

# 人工水路屈曲部乱流の現地計測方法

Method of field measurement of turbulence  
at a bend in artificial channel

大谷英夫\* 石野和男\* 出口 朗\*\* 都築 進\*\*\*

by Hideo OHTANI, Kazuo ISHINO, Akira DEGUCHI, Susumu TSUZUKI

Field measurements of turbulence was carried out at a bend in an artificial channel by electro-magnetic anemometers. Dimensions of the channel are 4.8 m in height and 5.5m in width. The velocity in the channel exceeds 1 m/s. Number of the measurement points is 83 at a section. Since the velocity is fast and the flume is large, the special cares were taken for the measurements. The frequency response of the anemometers must be quick enough for the turbulence, and the directional characteristics must be accurate. Moreover, the supporting apparatus of the anemometers should not influence the flow and should not vibrate with less than 8Hz. The problems above are carefully examined by laboratory experiments. As the results of the field measurement the asymmetric secondary flow cell were found, probably due to the difference of the roughness.

Keywords: field measurement, turbulence, electro-magnetic anemometer, bend

## 1. まえがき

近年のコンピュータの発達および乱流モデルの実用化に伴い、発電所冷却水路の水理設計手法は水理模型実験からk-εモデル等による数値シミュレーションへ移行する方向にある。しかしながら、実験室で構築された乱流理論の現地適用性はもとより、数値シミュレーションの現地への適用性についてはこれまで十分な検討がなされておらず現地計測に基づく検討が重要な課題となっている。開水路乱流については最近、多くの現地観測結果が報告されている。例えば、欄津ら(1991)<sup>1)</sup>はメーカーに改良特注した電磁流速計を用いて、琵琶湖疎水の3次元乱流の現地計測を実施し、長時間平均の乱流構造についてはレイノルズ相似則が成立することを確認している。また、辻本ら(1991)<sup>2)</sup>は相対水深、植生など流れに影響する境界条件が卓越する

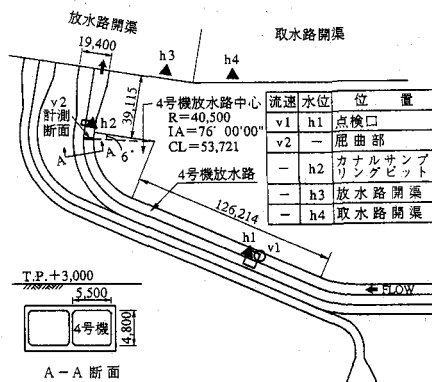


図-1. 計測位置

\* 正会員 工修 大成建設技術研究所 (〒245 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

\*\* 正会員 工修 東京電力株式会社柏崎刈羽原子力建設所土木課

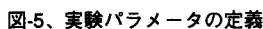
(〒945-03 新潟県柏崎市青山町16番地46)

\*\*\* 正会員 工修 東京電力株式会社原子力建設部土木建築課 (〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3)

本論文では、計測方法に関する室内予備実験の結果および現地での計測方法について述べるとともに、得られた計測結果の一部を紹介する。

## 2.1 流速計の方向特性向上とその確認

図-3, 電磁流速計の方向特性



速範囲（1m/s程度）についても同様の影響が現れると考えられる。そこで、現地計測では遠心力により発生する管路屈曲部の二次流のパターンを考慮して、主流方向に比べて二次流成分が大きい屈曲内側でプローブの柄の影響が小さくなるように、図-7のようにプローブの向きを決定した。

