

学位論文

定常流下に置かれたかごの流体力学的特性とオイカ
ワ *Opsariichthys platypus* のかごに対する行動特性に関
する基礎的研究

(Fundamental study on fluid dynamic characteristics of
pots and behavior of *Opsariichthys platypus* under steady
flow)

姜京範

2017年

目 次

第 1 章 序論	1
第 2 章 かごの形状と空隙率が流体抵抗に及ぼす影響	5
2-1 材料と方法	5
(1) 実験で使用したかご	5
(2) かごの投影面積	9
(3) 流体力の測定方法	15
2-2 実験結果	17
(1) 迎角によるかごの抗力と揚力の変化	17
(2) 形状と空隙率による抗力係数の変化	23
2-3 考察	29
第 3 章 かごの形状と空隙率が後流域の流速分布に及ぼす影響	31
3-1 材料と方法	31
(1) 流速分布の測定実験	31
(2) 解析方法	33
3-2 実験結果	35
(1) 設定流速ごとによるかごの後流域の流速分布	35
(2) かごの形状と空隙率によるかごの後流域の流速分布	37
3-3 考察	46
第 4 章 かごの後流域の流速分布がオイカワの行動に及ぼす影響	49
4-1 材料と方法	49

(1) 供試魚	49
(2) 魚の行動実験	49
(3) 室内実験水槽内の流速分布の測定実験	52
4-2 実験結果	54
(1) 室内実験水槽内の流速分布	54
(2) 明・暗条件における平常魚の行動	58
(3) 明・暗条件における閉塞魚の行動	64
(4) かごからの距離に対する魚の行動	71
(5) 実験条件における魚の行動の比較	71
4-3 考察	74
第5章 総合考察	77
謝 辞	81
文 献	82

第1章 序論

雑漁具の誘導陷穽具類に分類されるかごは、¹⁾漁具の構造が簡単でコストがかからず、使用する漁船の制約が少ないため、世界各地の沿岸および内水面の漁場で普及している。²⁾かご漁業の漁獲対象種は、カニ、エビなどの甲殻類、タコ、イカなどの軟体動物、アナゴ、フグなどの魚類であり、³⁾かごの形状は円柱型、角柱型、円錐型、ドーム型、半円柱型などの様々である。

韓国の沿岸域で使用されているかごの設置海域の水深や底質は漁獲対象種によって様々であり、イシガニかごでは水深 30 m 以浅の砂泥質や岩礁、ホッコクアカエビかごでは水深 200~400 m の砂泥質、コウイカかごでは水深 10 m 以浅の砂泥質、タコかごでは水深が 80~150 m の岩礁、アナゴかごでは水深が 10~20 m の砂泥質、クロソイかごでは水深 10~50 m の岩礁や砂泥質、ウマヅラハギかごでは水深 20~50 m の砂泥質、イシガレイかごでは水深 10~30 m の砂泥質である。⁴⁾⁻¹¹⁾

かご操業では、かごの中にイワシ、サバ、サンマなどのを餌料として入れる場合と餌料を使用しないで隠れ家としての機能として対象種を誘引する場合に分けられる^{12), 13)}

これまでにかごの形状、入口形状及び浸漬時間とかごの漁獲の関係について研究が行われている。不破ら¹⁴⁾は鹿児島県内で使用されている竹かごを調べ、かごの形状は河川の状況に応じて異なり、かごの周辺における流速分布が漁獲に影響すると示唆された。Vazquez Archdale *et al.*¹⁵⁾は、カニかごの入口を下流側に向けて設置することでカニが下流側からかごの入口まで接近する割合が高くなり、また円柱型かごの方が角柱型かごよりも漁獲される確率が高いと報告した。かごの入口

形状と漁獲の関係については、メジナ *Girella punctata* の遊泳行動から、入口の長さや絞り角度を極端に増大させることは好ましくないことが明らかにされている。¹⁶⁾また、かごの入口部分でサバフグの後退遊泳が制約されることにより漁獲されること、カメラの視野にサバフグが現れた出現頻度数に対して入かごする頻度数は海中実験では 1.4%で、水槽実験では 1.7%であることが明らかにされている。¹⁷⁾⁻²²⁾ベニズワイガニかごとエビかごでは浸漬時間と漁獲の関係について検討され²³⁾⁻²⁵⁾、また、かごの入口の高さと入籠率や脱出率との関係²⁶⁾や、かごの側面の長さや入籠率との関係²⁷⁾が調べられている。^{26), 27)}

かご漁場の潮流と漁獲との関係については、山口ら²⁸⁾が島原湾内の流動環境とコウイカの漁獲量から、流れが遅い小潮の方が大潮と比べて漁獲量が多くなり、かご漁場の潮流がかごの漁獲に密接な関係があると示唆している。また、Budiman *et. al.*²⁹⁾は網糸直径と目合が異なる網地で覆った小型かごの 5 種類を用いてかごの下流側の流速を測定し、かごの空隙が大きくなるとかごの後流域の流速分布に及ぼす影響が小さくなることを報告している。

かごの漁獲過程を解明するためには、かごが持つ流体力学的特性と対象魚類の行動特性の両面から検討することが必要である。

かごの流体力特性に関しては、ハート型の竹かご³⁰⁾や網糸直径と目合が異なる網地で覆った小型かごに作用する流体抵抗²⁹⁾や下流域の流速分布³¹⁾、流れの中に設置された円柱型かごの安定性^{32), 33)}について検討されており、かごの表面を覆う網地の空隙が小さいほどかごが受ける抗力が大きくなり、かごの下流域の流速分布に与える影響が大きいことが示されている。^{29), 31)}しかしながら、かごの形状や表面を覆う素材の違いが流体力特性に与える影響を検討した例は少ない。²⁹⁾かごの流体

力特性は、操業を行う上で、かごを海底に設置する際の係留力を決定するために重要となる。海底に設置されたかごが流れによって滑動および横転する現象は、漁獲を低下させる要因のひとつであると言われている。^{32), 33)}そのため、かごの流体力特性を把握することは、かごを設計する上で重要な情報になる。かごの漁獲量を低下させる要因のひとつであるかごの滑動は、かごに作用する流体抵抗によって生じることが指摘され²⁹⁾、流体抵抗に及ぼす要因としてかごの形状と網地の種類が挙げられる。平面網地の流体抵抗流れと網地のなす角が小さい場合、流体は網目を通過せず網地を沿って流れるが、迎角が増加するにつれて流れの一部が網目を通過し、さらに迎角が増加するとそれぞれの網目が独立して抵抗を受ける。³⁴⁾⁻³⁹⁾また、かごが受ける流体抵抗は、流れに対してかごの前面の網地が受ける抵抗とかごの内部を通過した流れがかごの後面の網地が受ける抵抗の和によって生じると考えられる。かごを流水中に設置した時、かごの後流域の流速分布が漁獲過程に影響するため、かごの形状と空隙の違いによって形成された流速分布を知ることは重要である。

かごに対する魚類の感覚に関しては、魚類がかごへ接近する行動に餌料の化学刺激を認識すること⁴⁰⁾や、魚がかごの外側を接触した後の入りかご行動に魚類の体サイズと入口形状の関係により入りかご確率を説明し得ること^{18), 19)}等が報告されているが、かごの後流域の流れが魚の行動に及ぼす影響に関しては研究例が少ない。魚類は遊泳層の深淺や昼夜の違いによって視覚が影響を受け、水流や水圧などの機械的刺激を側線により受容し、周囲の状況を認識する。⁴¹⁾そこで、海底に設置されたかごが魚類に与える刺激は単一種ではなく、魚類と漁具との距離に応じて漁獲過程に関わる感覚は変化すると考えられる。すなわち、かご入口への接近行動に関与する魚類の感覚として、魚類がか

ごの後流域での流速の変化を知る感覚器官である側線が挙げられる。

⁴²⁾また、かご入口への接近行動にはかごの位置を認識する視覚も機能していると考えられる。

本研究では、かごの漁獲機構を明らかにすることでかごの最適設計や最適な操業方法を提案することを目的とした。

第 2 章では、角柱型と円柱型のかごの側面を丸棒または網地で覆った鏡像模型を用いて、かごの形状と空隙率がかごの流体抵抗に与える影響を明らかにした。第 3 章では、回流水槽でかごの後流域の流速を測定し、かごの形状と空隙率とかごの後流域の流速分布の関係を明らかにした。第 4 章では、明・暗条件、平常態・側線閉塞状態を組み合わせた魚の行動実験を行い、かごの後流域の流速分布と魚の行動との関係を調べた。第 5 章ではかごの形状と空隙率がかごの漁獲機構に及ぼす影響、かごの最適設計や最適な操業方法について考察した。

第2章 かごの形状と空隙率が流体抵抗に及ぼす影響

本章では、かごの形状と網地の空隙の違いが流体抵抗に及ぼす影響を明らかにするために、かごの側面を丸棒または網地で覆った角柱型と円柱型の2種類のかごを用いて、回流水槽で流体抵抗の測定を行った。

2-1 材料と方法

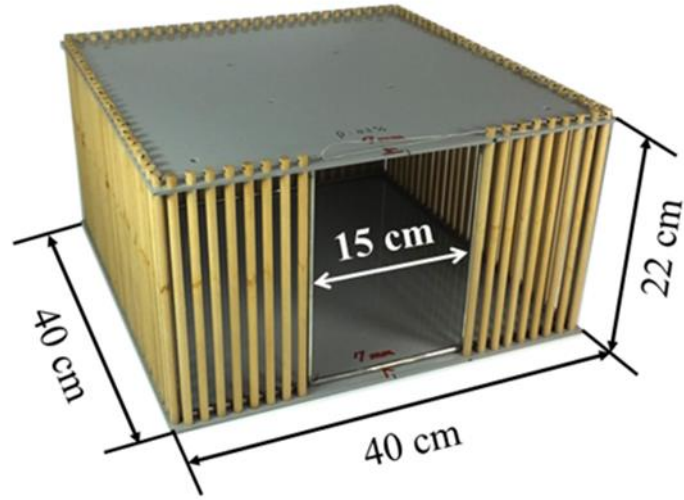
(1) 実験で使用したかご

実験に用いたかごは、Table 1 に示す韓国と日本の沿岸域および内水面で利用されているかごの種類を参考に、形状を角柱型と円柱型の2種類として、それを覆う素材には木製の丸棒とポリアミド製有結節網地を選定した。^{14)-22), 43)-53)}そこで実験では、Fig. 1 に示すように鉄製の円柱棒(直径 5.0 mm)で角柱型(長さ 0.40 m × 幅 0.40 m × 高さ 0.22 m)と円柱型(上面および底面の直径 0.40 m × 高さ 0.22 m)の枠を作製し、かごの上面と底面にプラスチック製の平板(厚さ 5.0 mm)を取り付けて、側面を木製の丸棒またはポリアミド製有結節網地で覆った。木製の丸棒(直径 8.0 mm)の間隔 s は 4~35 mm の範囲で、また、ポリアミド製有結節網地では縮結角を 45°として、網糸直径 d_N と脚長 l の比 d_N/l を 0.02~0.13 の範囲で、それぞれ5段階に変化させた(Table 2, Table 3)。かごの入口は側面に1つとして、その形状は縦型のスリット状(幅 0.15 m × 高さ 0.22 m)で、かごの上面から底面までが開いた状態にして漏斗は取り付けなかった。

