# 開水路中に設置された直立円柱群中の 河床せん断力評価 SHEAR STRESS ACTING ON THE BED WITH VERTICAL

CIRCULAR CYLINDERS IN OPEN-CHANNEL FLOW

# 林建二郎1・斉藤良2 Kenjirou HAYASHI and Ryou SAITOU

「正会員 Ph.D.	防衛大学校 建設環境工学科	(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)
2学生会員	防衛大学校 建設環境工学科	(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

The shear stress acting on the bed around a vertical circular cylinder installed in an open channel with single and multiple rows are measured by using a shear stress sensor which is one component load cell. The velocity and Reynolds stress distributions on the bed with vertical circular cylinders are also measured by using a Laser Doppler anemometer(LDV). The close agreement between the shear stress measured by the shear stress sensor and the estimated values from the velocity and Reynolds stress distributions are obtained in the case of open channel flow without circular cylinders. The values of friction coefficient and Manning's roughness coefficient in the part of bed increase with increase of arrangement density of multiple rows of vertical circular cylinders in the open channel.

*Key Words :* shear stress, friction coefficient, Manning's roughness coefficient, circular cylinders, bed, open channel, Reynolds stress, shear stress sensor, Laser Doppler anemometer

# 1. はじめに

近年,環境問題の高まりとともに河道内に生育してい る樹林やヨシ等の抽水植物の保護・育成やその積極的な 利用が重要視されている.しかし,これら植生群は大き な粗度であり,その抵抗則を把握することは洪水対策面 や,植生群が有する土砂の堆積効果の評価において重要 である<sup>1)</sup>.また,これら植生群を有する河床面において 生じる幹や茎まわりの局所洗掘量の評価も,植生基盤の 保持・安定面から重要である<sup>2)</sup>.

水深が樹木の樹冠部高さより低く樹木の樹幹部のみが 浸水している河川流れを模擬した直立円柱群を有する開 水路流れの合成粗度係数n<sub>i</sub>は,後記の(7)式で評価される. 式中のn<sub>b</sub>は河床部の粗度係数,右辺第2項は樹幹部の粗 度係数の大きさを示す<sup>3</sup>.通常,河床部の粗度係数n<sub>b</sub>は, 樹幹部の粗度係数の大きさに比べて非常に小さい.

樹幹群内の流れは、河床の極近傍から水表面付近まで 水深方向に一様な流速分布(固有浸透流<sup>4)</sup>)を示す.その 結果、河床上の境界層厚さは樹木がない場合に比べて非 常に小さい値となり、樹木群が有る場合の河床部の粗度 係数nbは、樹木が無い場合より異なるものと考えられる. 開水路中の河床せん断力は、エネルギー勾配Lと水深h の計測や、流れ方向流速成分の水深方向分布に対数分布 則を適用することにより評価可能である.しかし、樹木 群がある場合は、河床上の境界層厚さは樹木が無い場合 に比べて非常に小さいため、河床せん断力の評価は、上 記の評価法では困難である.

石川ら<sup>5</sup>は、開水路等流中の直立円柱群に作用する抗 力の計測を行い、床面せん断応力による摩擦損失係数 f'を評価し、f'は円柱群設置密度の増加に伴い増加す る結果を報告している.小西・林<sup>6</sup>は、せん断力計を用い た河床せん断力の直接計測を試み、円柱群を有する床面 の摩擦損失係数は、円柱群が無い場合より大きくなる結 果を報告している.

本研究は、樹木群がある河床部の抵抗則を明らかにす ることを目的として、せん断力計測に対する更なる検討 を行い、開水路床面(滑面)に鉛直設置された円柱群中 の河床せん断力の評価を行ったものである.

