頻度分布 (B 2)

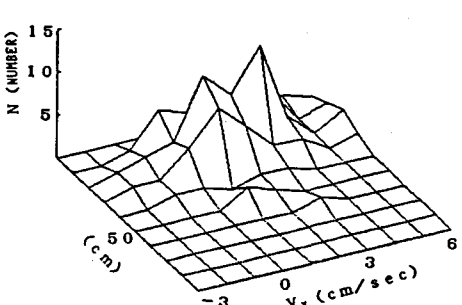


図21 渦管鉛直方向移動速度分布 (B 2)

そらくそこからは、礫や石のスケールに相当した広がりを持つ小さな渦が放出されていると考えられる。

孤立した半球からの渦の放出については、多くの研究者が、可視化、数値計算等を行っているが、物理モデルとしては玉井⁹⁾の提唱しているものを図22に示す。こうして放出された無数の小さな渦管は、上昇するとともに互いに干渉しあい、混ざり合うであろう。ただ、こうした小さな渦はあくま

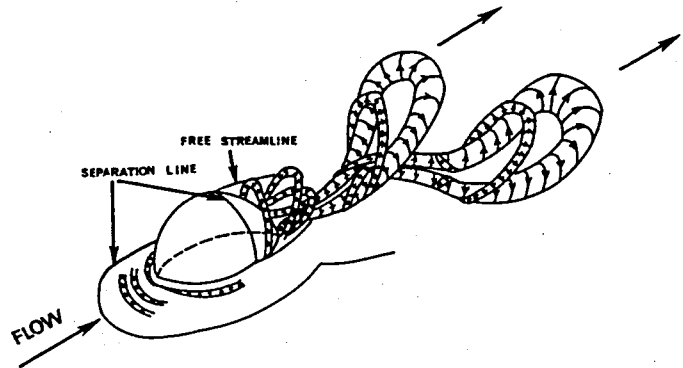


図22 玉井らによる半球後背の渦

でも個々の粗度要素である石礫のごく近傍の速度勾配解消のためのものであって、平均流のシアを大きく解消するものではない。河川でも上流の、河床の石が水深と同オーダーの場合や周囲の石礫の数倍以上もある場合には水面にまで届く事はある。

河川にはさらに、小規模から大規模にいたる種々の河床形態による、水深あるいは水深の数倍以上のオーダーの凹凸が存在する。ある程度大きな水深と流速の場合に観察される、単発のもの数倍の広がりや寿命をもち、それ自身の中で徐々に新たなボイルを発生させる大型のボイルはこうした河床形態が引金になっていると考えられる。

図9中の1, 3, 4, 5は渦管（発達した湧昇流を伴ったものも含む）通過によるレイノルズ応力への正の寄与の典型的なものである。

3, 4はかなり強い渦管の通過を示しているが、B2の記録には顕著に現れておらず、同一の渦に含まれていないことを示している。B1とB2の水平距離は60cmであるから、渦管の足が急に極細になっているか、渦塊に近い形で歪の解消が行われたかどちらかである。渦塊だとしても、ラグビーボールのように球形よりは横に長いものと考えられる。

一方、1と5は明らかに同一の渦管であろうと推察される。1については、 u' と v' の方向及び継続時間からして、発達した湧昇流に巻き上げられた渦管が、レイノルズ応力に対して急激かつ大きな値で寄与している典型的な例である。

3は湧昇流が、レイノルズ応力に対して直接的にゆっくりと正の寄与をしている例である。

2はいわゆる sweep がレイノルズ応力に正の寄与をしている例である。

こうした例からも明らかのように、3次元的な広がりを持つ渦管を捉えようとすれば、空間相関等のような、平均値としての扱いでは空間構造を正確には把握できない。

図14は、A1のデータを分析し、流れ方向流速 $u(z)$ と通過時間 T から、 $D = u \times T$ とし渦管直径 D をもとめ、渦管外縁速度 v_e とあわせた分布形を示したものである。

図15は、同じくA1について、渦管の上昇速度の分布形を示したものである。自己誘導で上昇するものと、発達した湧昇流に巻き上げられるものとを個々に区別して分析していないためグループ別の特徴に言及することはできない。図16以下は、同様にそれぞれA2, B1, B2に対応している。

B 1, B 2 の場合, 概略的に20cm から7割5分水深の56cm まで, 鉛直方向移動速度3.5 cm/sec で渦管が移動したとする。平均流速70cm/sec として, 流下距離は約7.2m となり, これは7割5分水深位置での最大乱子スケールに相当する。

5. あ と が き

河川乱流場の乱れエネルギーの生成に主たる役割を果たす, 河床近傍の渦管について, これまでに提唱されているモデルを参考にして若干の考察を加えた。その結果から, 著者は河川の鉛直乱流場を, 3領域に分けて扱うのが基本であると結論する。最下層は, 個々の石礫から剝離する無数の小さな渦の混合層, その上は平均流の歪を解消するために放出された渦管が発達, 上昇する中間層, さらにその上の渦管が崩壊移流する最上層である。水深オーダー以上の河床の凹凸は, 平均流の歪解消にあたり, 常に最優先されるわけではなく, それに見合った水深と流速が準備されたときに大規模剝離渦を放出し, それは中間層の中小の渦を巻き込みながら流下する。

流れの3次元構造の研究に, 可視化手法が有効な補助手段となることはすでに実験室レベルで証明済みである。本研究では, 現在波高計とビデオカメラを水面観察に導入し, 速度変動記録と対応させながら, 物理モデルの確立に向けて現地観測を進めている。

終わりに, 本研究を進めるにあたりご指導頂いた広島大学工学部余越正一郎教授, 計器類の便宜を図って頂いた信州大学工学部富所五郎助教授に感謝致します。

6. 参 考 文 献

- 1) 石原安雄, 余越正一郎: 河川の乱流構造に関する一考察, 京大防災研年報, 13号 B, PP. 323-331, 1970.
- 2) 木下良作: 航空写真による洪水流の解析, 写真測量, Vol. 6, No.1, pp. 1-17, 1967
- 3) 宇民 正, 上野鉄男: 可視化法による大スケール乱れの研究, 京大防災研年報, 19号 B, pp. 267-288, 1976.
- 4) Theodorsen, Th.: The Structure of Turbulence, 50 Jahre Grenzschichtforschung, (ed. H. Gortler and W. Tollmien), Friedr. Vieweg&Shorn, p. 55, 1955.
- 5) Kline, S. J., W. C. Reynolds, F. A. Schraub. and P. W. Runstadlar: The Structure of Turbulent Boundary Layer, Jour. Fluid Mecha, Vol. 30, pp. 741-733, 1967.
- 6) Willmarth, W. W. and B. J. Tu: Structure of Turbulence in the Boundary Layer near Wall, Phys, Fluids, Suppl., pp. s134-s137, 1967.
- 7) Laufer, J.: New Trends in Experimental Turbulence Reserch, Ann. Rev. Fluid Mecha., Vol. 7, pp. 307-326, 1975.
- 8) 松岡保正: 砂礫河床上の乱れ特性, 長野高専紀要, 第19号, PP. 97-140, 1988.
- 9) N. Tamai, T. Asaeda&H. Ikeda: Voltex Strucjures around a Hjmispheric Hump, Boundary-LayerMeteorology, Vol. 39, pp. 301-314, 1987.