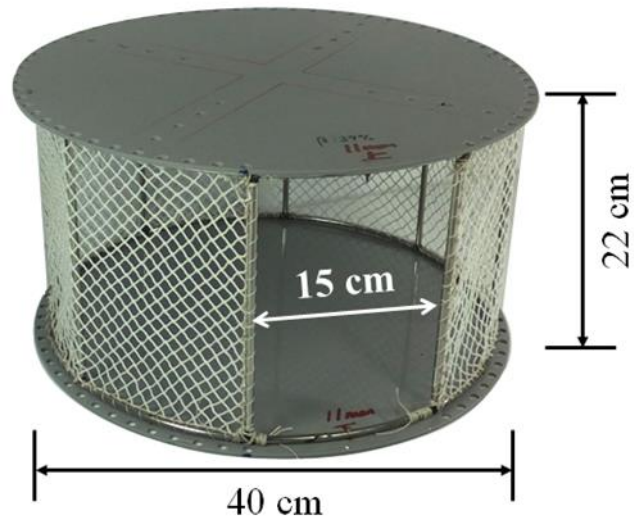
Table 1 Specifications of the pots used in coastal and inland waters in Korea and Japan

Shape	Dimension (mm)	Target species	Material of net	Mesh size (mm)	Diameter (mm)	Number of entrances	Fishing ground	Country
Box	1360 L×680 W×680 H	Black scraper	Polyethylene	40	0.8	2	Sea, 20 - 50 m depth	Korea
Box	1350 L×770 W×600 H	Pacific octopus	Polyethylene	52	0.6	2	Sea, 80 - 150 m depth	Korea
Box	710 L×610 W×300 H	Carp	Polyethylene	34	0.8	1	River	Japan
Box	635 L×435 W×300 H	Carp	Polyamide	120	0.6	1	River	Japan
Box	630 L×460 W×180 H	Japanese rock crab	Bamboo rod	-	7.0	2	Sea, 80 - 140 m depth	Japan
Box	440 L×230 W×140 H	Swimming crab	Bamboo rod	-	10.0	1	Sea, 10 m depth	Korea
Cylinder	1000 L×1000 W×400 H	Flounder	Polyethylene	54	1.4	1	Sea, 10 - 30 m depth	Korea
Cylinder	800 L×800 W×380 H	Pacific octopus	Polyethylene	44	0.8	2	Sea, 10 - 50 m depth	Korea
Cylinder	800 L×800 W×260 H	Black rockfish	Polyamide	34	0.5	3	Sea, 10 - 50 m depth	Korea
Cylinder	730 L×730 W×570 H	Glassfish	Bamboo rod	-	5.0	2	Sea, 50 - 60 m depth	Korea
Cylinder	700 L×700 W×320 H	Cuttlefish	Polyamide	54	0.5	2	Sea, 10 m depth	Korea
Cylinder	630 L×630 W×380 H	Conger eel	Bamboo rod	-	5.0	2	Sea, 20 m depth	Korea
Cylinder	610 L×610 W×280 H	Swimming crab	Polyethylene	36	0.8	2	Sea, 30 - 50 m depth	Korea
Cylinder	600 L×600 W×410 H	Swimming crab	Bamboo rod	-	5.0	2	Sea, 10 m depth	Korea
Cylinder	565 L×565 W×330 H	Neptune	Polyethylene	40	0.8	2	Sea, 10 - 50 m depth	Korea
Cylinder	450 L×450 W×220 H	Swimming crab	Bamboo rod	-	5.0	3	Sea, 30 m depth	Korea
Cylinder	425 L×425 W×260 H	Whiparm octopus	Polyethylene	24	0.5	2	Sea, 5 - 10 m depth	Korea
Cylinder	390 L×390 W×200 H	Conger eel	Polyethylene	44	0.8	2	Sea, 10 - 20 m depth	Korea
Cylinder	370 L×370 W×180 H	Swimming crab	Polyamide	64	0.8	2	Sea, 10 - 70 m depth	Korea
Cylinder	360 L×360 W×200 H	Chinese mitten crab	Polyethylene	94	2.2	2	River	Korea
Cylinder	310 L×310 W×150 H	Black rockfish	Polyethylene	122	0.6	2	Sea, 50 - 60 m depth	Korea
Cone	1430 L×740 W×800 H	Red snow crab	Polyethylene	32	0.6	1	Sea, 800 - 2,000 m depth	Korea
Cone	660 L×400 W×340 H	Northern shrimp	Polyamide	48	0.4	2	Sea, 200 - 400 m depth	Korea
Dome	730 L×530 W×270 H	Japanese rock crab	Polyamide	40	0.5	2	Sea, 80 - 140 m depth	Japan
Heart	750 L×450 W×690 H	Carp	Polyethylene	26	0.5	1	River	Japan
Heart	625 L×435 W×380 H	Crucian carp	Polyethylene	36	0.5	1	River	Japan
Heart	340 L×340 W×180 H	Pale chub	Steel wire	42	0.8	1	River	Japan
Semi-cylinder	600 L×294 W×217 H	Pale chub	Polyethylene	44	0.8	1	River	Japan
Semi-cylinder	550 L×450 W×290 H	Puffer fish	Polyamide	40	0.5	1	Sea, 20 - 100 m depth	Japan

L, length; W, width; H, height



(a)



(b)

Fig. 1 Pots used in the experiment: (a) box pot covered with wooden rods, (b) cylinder pot covered with polyamide net.

Table 2 Specifications of the pots covered with wooden rods

Shape	Rod diameter d_B (mm)	Interval between rods s (mm)	Porosity β (%)
Box	8.0	4	28
Box	8.0	7	43
Box	8.0	11	55
Box	8.0	17	65
Box	8.0	35	80
Cylinder	8.0	4	14
Cylinder	8.0	7	27
Cylinder	8.0	11	39
Cylinder	8.0	17	52
Cylinder	8.0	35	70

Table 3 Specifications of the pots covered with polyamide net

Shape	Twine diameter d_N (mm)	Leg length ℓ (mm)	d_N/ℓ	Porosity β (%)
Box	1.5	11.2	0.13	63
Box	1.0	10.0	0.10	78
Box	0.7	10.0	0.07	85
Box	0.6	15.0	0.04	91
Box	0.6	37.5	0.02	97
Cylinder	1.5	11.2	0.13	62
Cylinder	1.0	10.0	0.10	72
Cylinder	0.7	10.0	0.07	80
Cylinder	0.6	15.0	0.04	88
Cylinder	0.6	37.5	0.02	96

(2) かごの投影面積

かごの空隙率 β は、(1)式のようにかごを流れの上流側から見た時の側面の面積に対する開口部の面積の割合と定義し、開口部の面積は、側面の面積 A_t から投影面積 A_θ を差し引いて算出した。⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾

$$\beta = \frac{A_t - A_\theta}{A_t} \quad (1)$$

側面を丸棒または網地で覆った角柱型かごを上流側から見た時の投影面積の模式図をそれぞれ Fig. 2, Fig. 3 に示す。丸棒で覆った場合の投影面積は丸棒の直径 d_B と丸棒の間隔 s によって、網地で覆った場合の投影面積は網目の脚長 ℓ と網糸直径 d_N によって変化する。かごの流れに対する迎角 θ は入口が下流方向を向いた状態を 0° として、かごの長さを L 、高さを H 、一本の丸棒の投影面積を A 、丸棒の個数を N_B とすると、流れ方向の投影面積 A_θ は(2)式と(3)式で求められる。網地で覆ったかごの場合、網地の横方向の網目数を N_i 、網地の縦方向の網目数を M_j 、網地の結節数を K とするとかごの投影面積は(4)式を用いて求めた。⁵⁷⁾

$$A = d_B H \quad (2)$$

$$A_\theta = A N_B \quad (3)$$

$$A_\theta = \frac{(N_i + M_j)}{2} \cdot \frac{K}{2} \cdot 2\ell \cdot d_N \quad (4)$$

丸棒または網地で覆った円柱型かごを上流側から見た時の投影面積の模式図をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。円柱型の側面は湾曲しているため、上流側から見た投影面において丸棒または網目が独立する場合 A_1 、横にある丸棒または網目と接触する場合 A_2 、複数の丸棒または

複数の網目が重なる場合 A_3 があるため、これらを考慮して流れ方向の投影面積 A_θ を(5)式で求めた。^{29), 34)-39)}

$$A_\theta = \sum A_0 \cos\alpha + A_{90} \sin\alpha \quad (5)$$

ここで、 A_0 は流れ方向と網目とのなす角が 0° の時の網目の投影面積、 A_{90} は流れに対する網目の迎角が 90° の時の網目の投影面積、 α は流れ方向と網目とのなす角である。

このような方法で β を求めると、かごの側面を丸棒で覆った場合は角柱型かごでは 28%~80%で、円柱型かごでは 14%~70%となった。網地で覆った場合は角柱型かごでは 63%~97%で、円柱型かごでは 62%~96%になった (Table 2, Table 3)。

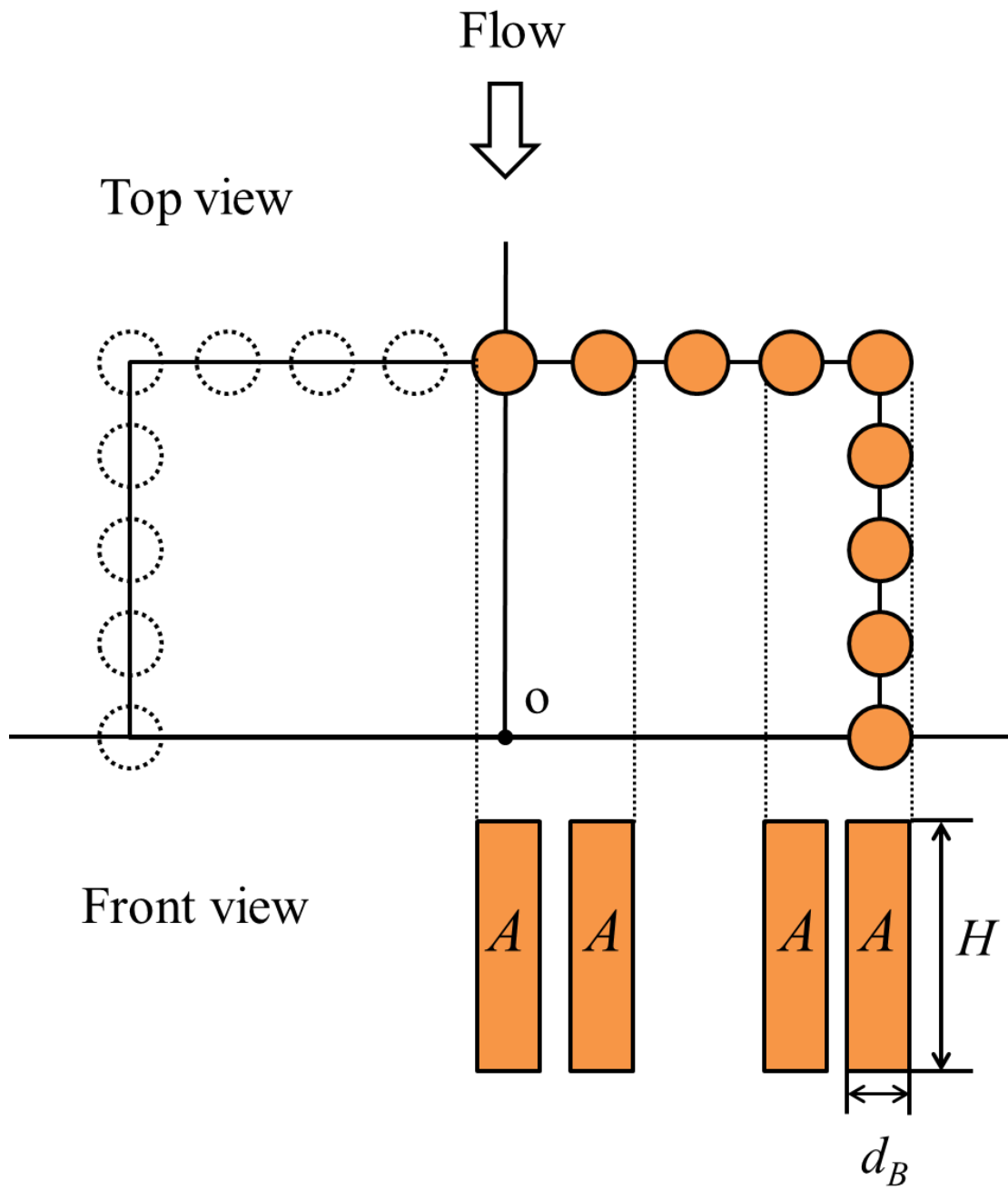


Fig. 2 Projected area of the box pot covered with wooden rods. A , Projective area of rods; d_B , Diameter of a rod; H , Height of a pot.