## 2. 直立円柱群の抵抗評価式

水路幅Bが水深hに比べて十分大きい場合,または側壁 部のせん断力は全せん断力に比べて無視できると仮定す ると,水路長dx間の漸変不等流における流体塊に対す る力の釣り合い式は(1)式で示される<sup>3</sup>.

$$NF_x B \, dx + \tau_b B \, dx (1 - \lambda) = \rho g \, h \, B \, dx \, I_e(1 - \lambda) \tag{1}$$

式中の, N は単位床面積当たりの円柱の本数, F<sub>x</sub> は 円柱に作用する抗力である. τ<sub>b</sub> は河床単位面積に作用 する時間平均せん断力(=床面せん断力)である. ρは 水の密度, g は重力加速度である. λは円柱群の樹林帯 密度(=河床単位面積に占める円柱断面積の比)である.

正三角形をなす千鳥状配置された直径Dの円柱群の中 心間隔をSとすると、 *1*は(2)式で示される(図-2参照).

 $\lambda = N(\pi D^2/4)$ /河床単位面積 =  $\pi D^2/(2 \times 3^{1/2} S^2)$  (2)

円柱1本に作用する抗力Fxを(3)式で評価する.

$$F_x = (1/2) C_D \rho D h U_m^2$$
(3)

ここに, *C<sub>D</sub>*は抗力係数, *h* は水深である. *U<sub>m</sub>*は円柱 群内流れの断面時間平均流速であり(4)式で示される.

$$U_m = Q/\{(1-\lambda)Bh\}$$
(4)

(1)式中の床面せん断力  $\tau_b$  は、水路床の粗度係数を $n_b$  および摩擦損失係数をf とすると(5)、(6)式で示される.

$$\tau_b = \rho g U_m^2 n_b^2 / h^{1/3}$$
(5)

$$\tau_b = 0.5 \,\rho f' \, U_m^{\ 2} \tag{6}$$

(1)式に(2)~(5)式を代入すると、樹林帯密度 *2* で床面 に鉛直設置された円柱群が有する粗度を床面の粗度係数 に含めた合成粗度係数 *n*<sub>t</sub>は, (7)式で示される<sup>3</sup>.

$$n_t = \left[ n_b^2 + C_D 2 \lambda h^{4/3} / \left\{ g \pi D (1 - \lambda) \right\} \right]^{1/2}$$
(7)

一方,合成粗度係数  $n_t$ は,エネルギー勾配  $I_e$ ,水 深h,断面平均流速 $U_m$ を用いると,(8)式で示される.

$$n_t = (1/U_m) h^{2/3} I_e^{1/2}$$
(8)

#### 3. 実験装置および方法

#### (1) 実験装置

実験には、図-1に示す長さ40m,幅0.8m,高さ1mの回 流水槽を用いた.本水槽の床面下部に設けた回流用管路 とポンプ運転により水路内に開水路流れを発生できる.

樹林帯の樹幹部と見立てたステンレス製円柱(直径D =1cm,長さ=30 cm)が,一辺S=10 cmの正三角形の千 鳥配置となる円柱群(設置長468 cm,幅50 cm)を水路 内に設置した(図-2参照).流れ方向への設置列数は



54列,水路横断方向への設置列数は4 or 5列である.本 円柱群の樹林帯密度 $\lambda$ (河床単位面積に占める樹幹部の 断面積比: $\lambda = \pi D^2/(2 \times 3^{0.5}S^2)$ )は0.0091である.

回流通水し,水平床上に鉛直設置した単独円柱 (D=3cm and 6.5cm)および上記の円柱群間に漸変不等 流を流した. 図-3に示すせん断力計(三計エンジニアリ ング(株) S10-1)を用いて,単独円柱まわりおよび円柱 群間の河床せん断力 *c*bを計測した.

円柱群内の流速分布特性を調べるために、円柱群の上 流端から34~35列間における流速の水深方向および水路 横断方向の流速分布計測を2成分レーザードップラー流速計 (ダンテック社製)を用いて行った.流速測定部の大き さは、流れ方向および鉛直方向に0.1mm以下,水路横断 方向に1mm以下である.水路方向流速成分uの時間平均値 をU、その乱れ成分をu'とする.鉛直方向流速成分vの時 間平均値をV、その乱れ成分をv'とする.- ρu'v'の時間 平均値をレイノルズ応力とする.サンプリング周波数は 100Hz以上、サンプリング時間は60sとした.

