

# 開水路湾曲部の流れと河床変動に及ぼす円柱粗度の効果

12418001 青木 健太郎

1. はじめに これまでの河川改修は洪水の疎通を円滑にするため、湾曲部を修正し、直線化し、逆台形の単純な断面形で長い区間を整備してきた。自然な川成を残すためには河岸がその形状、土質、植生の状態に応じてどの程度の外力にまで耐え得るのか、河床変動等に起因する災害がどのようなメカニズムで進むのかを把握する必要がある。そこで本研究では開水路湾曲部の河床変動特性を明らかにし、樹木や透過水制を模擬した高さの異なる円柱群が開水路湾曲部の流れ構造や河床変動におよぼす影響を検討した。円柱粗度の効果は配置や形状などの条件設定が複雑であるため、数値計算による予測が有効な手段となる。本研究では3次元数値計算の適用性についても検討した。

2. 実験方法および実験条件 実験水路は水路幅90cm、深さ30cm、長さ17.2mの長方形断面水路で、上流端から10.8mの位置に湾曲角60°の単一湾曲部を設置し、その下流に4.5mの直線部を接続させたものである。湾曲部の中心曲率半径はR=2.7mで曲率半径・水路幅比R/B=3.0、河床勾配は1/2000である。

実験条件は表-1に示すように設定した。水深は各実験における湾曲開始点上流90cmの水深の平均値である。流量は最上流計測断面の電磁流速計によって計測された流速より求めた。河床には平均粒径0.05cmの珪砂を湾曲上流180cmから湾曲下流の200cmまで厚さ11.5cmで敷き詰めた。固定床実験は河床変動の初期状態を検討する目的で、ケースB-1, Vh-04, 14, 34では河床を平坦にならしセメントで表面を固めて実験し、ケースVh-24, 44では長方形水路の平坦床に直接円柱群を配置して実験を行った。移動床実験は河床変動とその後の流れ構造を調べる

ため移動床での実験を行った。対象は静的洗掘のみで、上流からの給砂は行っていない。通水3, 5時間後の河床形状を計測した。流速は河床変動後の河床表面をセメントで固めた後計測を行った。

底面せん断応力に関する実験では底面近傍3mmの流速を詳細に計測するために超音波ドップラー流速計(ADV)を用いた。底面流速は横断方向に5cm間隔、流下方向に10cm間隔で計測した。断面流速計測には3成分電磁流速計(EMV)を用いた。水深はポイントゲージを用いて計測した。

円柱粗度高さに関する実験は円柱群の3次元性を検討するために、長さ18cmの非水没型円柱群、水深の3/4, 1/2, 1/4の長さである水没型円柱群を湾曲入り口=0°から湾曲出口=60°までの外岸側に設置した。円柱粗度は直径5mmの木棒を用い、横断方向・流下方向に5cm間隔で格子状に配置し、横断方向に5列、22.5cmにわたって設置した。断面流速は3成分電磁流速計(EMV)を用いて計測した。

### 3. 底面せん断応力と河床変動の関係に関する実験

底面せん断応力と河床変動の関係を調べるため底面近傍3mmでの主流速 $U_b$ と横断方向流速 $V_b$ を用いて、流下方向の底面せん断応力を次式で求めた。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho C_f}{2} U_b \sqrt{U_b^2 + V_b^2} \quad (1)$$

固定床実験における対数則から推定した摩擦速度は $U_* = 1.79(\text{cm/s})$ となり、底面流速は $U_b = 26.88(\text{cm/s})$ となるため摩擦抵抗係数は $C_f = 0.0088$ となる。移動床実験に用いた砂の限界掃流力を計算すると平均底面せん断応力に対して約 $\tau_c = 1.03 \overline{\tau_{bx}}$ となる。一般に底面せん断応力の流下方向の勾配が正の場合洗掘が生じ、負の場合堆積が生じる。 $\overline{\tau_{bx}}$ は湾曲開始位置上流90cmにおける横断面の平均底面せん断応力である。