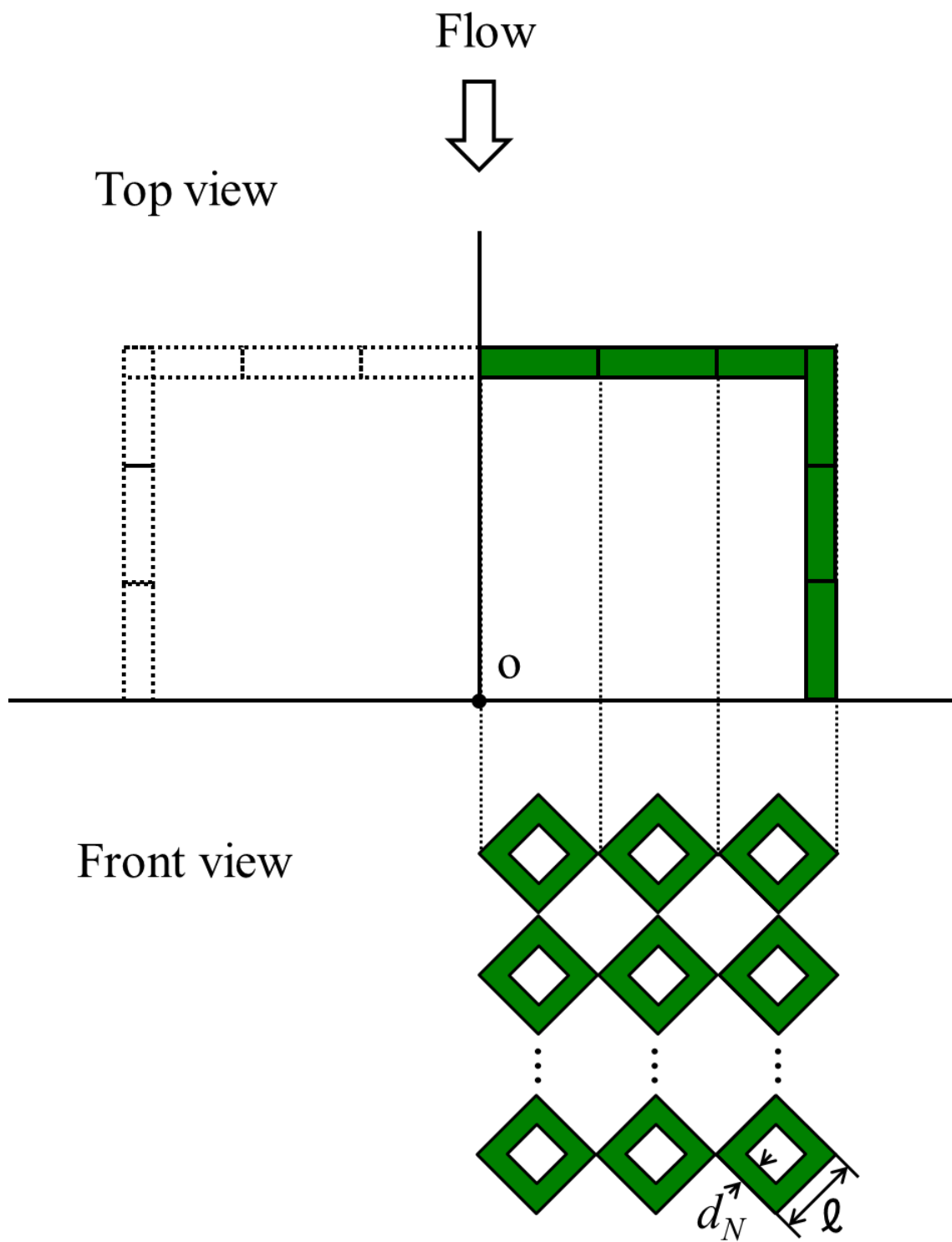


Fig. 3 Projected area of the box pot covered with polyamide net. d_N , Diameter of a twine; l , Leg length.

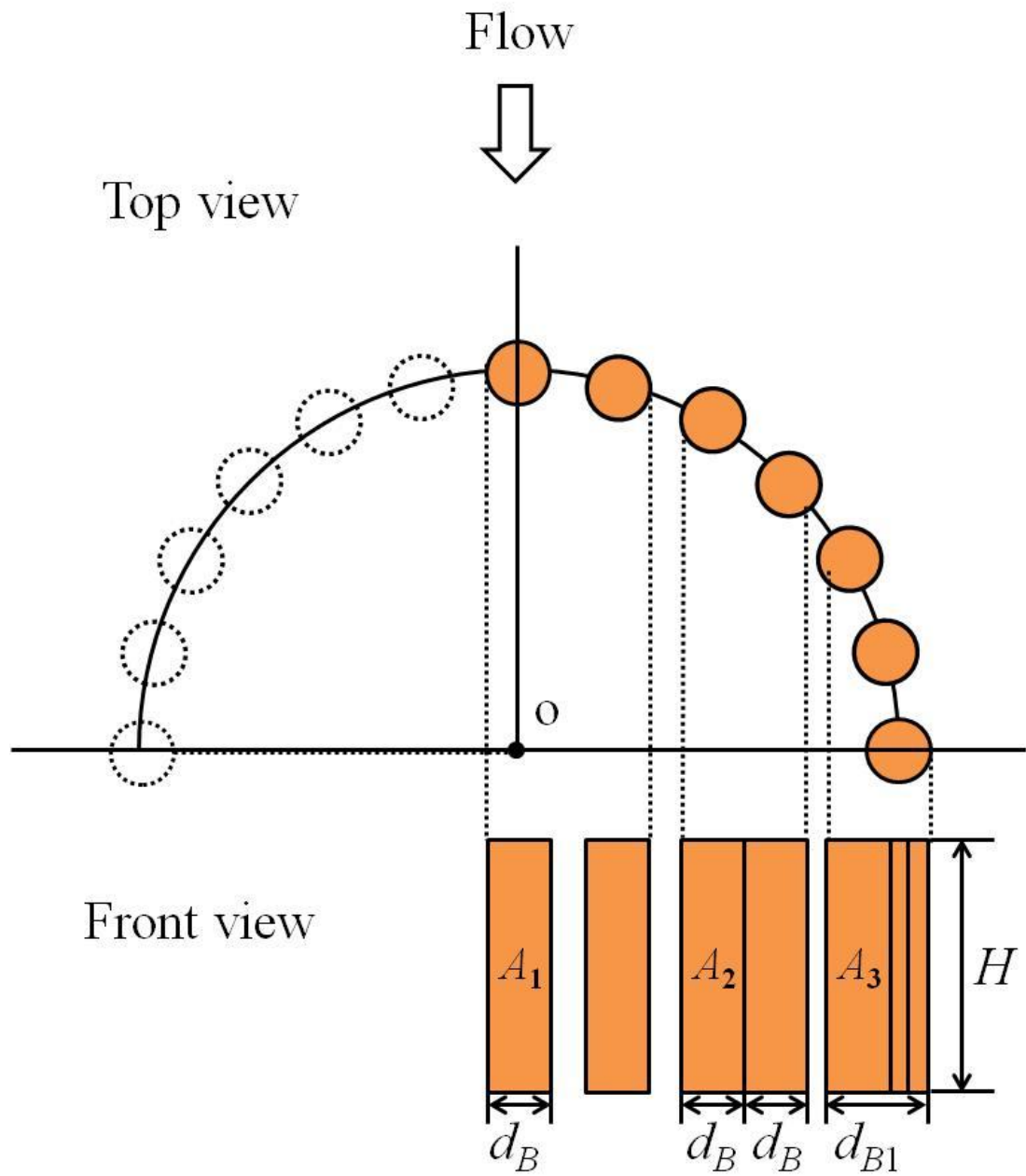


Fig. 4 Projected area of the cylinder pot covered with wooden rods. A_1 , Projective area of a rod; A_2 , Projective area of adjoin rods; A_3 , Projective area of piled-up rods; d_B , Diameter of a rod; d_{B1} , Diameter of piled-up rods; H , Height of a pot.