#### (2) せん断力計

アクリル製の床面上に設置したせん断力計の概略を図 -3に示す. 直径10 mm, 厚さ0.09 mm のステンレス製円 盤の中心をリン青銅製の片持梁支柱に取り付けたもので ある. shear plate 上面に作用する流れ方向の床面せん断 力による曲げモーメントを、支柱下部に貼られた半導体 ひずみゲージで測定するものである. この曲げモーメン トをゲージとshear plateの距離で割ればshear plateに作用 するせん断力が算定できる. このせん断力をshear plate の表面積で割り、床面せん断力  $\varepsilon_b$ を求めた.

計測に先立ち,本せん断力計の静的検定を行った.0 ~50 mgf/cm<sup>2</sup>(0.00049 N/cm<sup>2</sup>)の荷重範囲において荷重 と出力電圧の比例関係は十分であり, 1mgf/cm<sup>2</sup> (0.0000098 N/cm<sup>2</sup>)以下の分解能を有することを確認 した.また,静水中における本せん断力計の固有振動数 はf<sub>mv</sub>=38Hzであった.

この種のせん断力計においては、a) 流れの圧力勾配 により、shear plate両端厚部に圧力差が生じ、新たな力 が作用する、b) shear plate下部間隙内の流体運動により shear plateや支柱に流体力が作用すること等が計測誤差 として懸念される<sup>7)~9)</sup>.また、床面せん断力が小さいた め、ゲージ率確保の面から広面積のshear plateが必要と される<sup>15)</sup>.本せん断力計においては、圧力分布の影響を 軽減するために、a) 直径10mm、厚さ0.09mmの薄く小 径のshear plateを使用、b) ゲージ率確保のため半導体ゲ ージを使用している.また、shear plateの側部や下部に 付着する小さな異物や空気を排泄するためにせん断力計 の側壁には内径約1mmの排泄パイプを取り付けている.

片持梁形式である本せん断力計の shear plate の表面に 作用する圧力が不均一な場合,支柱のゲージ部には新た な曲げモーメントが加わる.この影響を除去するために は,a)高さの異なる支柱の2点にゲージを貼る方法,b) 支柱を平行に2本とし,それぞれの支柱にゲージを貼る 方法等が考えられ,現在試作検討中である.

## 4. 結果および考察

#### (1) 開水路滑面の床面せん断力応力計測

円柱がない開水路床面に本せん断力計を設置し、床面 せん断応力  $\tau_b$ を計測した.その時間平均値  $\tau_{bm}$ の、下記 の代表流速 $U_m$ に対する変化を**図-4** に示す.これら円柱 がない場合の  $\tau_{bm}$  と $U_m$ より算定した本開水路床部のマ ニング粗度係数は $n_b$  = 0.0011であった.図中には、比較 として後記の円柱群を設置した場合の結果も示している.

次に、本せん断力計の精度確認のため、円柱がない開 水路床面せん断力計測点上の水路方向流速 u およびレ イノルズ応力(-ρu'v)の水深方向分布を2次元レーザ ー流速計を用いて計測した. uの時間平均値をumとし、 その水深方向分布平均を断面平均流速Umとする.水深 は、せん断力計測の場合と同様にh = 約15cmに固定した. Um=40cm/sの場合における umの鉛直(z軸)方向分布を

図-5 に示す. z は床面からの距離である. 摩擦速度 $U_*$ の算定には、 $U_m$ =40cm/sの場合の本せん断力計による計



測値  $\tau_m$ =3.2mgf/cm<sup>2</sup> (0.000031N/cm<sup>2</sup>)を用いた(図-3 参照). 摩擦速度は $U_*=(\tau_m/\rho)^{0.5}=1.77$ cm/sである. 図中 には, (9)式で示す対数分布則を実線で示している. 実測 値  $u_m$  と対数分布則との一致は良好であり、床面せん断 応力は  $\tau_u$ =3.2mgf/cm<sup>2</sup> (0.000031 N/cm<sup>2</sup>)と推定できる.