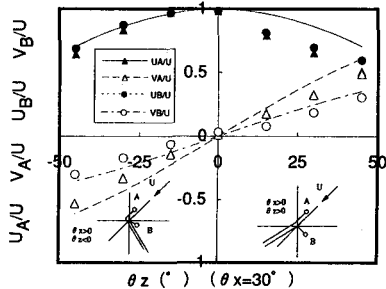


図-6、方向特性

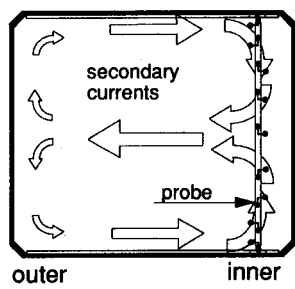


図-7、プローブ設置方法

## 2.2 振動する電磁流速計の出力特性

電磁流速計の取付治具が振動した場合の影響を検討するため、振動時の電磁流速計の出力特性を調べた。電磁流速計を取り付けた振動台を水槽上に設け、水路横断方向に振動させた。加振周期および振幅をパラメータに、流速計の出力値を計測した。静水中では、プローブの振動により周辺流体が乱される影響が顕著になると考えられるため、流水中でも同様の実験を行なった。図-8に計測された最大出力値Vと、 $v = \omega A$  ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ : 振動周波数,  $A$ : 振幅) で表される流速計の最大移動速度の比  $V/v$  を示す。いずれの条件も1.2～2倍程度に増幅された出力値が得られた。一方、図-9は波浪場における電磁流速計とレーザー流速計の出力値を比較した図である。両者の対応は良好で流速計が振動しない場合は問題ないことがわかる。すなわち、電磁流速計は自身の振動に対してのみ、増幅された値が出力されることが分かった。この原因については現在明確にされていない。これらのことから、現地計測では振動を最小限に抑える必要があることが確認された。

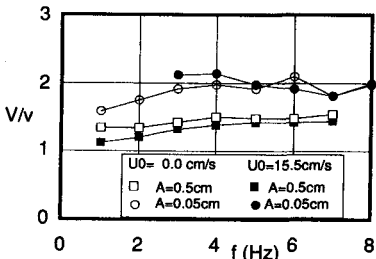


図-8、振動応答特性

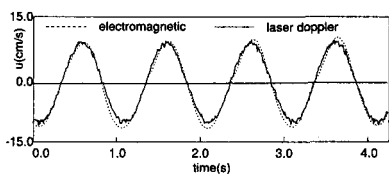


図-9、波浪場での電磁流速計とレーザー流速計の比較

## 2.3 電磁流速計の取付治具の構造

現地計測では、図-10に示すように鉛直パイプφ114.3mmをサポートとし、鉛直パイプサポートから張り出しを設けて電磁流速計の治具とした。また、図-7のように鉛直方向に9点分の計測点を設けた。鉛直パイプサポートは、水路天井部および底面の水路横断方向に設置したアングル（以下固定アングルと呼ぶ）に固定した。鉛直パイプサポートおよび固定アングルは、流速3m/sの流れの中でも十分な強度が得られるよう設計し、さらに、2.2の検討から固有振動数が8Hz以上になるようパイプ内にモルタルを注入し曲げ強度を増加させる対策をした。また、鉛直パイプサポートと固定アングルとの接続部には、ヒンジを設けるとともに、底面側の接続部下端にローラを付け、固定アングルを鉛直パイプサポートのレールとして機能させ、水中の測線移動作業が容易になるように工夫した。ただし、計測時、ヒンジは固定される。

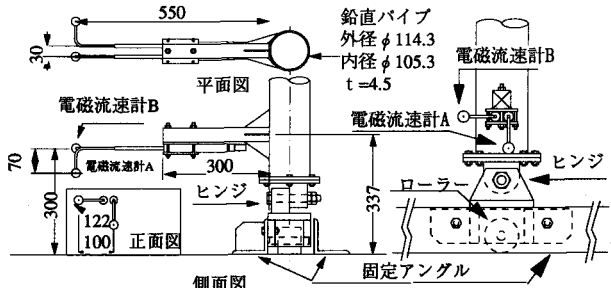


図-10、流速計治具

## 2.4 治具が流れに与える影響

治具の設計において、治具が流れに与える影響よりもその強度を優先したため、幅80cmの水路を用いて、治具が流れに与える影響を検討した。鉛直パイプサポートおよび固定アングルは実物大を用い、固定アングルは水路幅にわたって設置した。水路に治具を設置することによる縮流の影響は、現地よりも厳しい。