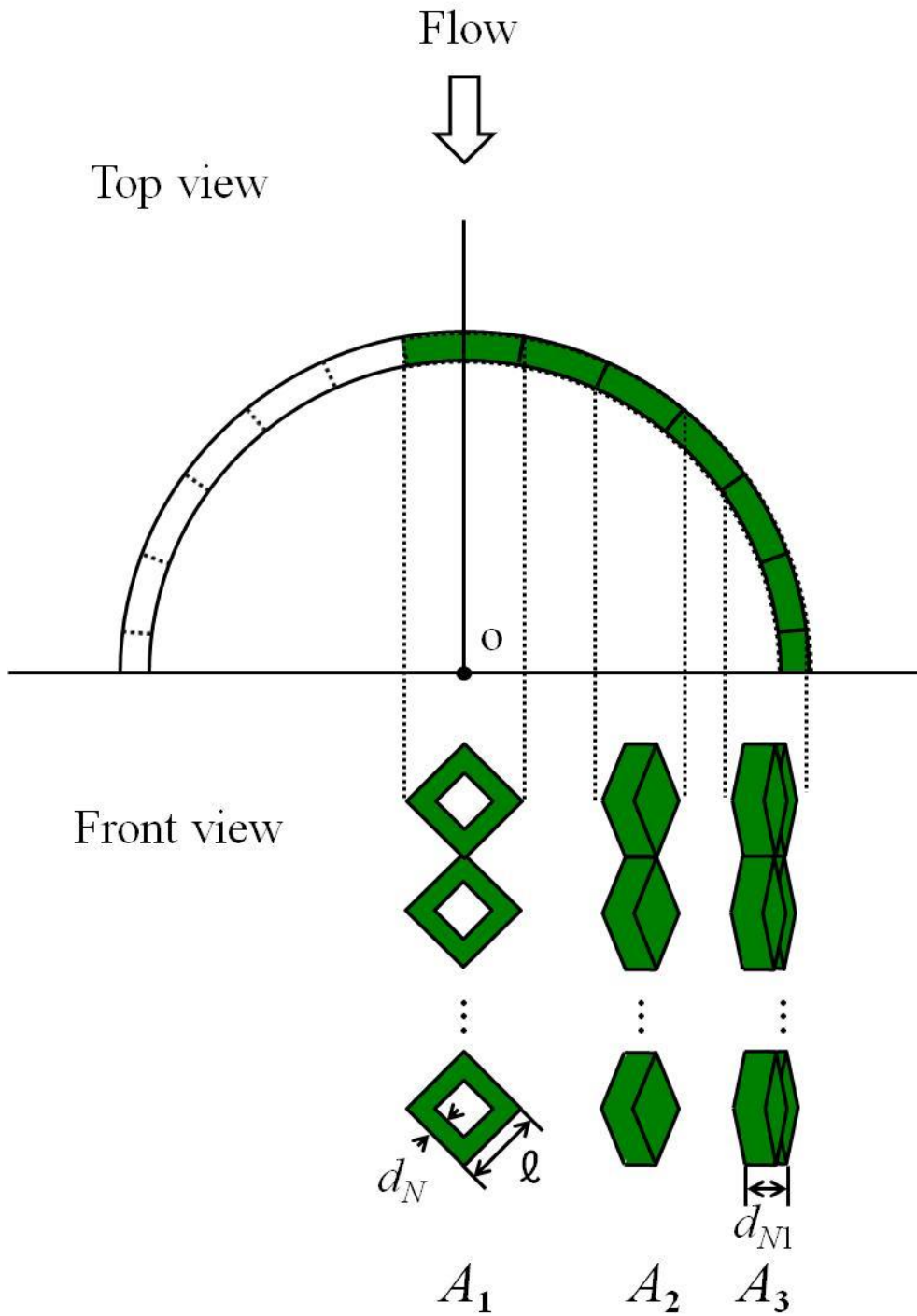


Fig. 5 Projected area of the cylinder pot covered with polyamide net. A_1 , Projective area of a netting; A_2 , Projective area of adjoin nettings; A_3 , Projective area of piled-up nettings; d_N , Diameter of a twine; d_{N1} , Diameter of piled-up twines.

(3) 流体力の測定方法

かごの流体力測定は、鹿児島大学水産学部の大型回流水槽(観測水路：長さ 6.0 m × 幅 2.0 m × 水深 1.0 m)で行った(Fig. 6)。本実験では同一の 2 つのかごを底面で張り合わせた鏡像模型を用いて、底面摩擦と底網に作用する流体力を考慮しなかった。³³⁾観測水路の中央部にかごを設置して流速を 0.3, 0.4, 0.5 m/s の計 3 段階に変化させて、三分力計(LMC-3502, 日章電機株式会社製:容量 98 N)を用いて、かごに作用する流体力をサンプリング周波数 20Hz で 20 秒間計測し、平均値を求めて計測値とした。実験では θ を $0 \sim 90^\circ$ の範囲で 15° 間隔で変化させた。

かごに作用する抗力 F_D と揚力 F_L は、測定した全抗力と全揚力から三分力計とかごを接続する支持棒に作用する抗力と揚力を差し引いて求めた。実験時の水温は $20.0 \sim 23.0^\circ\text{C}$ で、角柱型かごの長さまたは円柱型かごの直径を代表長さとしたレイノルズ数 Re は $1.2 \times 10^5 \sim 2.1 \times 10^5$ の範囲であった。詳細は後述するが、かごに作用する揚力が抗力と比べて非常に小さかったため、本研究では抗力についてのみ検討することにした。そこで、かごに作用する F_D から、(6)式を用いて抗力係数 C_D を求めた。

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho A_\theta V^2} \quad (6)$$

ここで、 ρ は流体密度、 A_θ はかごの投影面積、 V は流速である。

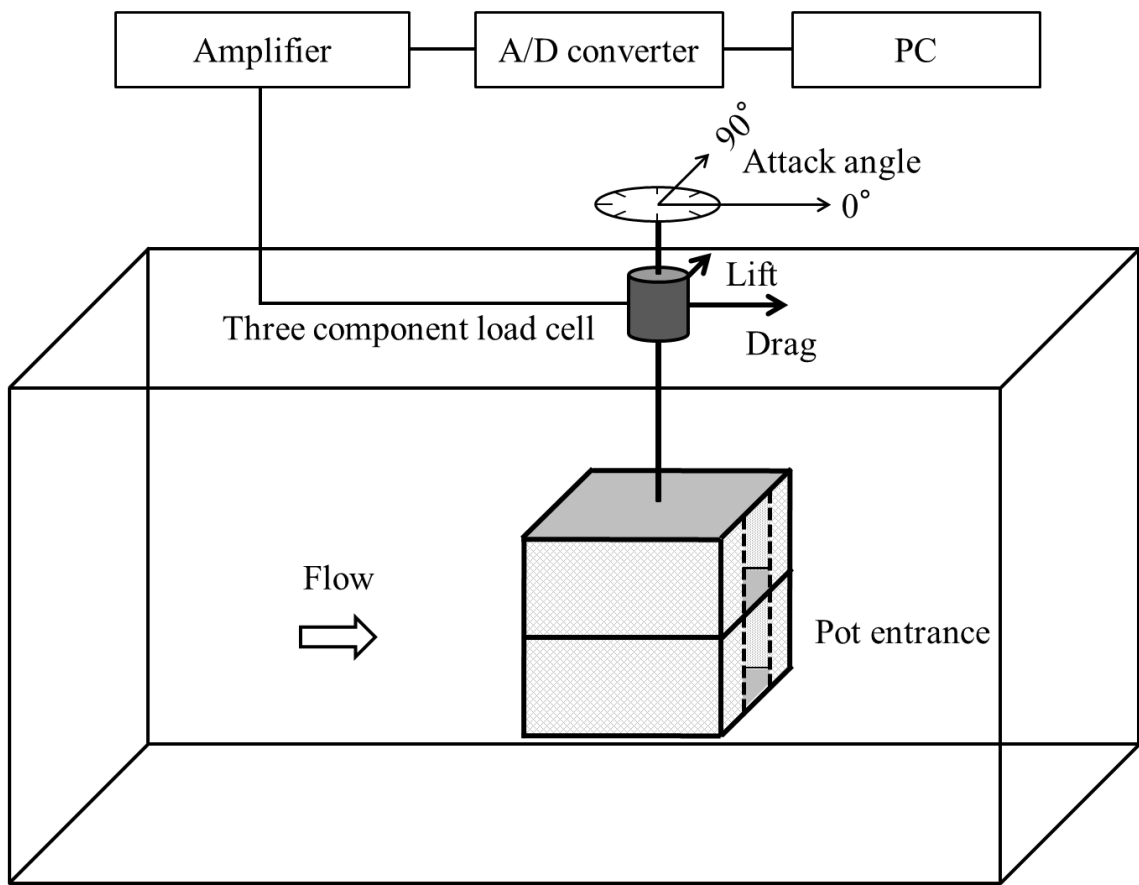


Fig. 6 Experimental apparatus for measuring drag and lift force acting on pots.

2-2 実験結果

(1) 迎角によるかごの抗力と揚力の変化

かごに作用する F_D を Fig. 7, Fig. 8 に, F_L を Fig. 9, Fig.10 に示す。かごの側面を覆った素材に関係なく, 流速が大きくなると F_D は増加し, 角柱型かごでは $\theta = 45^\circ$, 円柱型かごでは $\theta = 90^\circ$ の時に最大となった。その傾向は流速が速く, β が小さい時に顕著であった。

ここで, β がほぼ等しい角柱型かごと円柱型かごの F_D について比較する。 F_D が最大となった角柱型かごの $\theta = 45^\circ$ の時と円柱型かごの $\theta = 90^\circ$ の時では, 丸棒で覆った場合, F_D は角柱型かごの $\beta = 28\%$ の方が, 円柱型かごの $\beta = 27\%$ よりも 1.52~1.71 倍大きく, 角柱型かごの $\beta = 55\%$ の方が, 円柱型かごの $\beta = 52\%$ よりも 1.55~1.63 倍大きくなった。網地で覆った場合では F_D は角柱型かごの $\beta = 63\%$ の方が, 円柱型かごの $\beta = 62\%$ よりも 1.41~1.43 倍大きく, 角柱型かごの $\beta = 78\%$ の方が, 円柱型かごの $\beta = 80\%$ よりも 1.58~1.60 倍大きくなった。

次に, β がほぼ等しい網地で覆ったかごと丸棒で覆ったかごの F_D を比較した。角柱型かごの $\theta = 45^\circ$ の時, F_D は網地で覆ったかごの $\beta = 63\%$ の方が, 丸棒で覆ったかごの $\beta = 65\%$ よりも 0.90~0.96 倍大きく, 網地で覆ったかごの $\beta = 78\%$ の方が, 丸棒で覆ったかごの $\beta = 80\%$ よりも 0.89~0.95 倍大きくなった。円柱型かごの $\theta = 90^\circ$ の時, 網地で覆ったかごの $\beta = 62\%$ が, 丸棒で覆ったかごの $\beta = 52\%$ と $\beta = 70\%$ のほぼ中央値になることから, $\beta = 52\%$ の F_D と $\beta = 70\%$ の F_D の平均値を求め, $\beta = 63\%$ の F_D と比較するところにした。 F_D は網地で覆った円柱型かごの $\beta = 62\%$ の方が, 丸棒で覆った円柱型かごの $\beta = 52\%$ と $\beta = 70\%$ の平均値の 0.90~0.98 と小さくなった。

以上の結果から, 角柱型かごの方が円柱型かごよりも F_D は大きくな

り，またかごの側面を覆う素材については網地よりも丸棒の方が F_D は大きくなった。

かごに作用する F_L については，丸棒または網地で覆った角柱型かごでは，それぞれ $-1.1\text{ N}\sim 1.4\text{ N}$ ， $-0.1\text{ N}\sim 0.2\text{ N}$ となり， F_D に対して約 4% と小さかった。また，丸棒または網地で覆った円柱型かごではそれぞれ $-0.4\text{ N}\sim 0.3\text{ N}$ ， $-0.1\text{ N}\sim 0.2\text{ N}$ となり， F_D に比べて約 2% と小さい値を示した。このように，かごに作用する F_L は F_D と比べて非常に小さかったため，本研究では F_D についてのみ検討することにした。