$$u_m/U_*=5.75\log(U_*z/\nu)+5.5$$
 (9)

 $U_m = 40 \text{cm/s} \sigma$ 場合におけるレイノルズ応力(- $\rho u' v'$ )の 鉛直方向分布を同じく図-5に示す.床面近傍の(- $\rho u'$ v')では3~3.3mgf/cm<sup>2</sup>(0.00029~0.000032 N/cm<sup>2</sup>)であ り、 $U_m = 40 \text{cm/s} \sigma$ 場合の床面せん断力計測値 $\tau_{bm} =$ 



3.2mgf/cm<sup>2</sup> (0.000031 N/cm<sup>2</sup>) との一致は良好である.

 $U_m = 23 \text{ cm/s}$ ,および $U_m = 50 \text{ cm/s}$ の場合においても,対 数分布則およびレイノルズ応力分布より推定した床面せ ん断力と,本せん断力計計測による床面せん断力との一 致は良好であった.よって,本せん断力計で開水路滑面 床のせん断応力計測は可能と判断できる.

#### (2) 単独直立円柱まわりの床面せん断力分布

円柱中心を原点とし、流れ方向にx軸、その横断方向 にy軸を取る. x軸の正値(x>0)は円柱の後流域を示す.本 せん断力計で計測した、単独直立円柱(D=3cm,h=15cm,  $U_m=40$ cm/s および D=6.5cm,h=30cm,  $U_m=30$ cm/s) まわ りの時間平均床面せん断力  $\tau_{bm}$ の増加率  $\tau_{bm} / \tau_{0m}$ のx軸 上の変化特性を図-6に示す.  $\tau_{0m}$ は円柱がない場合の床 面せん断力  $\tau_b$ の時間平均値である.

単独円柱前面域のx軸上の増加率 τ<sub>bm</sub> / τ<sub>0m</sub> の変化特性 に関する既存値として、開水路中に鉛直設置した単独円 柱周りの床面せん断力を実測した中川、鈴木<sup>10)</sup>の結果を ●印で、玉井、中尾<sup>11)</sup>の結果を▲印で、Sumer等<sup>12)</sup>の結 果を×印で示す.また、石田等<sup>13)</sup>の一方向流中の平板上 に鉛直設置された単独円柱周辺の流体場のNavier-Stokes 方程式の3次元数値解析結果を破線で示す.

単独円柱の前面近傍( -1<x/D<-0.5, y=0 )では, 円柱の根元を囲むように形成される馬蹄形渦の影響を受け,主流と逆方向のせん断力が作用している. x/D = -1付近で  $\tau_{bm}/\tau_{0m} = 0$  となることから,馬蹄形渦領域は, 円柱表面から0.5D 離れた同心円上までと考えられる<sup>11)</sup>. x/D<-2.5になると,せん断力  $\tau_{bm}$ は円柱による流れの影響を受けなくなる.

本実験における増加率  $\tau_{bm} / \tau_{0m}$  の絶対値の最大値は2 であり、Sumer等<sup>12)</sup>の結果(増加率=5.5)に比べて小さ い.この原因としては、本実験で用いたせん断力計の測 定面積が円柱断面積に比べて十分に小さくないことが考 えられる.後流域の 0.5< x/D < 1.7, y=0 でも、円柱側



面に沿う境界層の剥離に伴う後流渦の影響を受け、主流 と逆方向のせん断力が作用している.その増加率絶対値 の最大値は x/D = 1 付近で生じる. 7 < x/D になると、 せん断力  $\tau_{bm}$  は円柱による流れの影響を受けなくなる.