図-1は通水5時間後における河床高コンター図である。 $=45^\circ$ から下流外岸側において洗掘が発達しており、 $=60^\circ$ から下流45cm付近で最大洗掘深が7cm程度になっている。下流直線部の水路中央では等高線の間隔が狭くなっており急勾配になっている。内岸側では $=30^\circ$ から下流45cmにかけて堆積が生じ、 $=60^\circ$ で最大堆積高が6cmになっている。堆積は $=60^\circ$ から水路中央方向へ向かって伸びている。図-2(a),(b)は河床変動前と通水5時間後の底面せん断応力コンター図である。河床変動前のケースB-1では、上流90cmから $=30^\circ$ にかけての

表 - 1 実験条件

ケース名	河床状態	時間(h)	水深(mm)	流量(lit/s)
B-1	固定床	0	131.75	38.34
B-2	移動床	3	131.54	-
B-3		5	129.42	37.96

ケース名	河床状態	円柱高さ(cm)	水深(mm)	流量(lit/s)
Vh-04	固定床	-	158.96	37.17
Vh-14		3.75	149.1	44.64
Vh-24		7.5	150.93	34.69
Vh-34		11.25	149.24	44.65
Vh-44		18	150.47	34.41
Kh-14	移動床	3.75	149.51	44.56
Kh-24		7.5	150.77	42.95
Kh-34		11.25	150.66	43.64
Kh-44		18	150.88	40.3

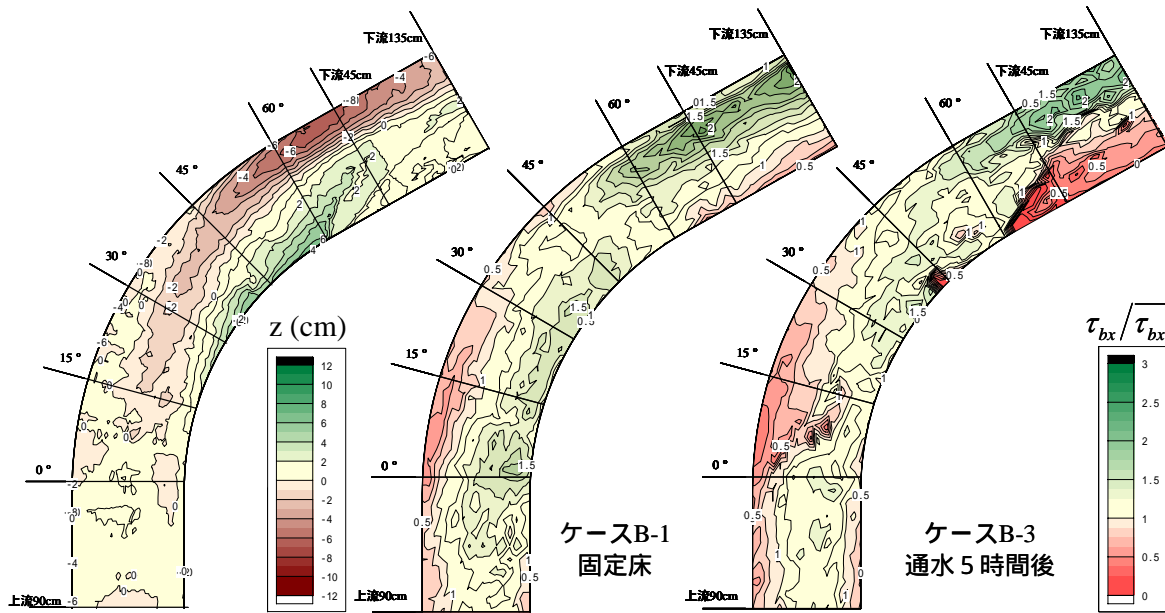


図 - 1 河床高コンター図 (ケース B-3)