### (a) プローブと鉛直パイプサポート間の距離の決定

2.3で決められた鉛直パイプサポート前面( $x=0$ )から、上流側に電磁流速計を移動させ、鉛直パイプサポートへの接近流速分布を求めた。計測点の底面からの高さは $z=25\text{cm}$ とした。図-11に実験結果を示す。鉛直パイプサポートから上流へ離れるに従い流速は一定値になる。流速が一定値になるまでの距離が鉛直パイプサポートの影響距離とみなせる。また、流速が大きくなるほど鉛直パイプサポートが上流に与える影響距離は小さくなる傾向が見られる。実験条件の最小接近流速値のケースの影響距離と鉛直パイプからの張り出し部の強度を考慮して、プローブは鉛直パイプサポートより550mm上流側に設置することにした。

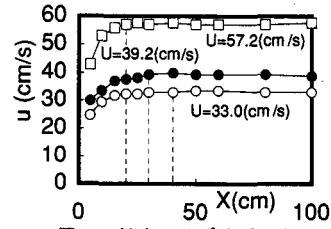


図-11, 鉛直パイプサポート  
前面の接近流速分布

### (b) 鉛直パイプサポートが流速鉛直分布に与える影響

図-12は鉛直パイプサポートより550mm上流側で計測した平均流速の鉛直分布であり、鉛直パイプサポートを設置しない場合と比較した。各点の平均流速 $u$ は底面から80cmでの値 $u_{80}$ で無次元化し、底面からの高さ $z$ は固定アングルの高さ $k$  ( $k=100\text{mm}$ )で無次元化した。図-12より固定アングル近傍 $z/k < 2$ では流速分布形は両者で異なるものの、それより上方では両者共一様分布となった。乱れ強度の鉛直分布を無次元化したものを図-13に示す。図-12と同様に規格化してある。固定アングル近傍では、平均流速分布に見られた固定アングルに起因する $z$ 方向の速度勾配が大きくなる分、乱れ強度も大きい。固定アングル近傍以外の分布形はほぼ一致した。これにより、固定アングルの影響は $z/k < 2$ で現れることが分かった。現地では水路断面スケールの曲りによる乱れ場を計測対象とするため $z/k > 2$ の範囲で議論すれば十分に現象を計測できると考えられる。

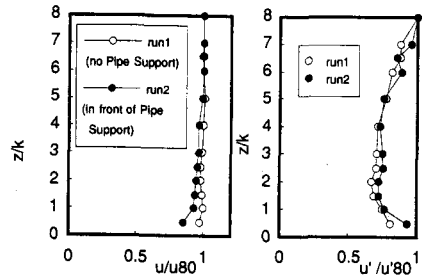


図-12, 平均流速分布      図-13, 乱れ強度分布

## 3. 現地計測

### 3.1 計測方法

計測位置は図-1に示す、放水路屈曲部終点である。計測点は図-14に示すように、横断方向に9測線、鉛直方向に9点、および底面近傍に2点の計83点である。座標系は右手系で、主流方向に $x$ 、水路横断方向に $y$ 、鉛直上向きに $z$ 、それぞれの流速成分を $u, v, w$ とした。鉛直パイプサポートは、ポンプ停止時、潜水作業により移動した。なお、屈曲部計測断面より上流側約100mの点に流速計 $v1$ を固定し、流れの定常性の確認を行なった。また、水位を流速計測断面をはさんで2点、および放水路開渠、取水路開渠にて計4点計測した。電磁流速計のアンプルスケールは $u$ 成分 $\pm 200\text{cm/s}$ 、 $\pm 150\text{cm/s}$ 、 $\pm 100\text{cm/s}$ 、 $v, w$ 成分 $\pm 150\text{cm/s}$ 、 $\pm 50\text{cm/s}$ 、 $\pm 25\text{cm/s}$ の切替えが可能で各計測点毎にレンジを決定した。データサンプリングは、土ら(1988)<sup>3)</sup>を参考に、ポンプ始動後のサージ