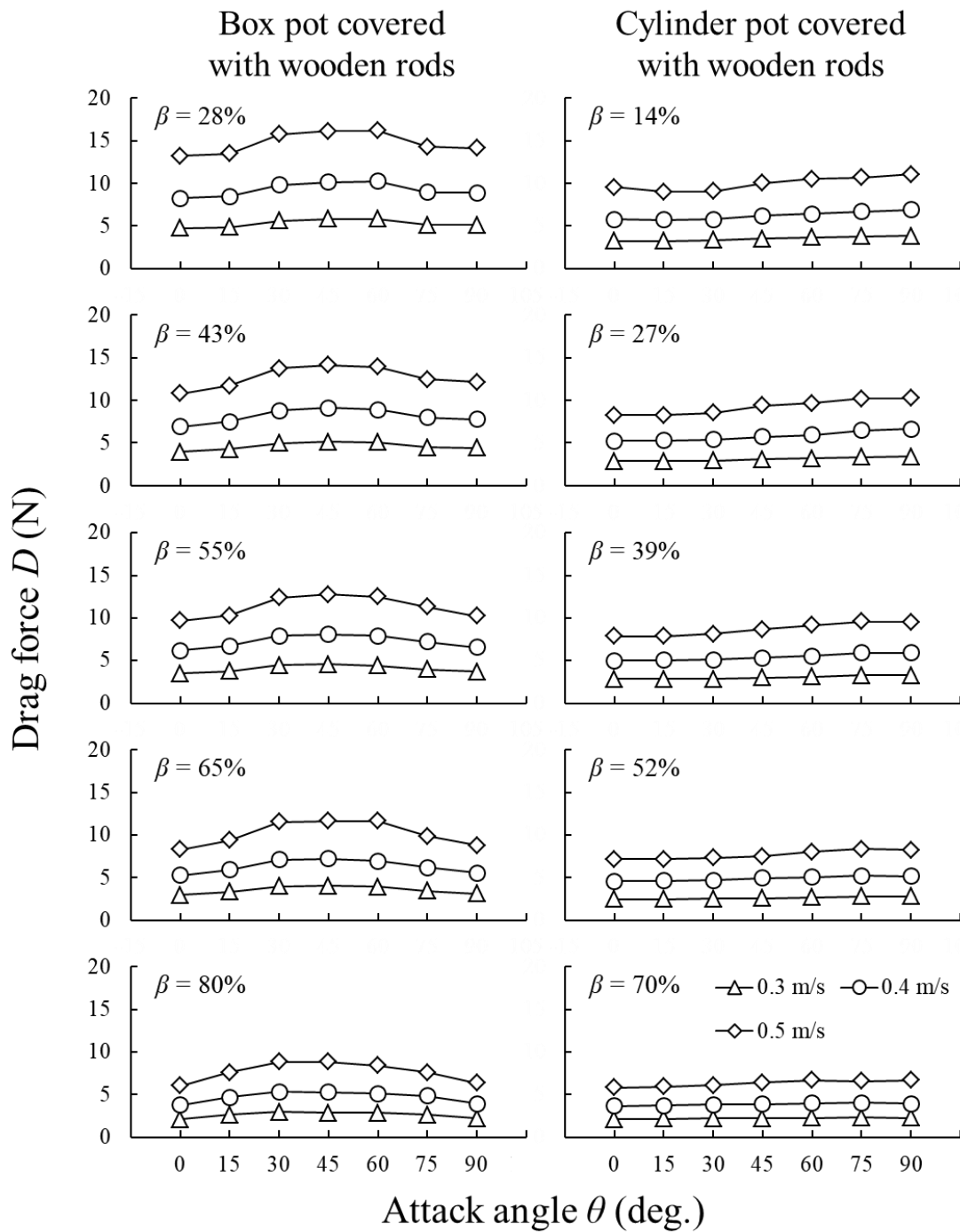


Fig. 7 Relationship between attack angle and drag force acting on the box and cylinder pots covered with wooden rods.

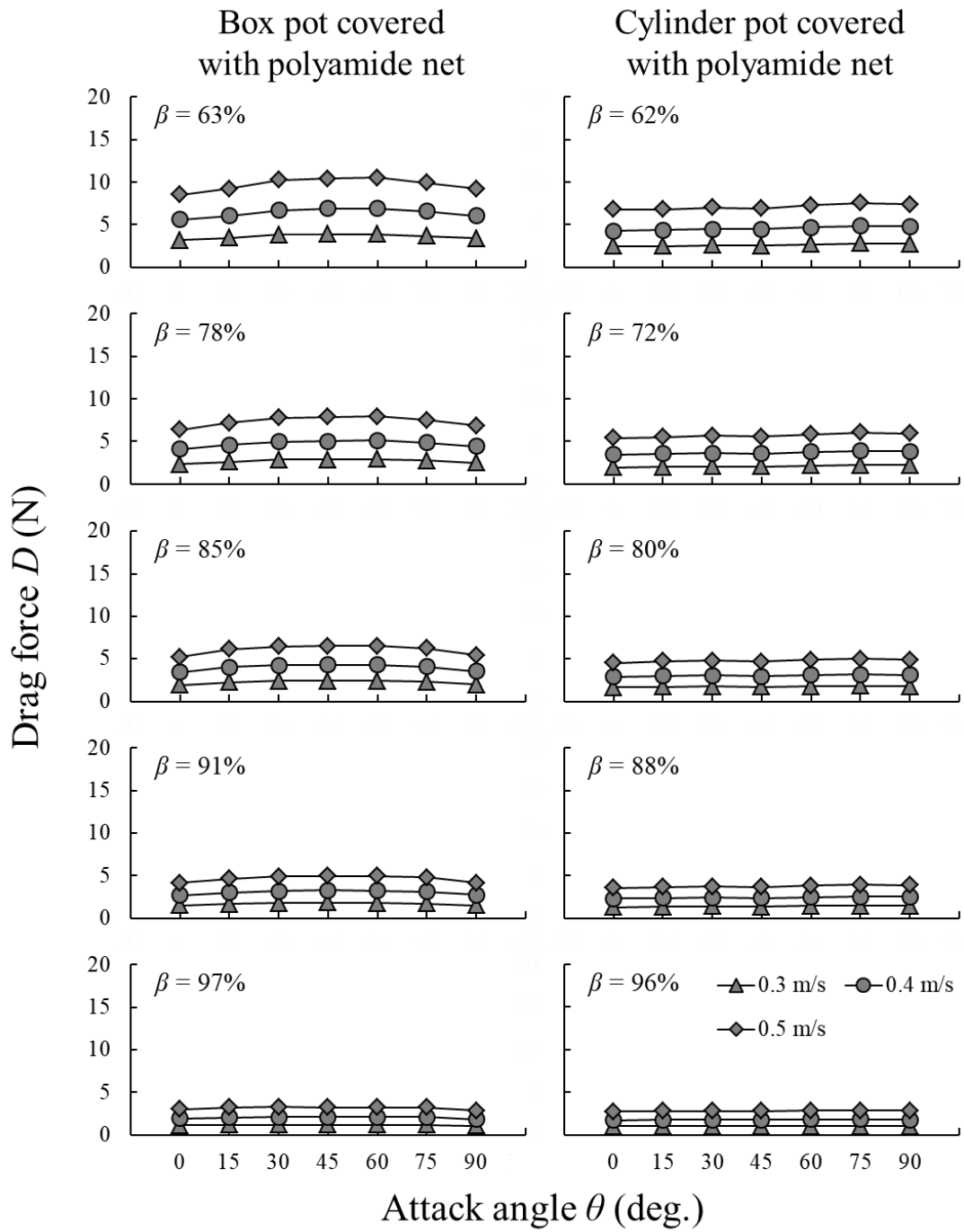


Fig. 8 Relationship between attack angle and drag force acting on the box and cylinder pots covered with polyamide net.

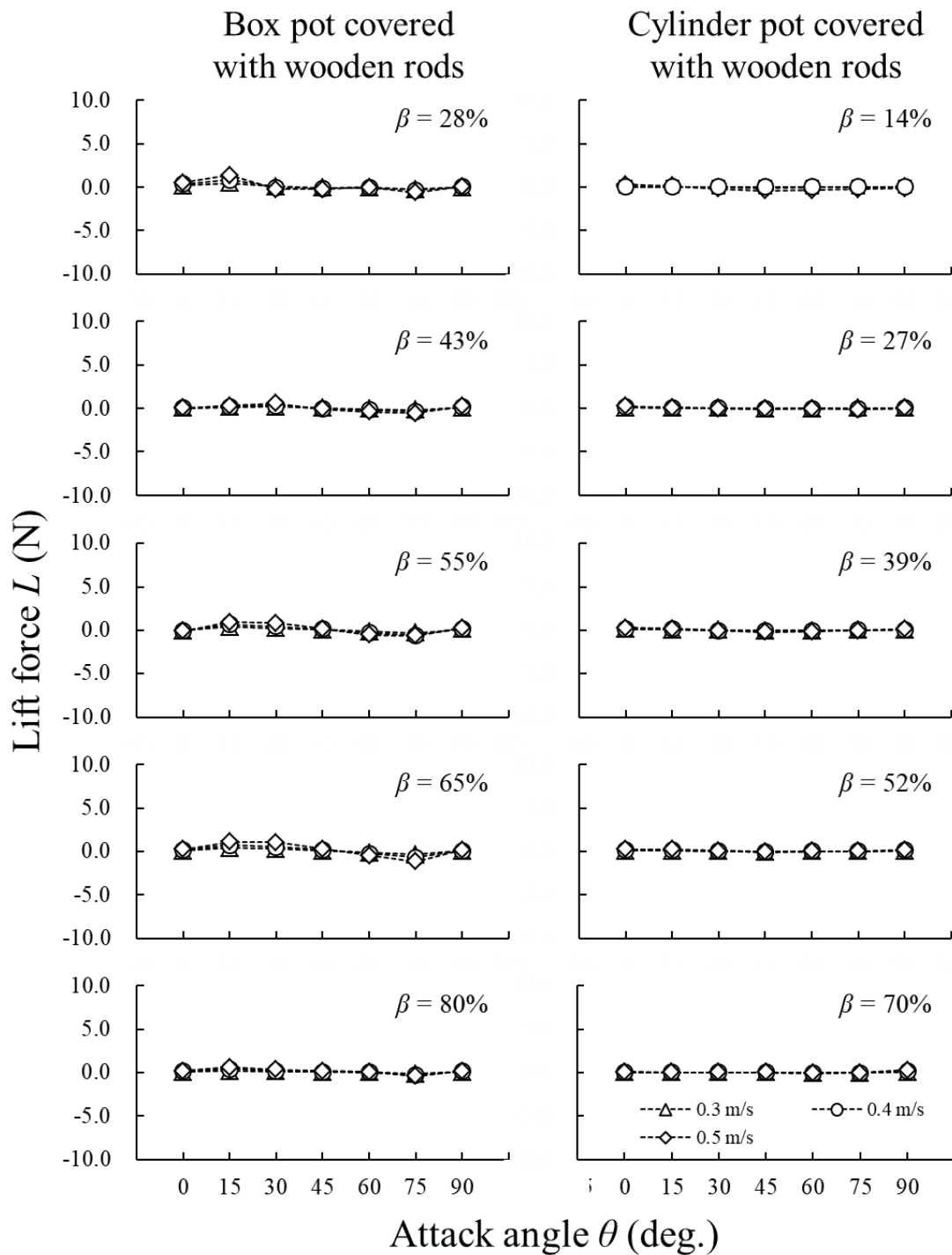


Fig. 9 Relationship between attack angle and lift force acting on the box and cylinder pots covered with wooden rods.