単独円柱の側面域となるy軸上の増加率  $\tau_{bm} / \tau_{0m}$  の変 化特性を**図-7**に示す. 図中には、中川、鈴木<sup>10)</sup>の結果を ●印で、玉井、中尾<sup>11)</sup>の結果を▲印で示す. 円柱極近傍 では主流速度が増加する結果、増加率  $\tau_{bm} / \tau_{0m}$ は以上 となっている. 5 < y/D になると、せん断力  $\tau_{bm}$  は円柱 による流れの影響を受けなくなる.

計測したせん断応力  $\tau_{bm}$ の時系列値に対するFFT解析 を行った.その卓越周波数は1~2Hzであった.本せん 断力計の水中における固有振動数は38Hzである.従っ て,計測された  $\tau_b$ の時間変動成分には共振の影響は含 まれていない.円柱径D=6.5cmの床面せん断力  $\tau_b$ のrms値(標準偏差)  $\tau_{bms}$ を円柱がない場合のrms値  $\tau_{0ms}$ で除 した増加率  $\tau_{bms} / \tau_{0ms}$ を図-6と図-7に併せて示す.馬蹄 形渦が存在する円柱前面および円柱真横近傍では  $\tau_{bms}$ は大きく増加している.円柱後流渦の影響を受け,円柱 端後方での増加率はより大きくなっている.増加現象の 発生は,円柱前方域でのそれより広い範囲で生じている.

#### (3) 円柱群がある場合の床面せん断力分布

円柱群がある水路床面に作用する時間平均床面せん断 力  $\tau_{bm}$  の断面平均流速 $U_m$ に対する変化特性を前記の**図**- **4**に示す.水深は円柱がない場合と同様なh=約15cmに固 定した.せん断力計の設置位置はx/D=4.3,y/D=2.5 である.図中には、円柱群がない水路床面の $\tau_{bm}$ を比較 として示している.円柱群内の $\tau_{bm}$ は、円柱群がない場 合に比べて増加していること、およびこれら $\tau_{bm}$ は $U_m^2$ に比例していることが分かる.円柱群がある場合のこの 位置における摩擦損失係数はf'=0.010となり、円柱が ない場合(f'=0.0043)の約2.3倍となっている.

円柱群内の各点における床面せん断力の増加率  $\tau_{bm}$  /  $\tau_{0m}$  を図-8に示す.各円柱周辺における分布特性は単 独円柱の場合<sup>10),11)</sup>と類似の傾向を示し、円柱後流域 (0.5 < x/D < 2, y/D = 0)では主流と逆方向となる負 のせん断力  $\tau_{bm}$ が生じている.円柱真横 (x/D = 0, y/D = 1.2および x/D = 8.66, y/D = 3.8)では増加率が4以 上の大きなせん断力  $\tau_{bm}$ が発生している(図-6,7参照).

単独円柱の場合は、円柱の近傍でのみ床面せん断力の 増加が見られたが、円柱群の場合には、群中の各円柱か ら形成される円柱後流渦の影響を受け、広い領域でせん 断力  $\tau_{bm}$ の増加現象が生じている.計測した全点の増加 率  $\tau_{bm}/\tau_{0m}$ の平均値は約2.7であった.

#### (4) 円柱群 ( *λ*= 0.0091) がある河床部の粗度係数

上記の床面せん断力の平均値  $\tau_{bm}$ ,断面平均流速 $U_m$ , 水深  $h \ \varepsilon(5)$ 式に代入し、樹林帯密度  $\lambda = 0.0091$ の本水 路河床部の粗度係数 $n_b = 0.018 \ \varepsilon$ 算定した.一方、円柱B と円柱Cの中間点 (x/D = 4.3, y/D = 2.5)の河床近傍での レイノルズ応力計測値から推定したマニング粗度係数は  $n_b = 0.019$ であり両者の一致は良好であった.同様に、樹 林帯密度  $\lambda = 0.020$ の本水路河床部の粗度係数も算定した.