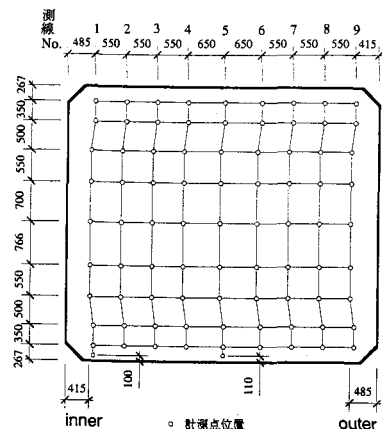


図-14, 計測点位置

ングが安定する約20分以上の時間を置き、流れの定常性をv1流速計で確認した後に開始した。データ取得装置はHP9000-835SRXシステムを用い、AD変換器を通しデジタルデータをハードディスクに保存した。サンプリング周波数は40Hzで、約40分間取得し、取水路開渠の水位データがほぼ定常な時間帯を409.6秒間選択し解析対象データとした。このようにして得られた時系列データは、流速計の応答周波数を考慮し、8Hzのローパス数値フィルター処理をした。ここで使用した応答周波数は、流速計の周波数特性G(f)=1の範囲で、それ以下の範囲は考慮していない。なお、振動に対しては図-15に示す乱れのスペクトル解析の結果、鉛直パイプサポートの固有振動数(約10Hz)に一致して、非常に周波数帯の狭い振動ピークが見られた。この振動パワーは、乱れのパワーに比べて無視できるほど小さいため振動による計測値への影響はないと判断した。計測データは計測終了後直ちに現地で処理し、流速の時系列、平均流速分布、乱れ強度分布、レイノルズ応力分布、乱流エネルギー分布、二次流ベクトル図を出力した。したがって、リアルタイムのモニターでは判断しにくいデータ欠損があった場合でも即時に再計測できる。計測は、平成5年5月31日から5日間行なった。計測条件を表-1に示す。

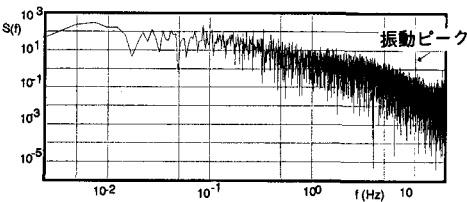


図-15.乱れのスペクトル

表-1 計測条件

| 日付<br>(平成5年) | 計測線 | 計測時刻<br>h:m:s | 解析開始時刻<br>h:m:s | 天候   | 風   | 気温<br>℃ | 水温<br>℃ | 塩分<br>g/1000cm <sup>3</sup> | 水の密度<br>g/cm <sup>3</sup> | 水位(T.P.cm)             | 時*計搬入口<br>流速v1(cm/s) | ポンプ出力<br>% |
|--------------|-----|---------------|-----------------|------|-----|---------|---------|-----------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|------------|
| 6月1日         | 5   | 14:21-15:01   | 14:30           | 晴れ   | なし  | 21.0    | 17.5    | 28.5                        | 1.0204                    | 117.2 107.2 104.8 7.2  | 119.8                | 108        |
| 6月2日         | 4   | 9:55-10:35    | 10:04:40        | 晴れ   | 強   | 29.0    | 18.0    | 29.5                        | 1.0211                    | 117.9 119.9 117.4 32.3 | 118.4                | 108        |
| 6月2日         | 3   | 14:00-14:40   | 14:25           | 曇    | 強   | 29.0    | 17.0    | 30.0                        | 1.0217                    | 115.6 117.1 114.6 17.4 | 117.8                | 108        |
| 6月3日         | 2   | 10:00-10:40   | 10:25           | 晴れ   | 強   | 20.0    | 14.5    | 31.0                        | 1.0230                    | 128.8 133.3 150.8 62.5 | 118.5                | 108        |
| 6月3日         | 1   | 14:00-14:40   | 14:10:20        | 曇時々雨 | 強   | 20.0    | 15.0    | 31.0                        | 1.0229                    | 131.3 133.8 139.6 58.0 | 118.7                | 108        |
| 6月4日         | 6   | 10:00-10:40   | 10:07:20        | 曇時々雨 | 強   | 19.0    | 17.5    | 30.0                        | 1.0216                    | 139.3 129.3 143.8 52.8 | 118.8                | 108        |
| 6月4日         | 7   | 14:00-14:40   | 14:09:10        | 雨    | 強   | 16.0    | 18.0    | 30.0                        | 1.0215                    | 142.1 131.7 142.4 55.9 | 118.1                | 108        |
| 6月5日         | 8   | 10:05-10:45   | 10:14:10        | 曇    | 強   | 16.0    | 18.5    | 30.0                        | 1.0214                    | 132.2 122.1 132.0 40.1 | 118.4                | 108        |
| 6月5日         | 9   | 14:00-14:40   | 14:07:30        | 曇    | やや強 | 17.0    | 18.5    | 29.5                        | 1.0210                    | 131.9 120.2 136.9 48.4 | 118.4                | 108        |
| 5月31日(予備)    | 5   | 10:03-10:40   | 10:03           | 曇    | なし  | 19.0    | 18.0    | 29.0                        | 1.0200                    | 119.6 115.9 113.4 22.9 | 117.7                | 108        |