外岸側で底面せん断応力の値が 1.0 以下の領域となっているが、上流から給砂を行っていないため堆積は生じない。 $\theta=60^\circ$ より下流にかけての外岸側において底面せん断応力の値が大きくなっており、この位置において洗掘が生じると考えられる。はじめに下流外岸部から洗掘が始まり 2 次流によって内岸へ砂が移送され堆積が生じる。通水 5 時間後のケース B-3 では、 $\theta=60^\circ$ より下流の内岸側に底面せん断応力の小さな領域が河床変動前より広がっている。特に  $\theta=60^\circ$ から下流 45cm にかけては堆積の直後にあたるため流速が遅く底面せん断応力は小さくなった。河床変動前のケースと比較して下流外岸側では底面せん断応力の大きな範囲がより下流へ移動しており、下流 45cm より上流では河床変動が安定し、今後洗掘は下流側へ進行すると考えられる。図 - 3 はケース B-1 における底面せん断応力の流下方向分布である。上流部では内岸側で高く外岸側で低い傾向にあり、流下するに従い外岸側の底面せん断応力が上昇している。外岸壁近傍  $y=85\text{cm}$  では  $x=250\text{cm}$  で 1.0 を越えているのに対し、 $y=65\text{cm}$  では  $x=150\text{cm}$  付近で 1.0 を越えて上昇しておりこの位置以降洗掘が生じることと対応している。一方、 $y=5\text{cm}$  では  $x=200\text{cm}$  付近から急激に減少し、堆積域に対応している。内岸と外岸の底面せん断応力が  $x=200\text{cm} \sim 250\text{cm}$  の区間で逆転し、下流直線部では横断方向の変化が大きくなっている。

4. 円柱粗度高さに関する実験 円柱粗度の高さが開水路湾曲部の流れ構造と河床変動に与える影響を検討するために非水没型のケース (Vh, Kh-44) と水深

図 - 2 底面せん断応力コンター図

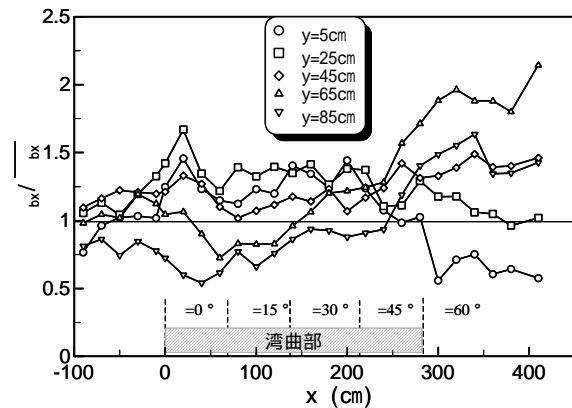


図 - 3 底面せん断応力の流下方向分布 (B-1)

の 3/4, 1/2, 1/4 の水没型のケース (Vh, Kh-34, 24, 14) と円柱群のないケース (Vh-04) を設定し実験を行った。図 - 4 は通水 5 時間後の河床高コンター図である。ケース Kh-24 では下流 45cm 以降の外岸壁近傍で 6cm を越える洗掘が生じている。内岸の堆積は  $\theta=45^\circ$  から発達していき下流 45cm で最大 6cm となっている。下流直線部の堆積は水路中央方向へ伸びていない。ケース Kh-34 では  $\theta=30^\circ$  から下流 45cm にかけての水路中央部に 6cm を越える洗掘が生じている。 $\theta=45^\circ$  から外岸壁に沿って洗掘が生じ、下流 135cm 以降も続いている。水路中央部の洗掘と外岸壁近傍の洗掘はつながっておらず  $y=70\text{cm}$  付近で一度高くなっている。内岸側での堆積は  $\theta=60^\circ$  で最大 7cm となり、下流直線部では水路中央方向へ伸びている。ケース Kh-44 では  $\theta=30^\circ$  から下流 45cm にかけての水路中央部に 6cm を越える洗掘が生じ、洗掘の一部が  $\theta=60^\circ$  付近において円柱群内に侵入している。内岸側の堆積は  $\theta=60^\circ$  付近で最大 8cm となり、下