本実験結果から得られた円柱群の樹林帯密度  $\lambda$ と粗度 係数 $n_b$ との関係を**図-9**に示す.図中には、 $\lambda$ = 0.011、  $\lambda$ = 0.015の樹林帯密度を有する滑面河床部の粗度係数 $n_b$ をレイノルズ応力から推定した林、斉藤<sup>(4)</sup>の結果を×印 で示す.粗面河床部の粗度係数 $n_b$ を、エネルギー勾配か ら求めた合成粗度係数 $n_t$ と円柱群の抗力係数 $C_D$ の実測値 から算定した石川ら<sup>5)</sup>の結果(粗面)を△印で合わせて 示す.樹林帯密  $\lambda$ の増加に伴い河床部の粗度係数 $n_b$ が増 加していることが分かる.

## (5) 円柱群内の流速分布

上記のせん断力計の円柱群内設置点 (x/D = 4.3 , y/D = 2.5 )における水路方向流速uの時間平均値U, 乱れ強 度 rms u', およびレイノルズ応力 (-ρu' v')の水深方 向分布を代表例として図-10と図-11に示す.水深はh=約 15cmである.これら図中には, ほぼ同じ水深 h =15cm と断面平均流速 U<sub>m</sub>=38 cm/s を有する円柱群がない場合



の開水路流れのU, rms u, およびレイノルズ応力(- $\rho u v$ )の水深方向分布を比較のために示す.

円柱群が無い場合のU は、境界層が水面まで発達し

ている結果,壁面せん断流としての特性を有し,水路床 近傍では小さく水表面に向かって大きくなっている. 一 方,円柱群内のUは,水路床近傍から水表面付近まで ほぼ一様であることが分かる.円柱群内の乱れ強度 mms u'も,円柱がない場合より大きく,水深方向に一様と なっている.これらは,鉛直設置された円柱群からの後 流渦生成により円柱群内の流れ構造が水深方向に一様化 された結果(固有浸透流<sup>4)</sup>)と考えられる.橋本<sup>1)</sup>らは, 円柱群内の全空間平均を施した流速分布においても,水 深方向への一様化が存在する結果を報告している.

水表面近傍流速Uの急激な増加は、円柱群の存在によ る気泡混入の結果と考えられる.

円柱群内のレイノルズ応力(-*ρuv*)は、水深方向の 多くの領域で小さく、水路床近傍では大きな値となって いる.これは、流れが水深方向に一様化された結果、床 近傍まで大きな流速Uが生じ、床近傍に大きな速度勾 配を有する境界層流れが存在する結果と考えられる.

#### (6) 円柱群内における河床の移動

円柱群内では、流速が水表面から水路床まで一様化され、床面せん断力が増加する現象を確認するための移動 床実験を行った. 平均粒径0.51 mm の珪砂を、長さ12m、 幅0.5mの水路床全域に厚さ7cm で敷ならし、水深 h=25cm 、断面平均流速 $U_m = 0.24$  m/sの等流を流した. 尚、水槽上流部からの給砂は行っていない.

開水路中に円柱群がない場合のこの水理条件下では、 砂面上での砂移動現象は見られなかった.

次に、この移動床に前記の円柱群(D=1cm)を設置長 さ1.5m で設置し円柱群なしの場合と同じ条件 (h=25cm, U<sub>m</sub>=0.24m/s)で流水し、河床砂の移動状況 を観察した.円柱群ありの場合は、通水直後から馬蹄形 渦等による局所洗掘が円柱周りに生じ、円柱群内の広い 範囲でも砂の移動が生じた.通水開始後30分程度経過す ると、上記の砂の移動による河床変化が明確に見られた. 通水後32時間経過すると、安定河道状態に近づき、円柱 群内では2~3cmの大きな河床低下が見られた.

## 5. おわりに

片持ち梁型式の小型せん断力計および2成分レーザー 流速計を用いて,開水路に設置された単独直立円柱周り および円柱群内の床面(滑面)に作用する床面せん断力 の空間分布特性を調べた.主要な結果を以下に示す.