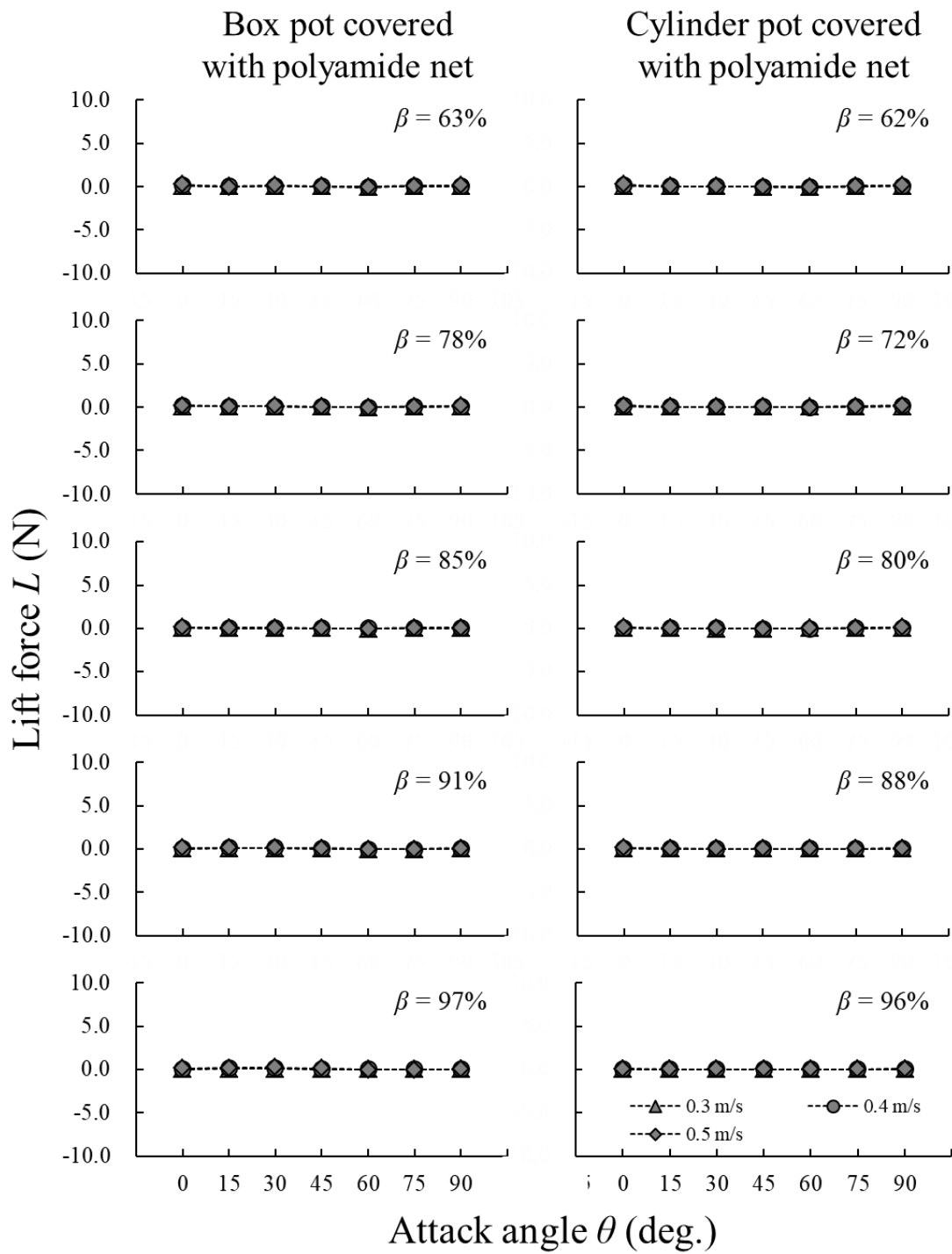


Fig.10 Relationship between attack angle and lift force acting on the box and cylinder pots covered with polyamide net.

(2) 形状と空隙率による抗力係数の変化

測定した F_D から求めた C_D とレイノルズ数の関係を Fig.11, Fig.12 に示す。実験条件におけるレイノルズ数の範囲内ではほぼ一定の値を示したため、 C_D はレイノルズ数に依存しないと考えて、平均値を求めて代表値として、 θ と C_D の関係を Fig.13 に示した。角柱型かごの C_D は $\theta = 45^\circ$ の時に最大となり、 β が大きい時の方がその傾向が顕著に見られ、 β が小さくなると θ による影響は小さくなった。円柱型かごでは θ が大きくなるにつれて、 C_D がやや大きくなる傾向があり、 $\theta = 90^\circ$ で最大となった。角柱型と円柱型のどちらのかごでも β が大きくなると C_D は大きくなり、特に網地で覆ったかごでは β が 91% から 97% になると C_D は極端に大きくなった。ここで、 C_D が極端に大きくなった角柱型かごの $\beta = 97\%$ と円柱型かごの $\beta = 96\%$ の場合を除いて、 β が 14% から 91% の時について、角柱型かごの $\theta = 45^\circ$ 、円柱型かごの $\theta = 90^\circ$ の時の C_D と β の関係について示したのが Fig.14 である。角柱型かご、円柱型かごの何れでも β が大きくなるにつれて C_D が大きくなっており、ここで最小二乗法によって β と C_D の関係式を求めるとそれぞれ次のようになった。

θ が 45° の時の角柱型かごの場合：

$$C_D = 0.18e^{0.634\beta} \quad (R = 0.852) \quad (7)$$

θ が 90° の時の円柱型かごの場合：

$$C_D = 0.28e^{0.509\beta} \quad (R = 0.864) \quad (8)$$

このように β と C_D の関係は累乗関数で近似することができ、 C_D は β が大きくなると角柱型かごの方が円柱型かごより大きくなる傾向が見られた。

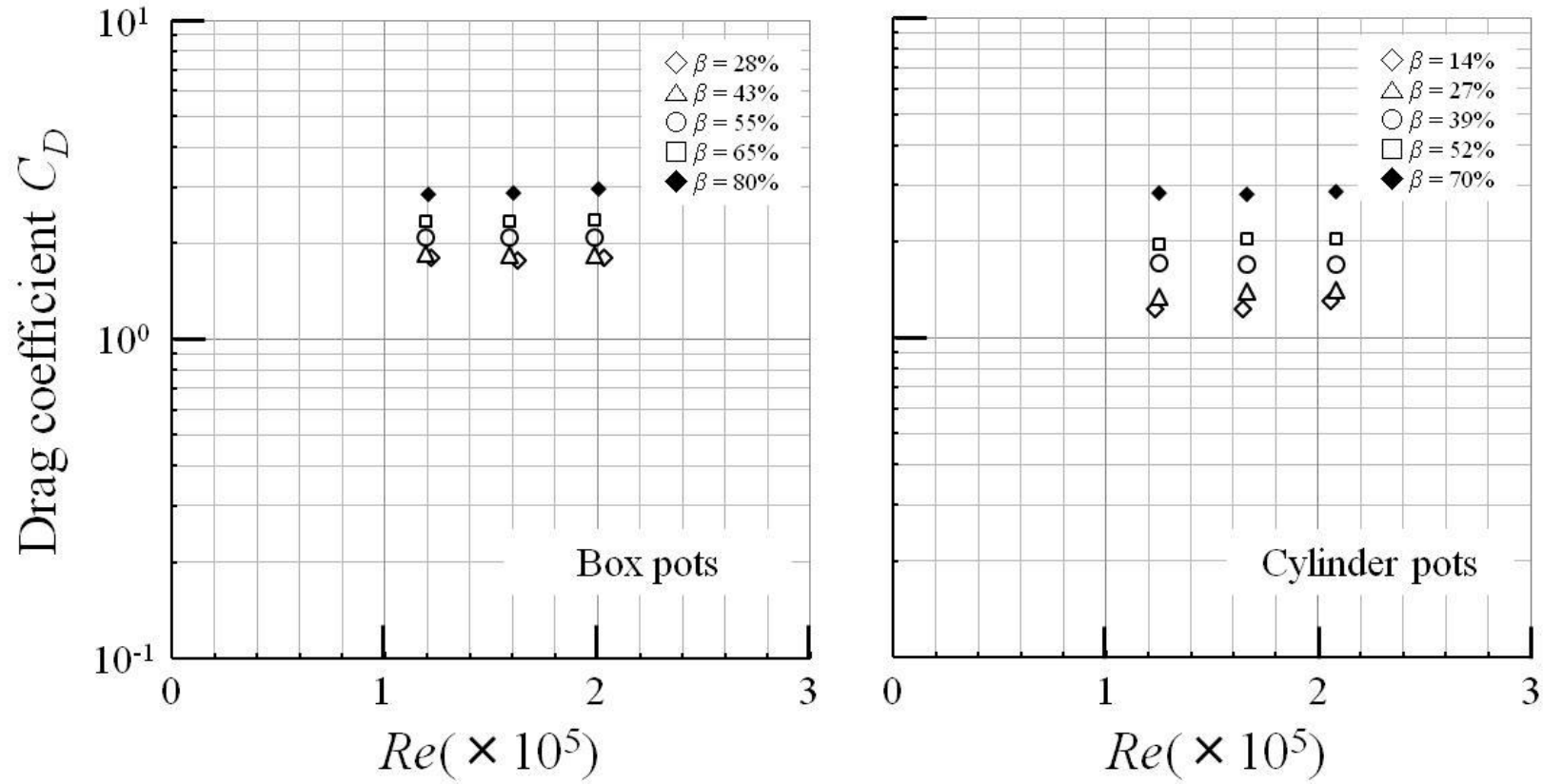


Fig.11 Relationship between drag coefficient C_D and Reynolds number Re of the box and cylinder pots covered with wooden rods as 0° of attack angle against water flow.

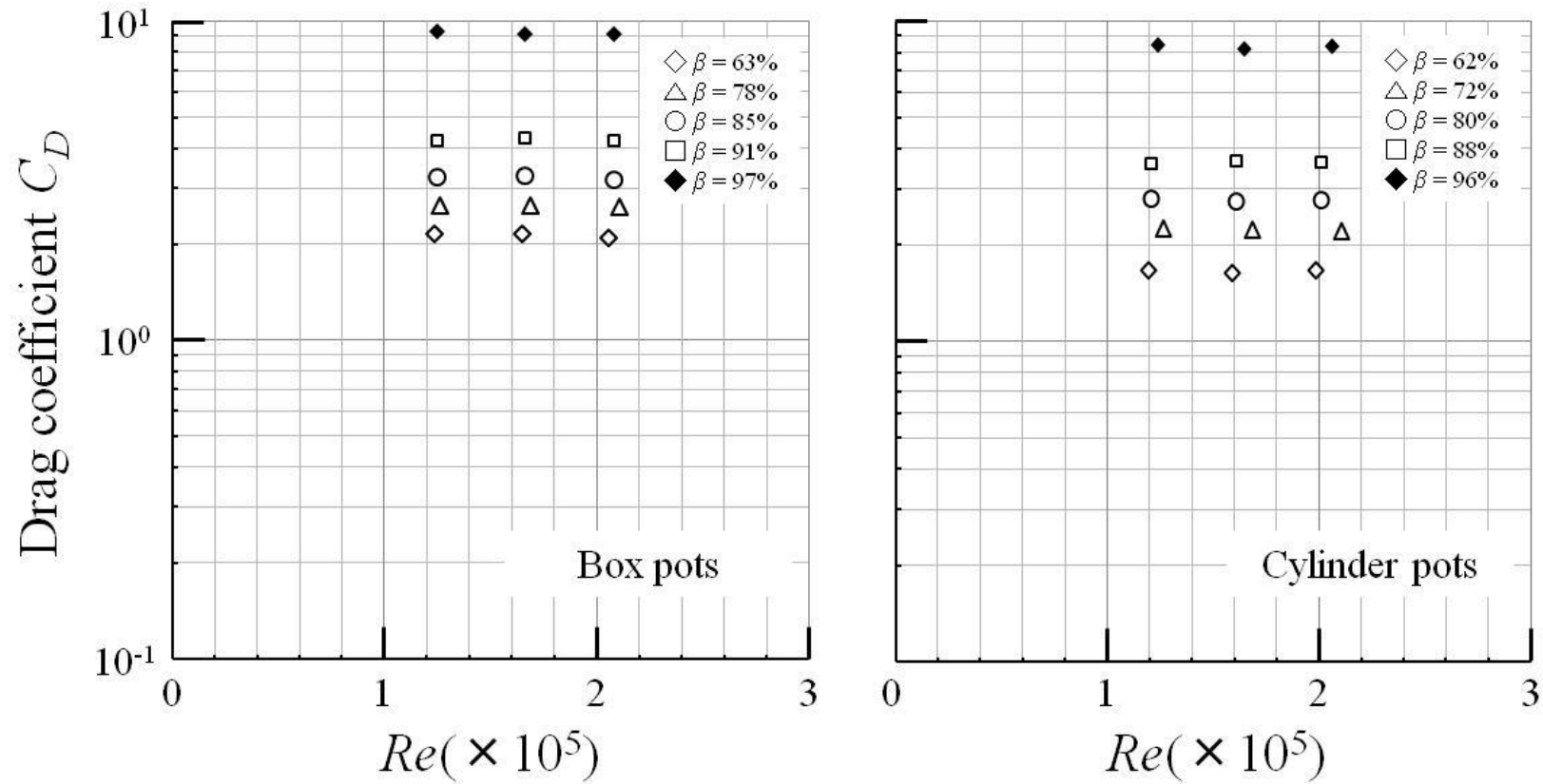


Fig.12 Relationship between drag coefficient C_D and Reynolds number Re of the box and cylinder pots covered with polyamide net as 0° of attack angle against water flow.