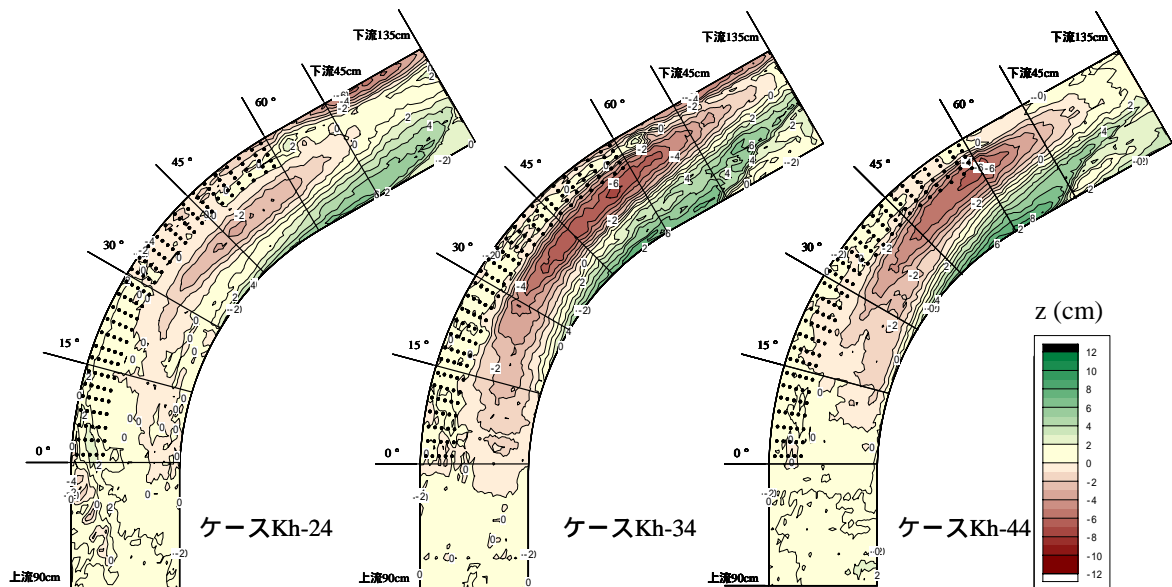


図 - 4 河床高コンター図 (左からケース Kh-24, Kh-34, Kh-44)

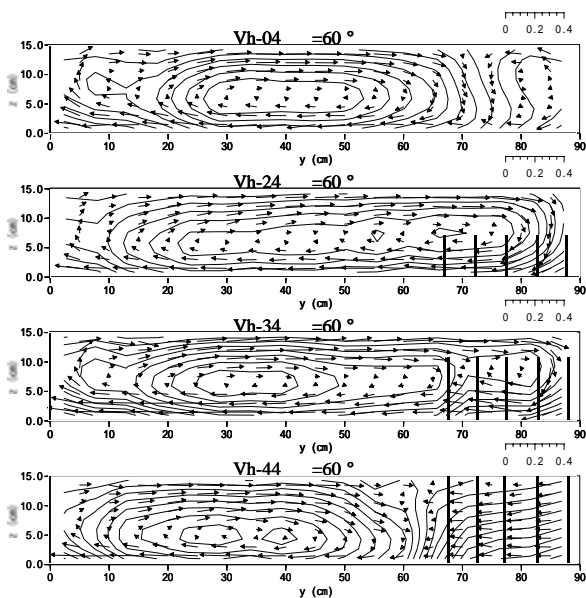


図 - 5 2次流ベクトル図 (固定床)

流 45cm以降水路中央方向へ伸びている。

図 - 5 は固定床における2次流ベクトル図である。2次流の流線も同時に示してある。ケース Vh-04 では円柱群が存在しないため外岸側において2次流とは逆回転の外岸渦が発生している。そのために2次流の中心は水路中央  $y=40\text{cm}$  付近に位置している。ケース Vh-24 は円柱群上方を乗り越えるような流れとなって、断面全体の2次流となり中心が最も外岸  $y=70\text{cm}$  付近に存在している。円柱群を乗り越えた横断方向の流れが外岸壁にぶつかり強い下降流となっている。ケース Vh-34 では主流部と円柱群内において2次流が発生しており二重渦構造となっている。このケースにおいても円柱群上方を越えた流れが強い下降流となっており、そのために外岸壁近傍に洗