- 単独円柱および円柱群内の円柱近傍の床面では、馬 蹄形渦や後流渦の影響により床面せん断力が大きく増 大する。
- 2) 鉛直設置された円柱群からの後流渦生成により円柱 群内の流れ構造が水深方向に一様化され、床面近傍に 大きな速度勾配を有する境界層流れが存在する結果、

断面平均流速および水深が同じならば、円柱群内の床 面せん断力は、円柱群がない場合に比べて増加する.

3) 円柱群の樹林帯密度 2 の増加に伴い, 円柱群がある 河床部の粗度係数nbは増加する.

本せん断力計のshear plateに砂粗度を添付することにより、開水路の粗面床面に作用する床面せん断力の評価も可能と期待できる.

#### 参考文献

- 橋本晴行,平野宗夫:樹林帯における掃流砂量と河床変動に 関する研究,樹林帯を利用した土砂災害対策工の開発,文部 省科学研究費(基盤研究(B)(1)), pp.1-6, 2000.
- 2) 八木澤順治,田中規夫:シナダレスズメガヤの繁茂量の違い を考慮した土砂移動限界の変化および洪水時流失条件の評価, 水工学論文集,第51巻, pp.1249-1264, 2007.
- 林建二郎,藤井優宏,重村利幸:開水路中における円柱群に 作用する流体力に関する実験,水工学論文集,第45巻, pp.475-480,2001.
- 着水義彦・辻本哲郎・中川博次・北村忠彦:直立性植生層 を伴う流れ場の構造に関する実験的研究,土木学会論文集, No.438/II-17, pp.31-40, 1991.
- 5) 石川芳治,水原邦夫,芦田真亜:河道に存在する樹林に作用 する抗力と密生度,樹林帯を利用した土砂災害対策工の開発, 文部省科学研究費(基盤研究(B)(1)), pp.28-41, 2000.
- 6)小西昭広、林建二郎、重村利幸:開水路中に設置された円柱 群中の河床せん断力計則、土木学会関東支部概要集、2003.
- 7) 岩垣雄一, 土屋義人, 坂井順行:海底摩擦による波高減衰の 基礎的研究(2) –海底摩擦力の測定について-第11回海岸工 学講演会講演集, pp.62-68, 1964.
- 8) 松梨順三郎,川谷 健:波による海底の変形に関する基礎的研究-海底摩擦力の測定について-,第12回海岸工学講演会 講演集,pp.29-30,1965.
- 9) 椹木 亨,岩田好一郎,松本 昇:砕波後の波の海底摩擦に 関する研究一砕波の内部機構に関する基礎的研究,第21回海 岸工学講演会講演集,pp.33-38,1974.
- 10) 中川博次,鈴木幸一:円柱橋脚周辺の局所洗掘に関する 実験的研究,土木学会関西支部学術講演集,Ⅱ-46,1971.
- 玉井佐一,中尾誠司:円柱橋脚周辺の局所洗掘に関する実験的研究,高知大学研究報告第37巻,pp.161-172,1988.
- Sumer, B. M., Christiansen N., and Fredosoe J. : The horseshoe vortex and vortex shedding around a vertical wall-mounted cylinder exposed to waves, J. Fluid Mech. pp.41-70, 1997.
- 石田 啓, 楳田真也, 由比正年: 振動流中に設置された直 立円柱周辺の馬蹄形渦および後流渦の特性, 土木学会論文 集, No.705/II-59, pp. 115-128, 2002.
- 14) 林建二郎,斉藤良:開水路中に設置された円柱群中の河床 せん断力計測,土木学会第63回学術講演集,Ⅱ-268,2008.
- 15) 勝井秀博・花村哲也・田村滋美:開水路における底面摩擦の直接測定について、土木学会第32回学術講演集II-198, pp.163~167,1977.

(2009.9.30受付)