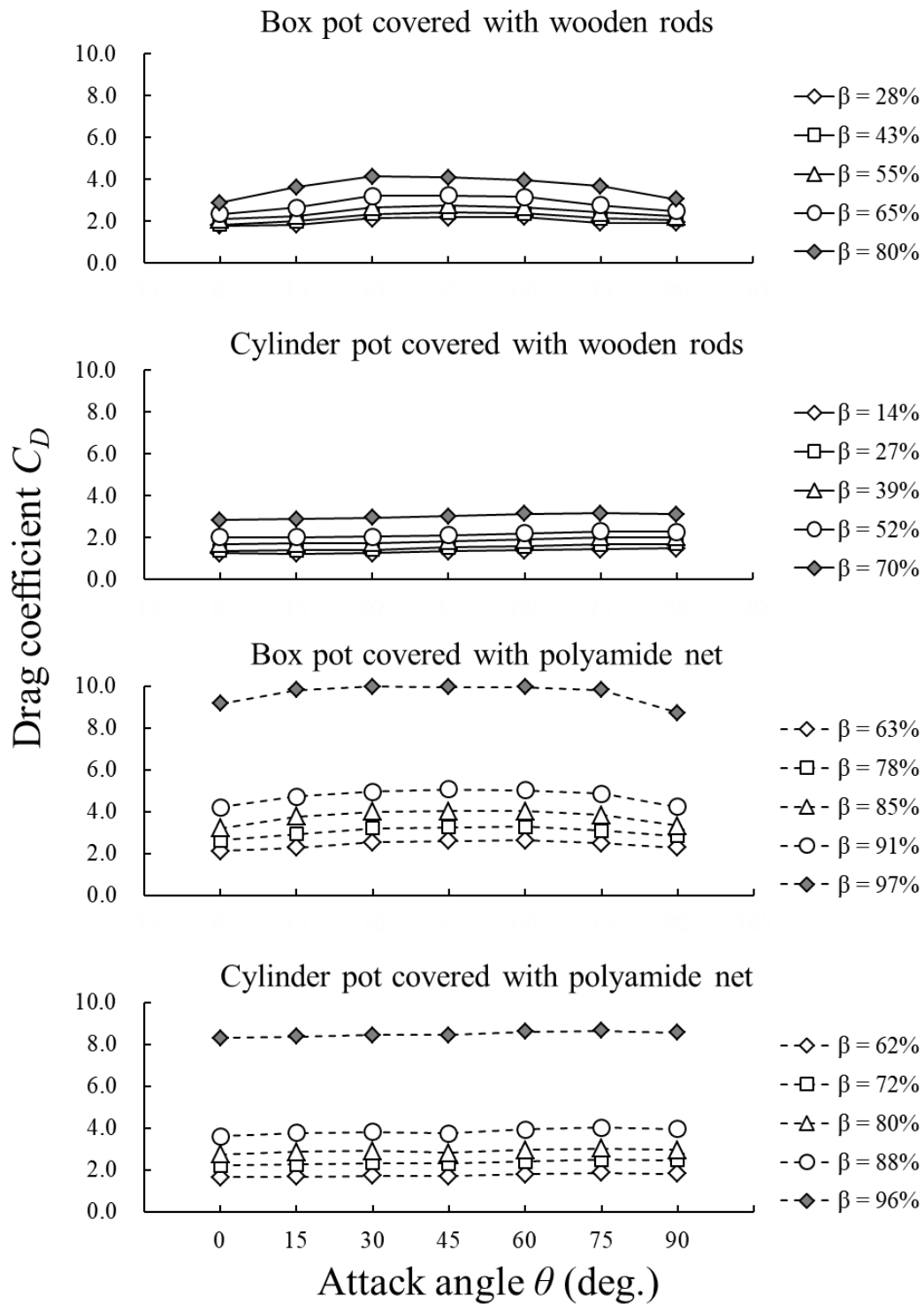


Fig.13 Relationship between attack angle and drag coefficient C_D of the box and cylinder pots covered with wooden rods and polyamide net as attack angle.

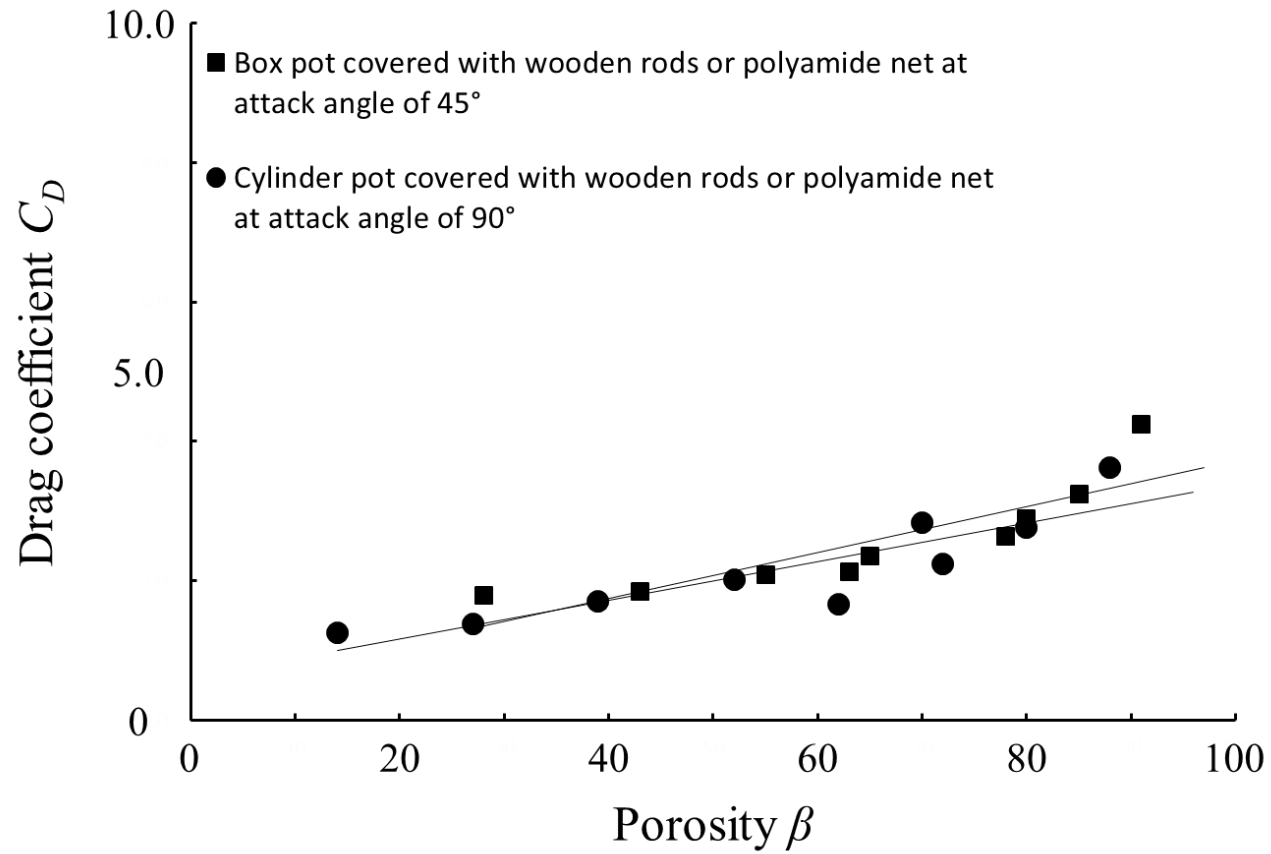


Fig.14 Relationship between drag coefficient C_D and porosity β of the box and cylinder pots covered with wooden rods and polyamide net at attack angle of 45° and 90°, respectively.

2-3 考察

本章では，かごを海底に安定して設置するための重要な情報となる流体力特性について明らかにするために，はじめに韓国と日本の沿岸域および内水面で使用されているかごの形状や表面を覆う格子または網地について調べ，その上で，実験対象として角柱型と円柱型の2種類の形状のかごを選び，かごの側面を木製の丸棒またはポリアミド製有結節網地で覆うことで β を変化させて，かごに作用する流体力として F_D と F_L を計測した。本研究で計測された F_L の大きさは F_D の大きさの約2~4%であり，かごに作用する流体力のほとんどを F_D が占めていた。この傾向は，類似する形状のかごの流体力特性を調べた報告²⁹⁾と同様であったことから，かごの形状が本研究で用いた角柱型や円柱型であれば，漁具を設計する上で F_L を考慮する必要はないと言える。

かごの側面を覆う素材の β が等しい場合， F_D は角柱型の方が円柱型よりも大きくなった。このような結果が得られた原因として，かごの形状の違いによって網目間および丸棒間の流れの変化が異なることが考えられる。今井らの研究^{36), 38)}によると，網目近傍の流れは網目の孔が流れに対して消失する θ において網目周辺の流速が小さくなることが報告されている。流れに対して網目の孔が消失する部位は円柱型の方が角柱型よりも多いため，円柱型の網目近傍において流速が小さくなり， F_D も小さくなったと推測できる。

角柱型および円柱型の何れの場合でも，かごの側面を覆う素材の β が大きくなると C_D は大きくなった。特に，円柱型かごでは β が91%から97%になると C_D は極端に大きくなった。流れに対して垂直に置かれた平面網地では，網目の β が小さいほど C_D が大きくなるが⁵⁴⁾⁻⁵⁶⁾，本研究で検討したかごではこれとは異なる結果となった。このような

現象が見られた原因として、かごを通過する流れは、かごの β が小さいと変化が大きく⁵⁸⁾、かご内部の流速は設定流速より小さくなり、また、 β が大きいと流速の変化が小さく、かご内部の流速と設定流速との差が小さくなることが考えられる。⁵⁹⁾一般に網漁具では、網地パネル毎に作用する流体力をもとにして設計が行われるが、^{57), 60), 61)}かごの場合、かご内部の流速が変化するために、網地パネル毎の流体力情報をもとにして設計すると、 β によってかごに作用する流体力を過大評価してしまう可能性があると考えられる。