注1) 6月5日、計測線8を計測時に5-10、計測線9を計測時に1-10を計測。

### 3.2 流れの再現性に関する検討

計測は5日間にわたるため、その間、潮位や外洋の波浪条件により取水路開渠h4と放水路開渠h3の水位差は変化する。h3、h4の水位差をポンプの揚程と考えると、ポンプ流量は揚程により変化する。揚程の変化量によっては計測線ごとの流れの再現性が確保できなくなる。図-16は、5月31日に実施した予備計測と6月1日に同じ計測線で得られた水路中央の平均流速、乱れ強度、レイノルズ応力の鉛直分布である。また、図-17は、各計測線計測終了後に得られたv1、およびh3、h4の水位差である。図-16より、5/31と6/1の分布形は良好に一致し、図-17に示す揚程の変化が与える影響は小さい。また、図-17から計測期間を通じての揚程の変動は、5/31と6/1の揚程差と同程度で、また、v1の値もほぼ一定であることから流れの再現性が確保されたと判断できる。

### 3.3 計測結果の一例

#### (a) 断面屈曲部の平均流況

図-18はuの断面内分布図である。uは、曲りの内側が低速(約80cm/s)、曲りの外側が高速の流れ(約130cm/s)に

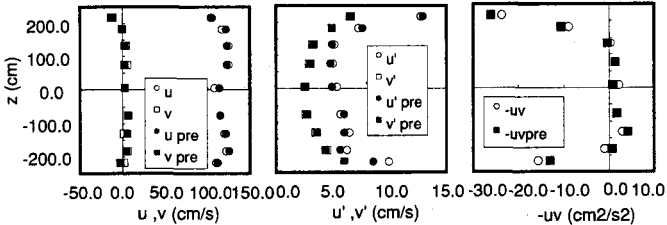


図-16.流れの再現性

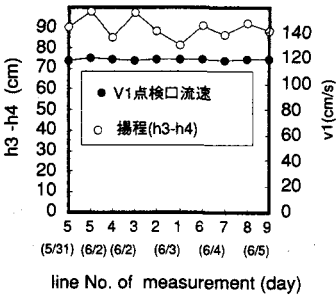


図-17.計測期間中の揚程

なっている。直線部では放水路断面中央にあった流れの高速域が、曲りによる遠心力のために外側へ移行する現象が計測されている。曲り内側の鉛直分布は、断面中央部が低速(約80cm/s)であるのに対し、天井側と底面側で高速(約110cm/s)になる上下二山型の分布になっている。この傾向は、曲り外側へ移行するに従い弱くなる。