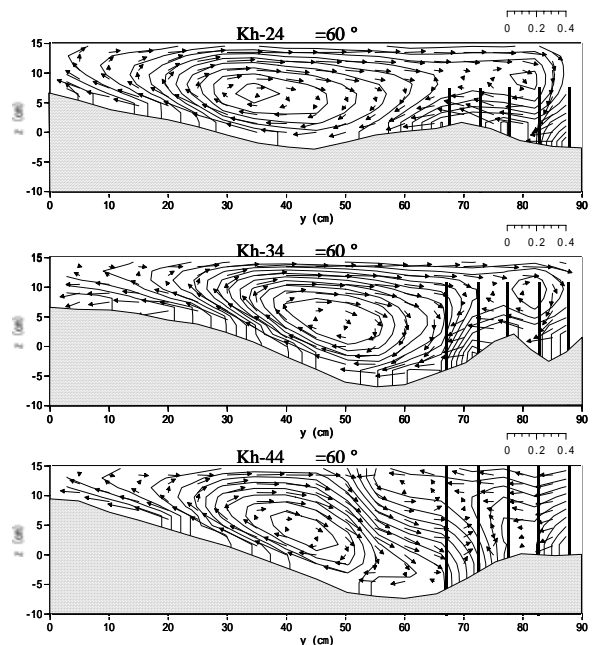


図 - 6 2次流ベクトル図 (移動床)

掘が生じる。2次流の中心は二重渦構造となっているため  $y=35\text{cm}$  付近に位置している。ケース Vh-44 では主流部のみの2次流となり、中心は最も内岸の  $y=30\text{cm}$  付近に位置している。円柱群内は内岸方向へ向かう流れとなっている。図 - 6 は移動床における2次流ベクトル図である。ケース Kh-24 では主流部と円柱群上方に2次流が存在しており二重渦構造を呈している。そのために2次流の中心は固定床のケースに比べ内岸へ移動している。ケース Kh-34 では固定床実験と同様に二重渦構造を呈しているが、洗掘の影響で中心が外岸側へ移動している。ケース Kh-44 では円柱群が壁の働きをするため  $y=60\text{cm}$  の水面付近に外岸渦が発生している。外岸渦のために

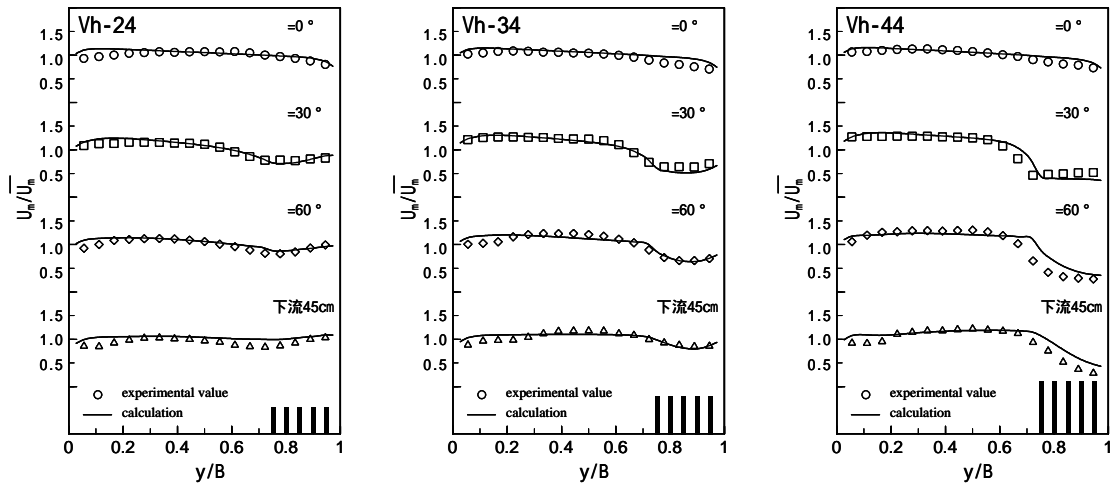


図 - 7 水深平均流速 (左からケース Vh-24, Vh-34, Vh-44)