図-19は、二次流のベクトルである。二次流は、水路中央部で曲り外側に向い、水路壁面に沿って曲り内側へ流れ、上下二対の二次流セル(渦)を形成しているのがわかる。二次流の流速は、水路底面の大きなところで15cm/s程度、断面平均でも5cm/s程度であった。また、上下一対の二次流のセルの大きさは非対称で、上側のセルの径は大きく、下側のセルの径は小さい。セルの非対称の原因の一つと考えられるものとして天井面で見られた生物付着の影響を挙げることができる。天井部にはほぼ全域にわたって、長さ3cm程度の藻類および、厚さ数ミリのカサネカンザシが薄く付着していた。Naot, D. (1984)<sup>4)</sup>は、代数応力モデルで壁面粗度をパラメータにして直線開水路の二次流を計算しており、壁面粗度が二次流に影響を与える結果を得ている。この結果から、天井部の粗度が側壁および底面の粗度と異なることにより、上下非対称の二次流セルが生じたものと推定される。

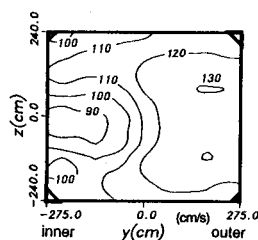


図-18,  $u$  断面内分布

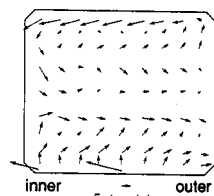


図-19, 二次流ベクトル

#### (b) 乱れ強度分布

図-20は $u$ の乱れ強度の断面内分布である。乱れ強度は、曲り部の内側で大きく、 $u$ の二山型の鉛直分布の谷間で特に大きい。また、水路天井付近には生物の影響のため乱れ強度が大きく現れている。

#### (c) レイノルズ応力

図-21, 図-22は $-u'v'$ ,  $-u'w'$ の断面内分布である。主流が壁面の影響を受けた領域では $-u'v'$ ,  $-u'w'$ とも大きい。 $-u'v'$ は $u$ が曲り外側に向って増大する領域で大きく、 $-u'w'$ は曲り内側に見られる $u$ の二山型の平均鉛直分布の領域で大きい。曲り内側でエネルギー生成が大きいことが分かる。

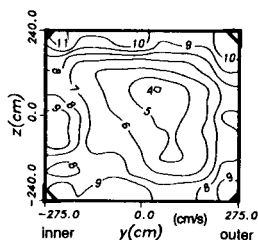


図-20,  $u'$  断面内分布

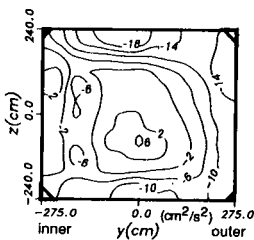


図-21,  $-u'v'$  断面内分布

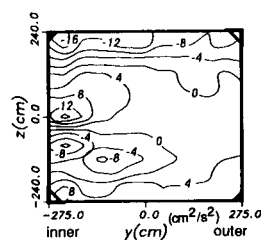


図-22,  $u'w'$  断面内分布

#### 4. あとがき

二次流が発達し、かつ、暗渠で、流速が1m/sを越える流れ場である管路屈曲部の現地計測方法および計測結果の一例について述べた。今後、現地計測結果の考察を深め、乱流構造を室内実験結果、および数値シミュレーション結果と比較して行く予定である。

なお、本計測では、東京電力(株)柏崎刈羽原子力建設所およびJVの方々の御指導を賜った。また、室内実験では(株)ケネックのご協力を得た。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 榎津, 中川, 瀬谷: 琵琶湖疎水の3次元乱流計測, 水工学論文集第35巻, pp. 345-350, 1991
- 2) 辻本, 北村, 岡田, 王子: 小型電磁流速計による野外水路での乱流測定, 水工学論文集第35巻, pp. 333-338, 1991
- 3) 土, 長藤, 石野: 冷却取水ポンプの起動・停止時に放水路内で発生するサージングの現地観測と数値計算について, 第43回年次学術講演会, pp. 478-479, 1988
- 4) Naot, D.: Response of channel flow to roughness heterogeneity, Jour. Hyd. Eng. ASCE, Vol. 110, pp. 1568-1587, 1984