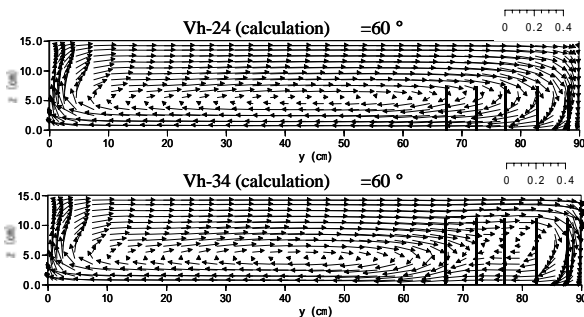


図 - 8 2次流ベクトル図 (計算結果)

2次流は右下がりとなり, 円柱群底部に向かう斜めの下降流が生じ洗掘が円柱群内に侵入した.

5. 3次元数値計算 湾曲部の流れは2次流の発生に代表されるように3次元的な流れである. そのため3次元数値計算による予測が有用である. 基礎方程式は曲線座標系を用いて次式で与えられる.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial UU}{\partial x} + \frac{\partial UV}{\partial y} + \frac{\partial UW}{\partial z} + \frac{2UV}{R+y} \quad (2)$$

$$= -g \frac{R}{R+y} \frac{\partial H}{\partial x} - F_x + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial UV}{\partial x} + \frac{\partial VV}{\partial y} + \frac{\partial WV}{\partial z} - \frac{(U^2 - V^2)}{R+y} \quad (3)$$

$$= -g \frac{\partial H}{\partial y} - F_y + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{R}{R+y} \frac{\partial UW}{\partial x} + \frac{\partial VW}{\partial y} + \frac{\partial WW}{\partial z} + \frac{VW}{R+y} \quad (4)$$

$$= -g \frac{\partial H}{\partial z} - F_z + \frac{1}{\rho} \frac{R}{R+y} \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}$$

$$\frac{R}{R+y} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} + \frac{V}{R+y} = 0 \quad (5)$$

ここに,  $R$  は水路内岸の曲率半径,  $U, V, W$  はそれぞれ流下, 横断, 鉛直方向平均流速,  $\tau_{ij}$  はレイノルズ応力を示す.  $F_x, F_y$  は円柱群の抗力項である.  $\nu_t$  は渦動粘性係数でありゼロ方程式モデルで与える. これらの式は有限体積法によって離散化され,

SIMPLE 法を用いて数値計算された.

図 - 7 は計算結果から求めた水深平均流速を実験結果と比較したものである. ケース Vh-24 では, 円柱群内において外岸壁近傍が加速される実験結果をよく再現している. 下流 45cm では円柱群抵抗の効果はあまり残っておらず外岸側の減速は小さい. ケース Vh-34 では, 外岸側円柱群内の減速がよく再現されている.  $=60^\circ$ , 下流 45cm の内岸側では2次流による水面付近の減速が実験より小さくなったため若干過大評価となっている. ケース Vh-44 では外岸側の円柱群の影響で大きく減速されている.  $=60^\circ$  では2次流が過大に評価されたため流速のせん断層が実験値とずれている. 図 - 8 は数値計算による2次流ベクトル図である. ケース Vh-24 では円柱群上方を乗り越えるようにして断面全体の2次流となっている. 円柱群を乗り越えた流れが外岸壁近傍で下降流となっており, 実験結果をよく再現している. ケース Vh-34 では主流部と円柱群内に2次流が発生する二重渦構造を呈しており実験結果をよく再現している.

6. おわりに 底面せん断応力と河床変動の関係では, はじめ下流外岸側で底面せん断応力が大きくなることから洗掘が生じ, 2次流による内岸方向の輸送によって堆積が生じる. 底面せん断応力の分布と河床変動の関係が明らかとなった. 円柱高さの影響では, 円柱群の高さが変化すると流れ構造が大きく変化し, 河床変動の傾向も大きく変化することがわかった. 3次元数値計算によって2次流及び主流速の3次元構造を良好に再現することができた. 横断方向流速が過大に評価されたため, 今後は円柱群抵抗や乱流モデルを検討し, 水面変動や河床変動を組み込む必要がある. 指導教官 富永 晃宏 教授