C_D は角柱型では $\theta = 45^\circ$ で、円柱型では $\theta = 90^\circ$ で最大となった。このような結果となった原因には、前述したように網目間および丸棒間の流れの変化やかごを通過する流れの流速分布によるものと考えられ、また、円柱型では入口の側面が流れに対して垂直になる $\theta = 90^\circ$ の時に C_D は最大となることから、かごを海底に設置する時に流体力を小さくして安定して設置するためには、漁具設計および操業方法において、かごの入口を流向に向けるまたは後方に位置するような工夫が求められる。

本研究によって、角柱型および円柱型かごの F_D が最も大きくなる $\theta = 45^\circ$ および $\theta = 90^\circ$ の時について、かご側面の β と C_D の関係を示す実験式を得ることができた。かごを設計する時に、かごが流れを受ける前面の代表面積と β が分かれば、この実験式によって、かごに作用する F_D を推定することができる。

第3章 かごの形状と空隙率が後流域の流速分布に及ぼす影響

本章では、かごの形状と空隙率がかごの後流域の流速分布に与える影響を明らかにするために、角柱型と円柱型の2種類の形状のかごを用いて、かごの側面を丸棒または網地で覆って空隙率を変化させて、回流水槽実験によってかごの後流域の流速分布を明らかにした。

3-1 材料と方法

(1) 流速分布の測定実験

実験は鹿児島大学の回流水槽(観測水路：長さ 6.0 m，幅 2.0 m，水深 1.0 m)で行った。実験装置の模式図を Fig.15 に示す。ここで、流れ方向を X 軸方向，流れ方向に垂直な方向を Y 軸方向とした。実験に使用したかごは，流体力測定で使用した同様な角柱型かごと円柱型かごを用いて実験かごは観測水路の底面に設置し，かごが流れに対して動かないように 1 kg の重りをかごの上部に置いて固定した。重りの大きさ(長さ 8 cm × 幅 8 cm × 高さ 2 cm)はかごの大きさと比べて小さく，かごの後流域の流速には影響しないと考えた。流速の測定範囲は，かごの流れ方向の長さ($L = 0.40$ m)を基準として X 軸方向には $4L$ ，Y 軸方向には $2L$ とした。³¹⁾流速の測定点は X 軸方向には $0.5L$ 間隔で 9 点，Y 軸方向には $0.25L$ 間隔で 9 点の合計 81 点として，底面境界層の影響を考慮して，水槽の底面から 10 cm の高さとした。また，漁場の流速を考慮して設定流速は 0.15m/s と 0.30 m/s にした。¹⁾3 成分電磁流速計(ALEC 社製：Electronics, ACM300-A)で測定した流速計の出力はアンプで増幅し，サンプリング周波数 20Hz で A/D 変換して，計測時間を 20 秒としてパソコンに取り込んだ。実験時の水温は 25.0~27.0°Cで，こ

の時のかごの長さ L を代表長さとするレイノルズ数は $6.7 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^5$ であった。

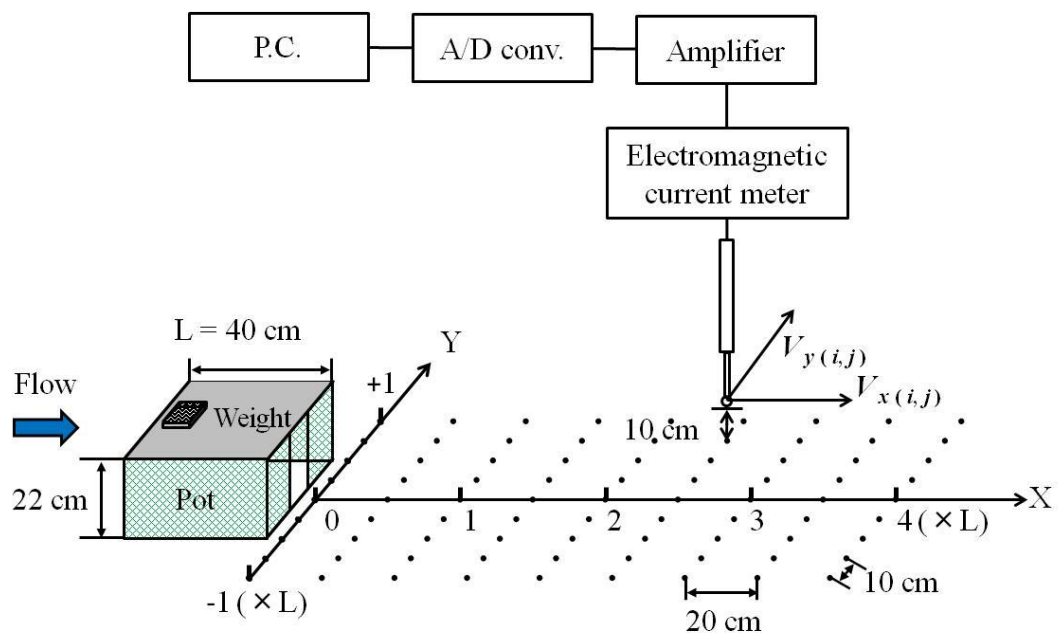


Fig.15 Schematic drawing of experimental set up for measuring flow speed.

(2) 解析方法

Fig.16 は回流水槽の観測水路内の流速を測定した結果である。流速が 0.15 m/s と 0.30 m/s の流速分布は下流方向の右側に設置流速より小さな減速域が形成された。すなわち、観測水路内の流れは必ずしも均一ではないと考えられたため、かごを設置しない時の流速も測定して、かごを設置していない時の流速 V_b とかごを設置した時の流速 V_m の比を流速比 R_v として(9)式で求めた。

$$R_v = \frac{|V_m|}{|V_b|} \quad (9)$$

算出した流速比 R_v を等高線ソフト(Golden Software, Surfer Version 10)を使用して $R_v = 0.0 \sim 1.2$ の範囲で 0.2 ごとに等流速比線図を描いて分析した。

かごの後流域の流速分布はかごの形状と空隙率によって変化すると考えられるため、角柱型と円柱型かごについてかごの入口前方部とかごの両側の流速比の差 D_r を(10)式で求めた。

$$D_r = R_{v(0.0L)} - \frac{R_{v(-0.5L)} + R_{v(+0.5L)}}{2} \quad (10)$$

ここで、 $R_{v(0.0L)}$ は X 軸上 ($Y = 0.0L$) での流速比で、 $R_{v(-0.5L)}$ 、 $R_{v(+0.5L)}$ はそれぞれ $Y = -0.5L$ 、 $Y = +0.5L$ における流速比である。

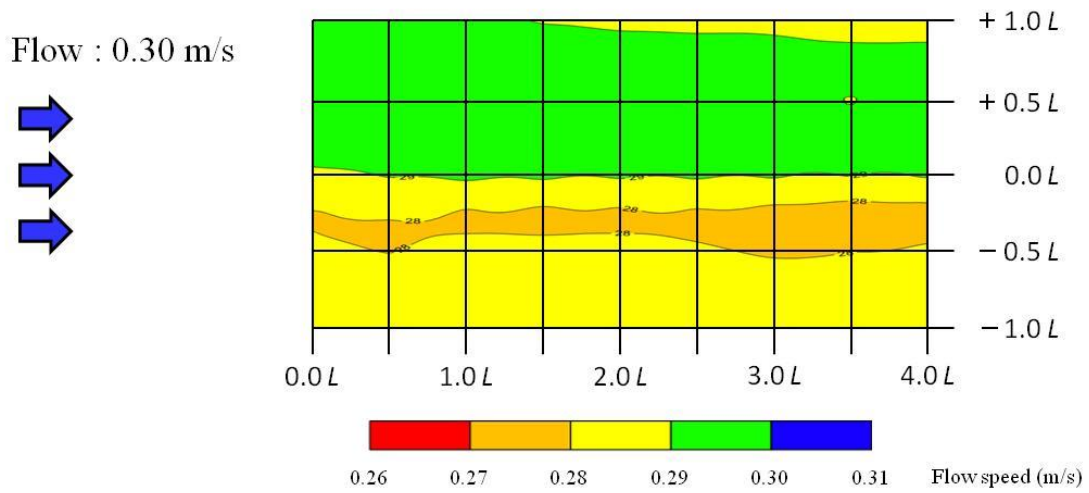
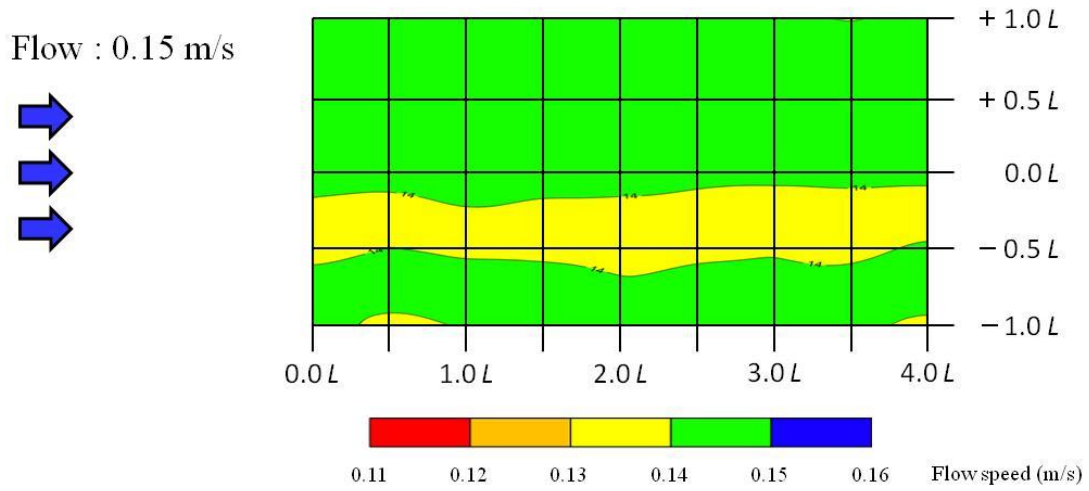


Fig.16 Distribution of flow speed without pot.

3-2 実験結果

(1) 設定流速ごとによるかごの後流域の流速分布

丸棒で覆った角柱型かごの場合、流速が 0.15 m/s の時と流速が 0.30 m/s の時の流速分布の一例を Fig.17 に示す。 β が 28% の等流速比線図は、何れもかごを中心として左右対称で、かごの直後ではかごの両側で最も減速し、かごから X 軸方向に離れると R_v が徐々に増加し、Y 軸方向に離れるとかごの入口前方部では R_v が低く、かごの両側前方部ではさらに低下し、かごの外側では設定流速とほぼ同じだった。

設定流速 0.15 m/s の時の等流速比線図は、X 軸方向が 0.0~1.5 L の範囲では $R_v = 0.0 \sim 1.2$ で最も減速した領域があり、1.5~3.0 L の範囲では $R_v = 0.2 \sim 1.2$ でやや増速し、3.0~4.0 L の範囲では $R_v = 0.4 \sim 1.0$ となった。一方、かごの入口前方部である Y 軸方向が 0.0~+0.25 L, 0.0~-0.25 L の範囲では $R_v = 0.2 \sim 0.8$ で小さく、かごの両側である +0.25~+0.75 L, -0.25~-0.75 L の範囲では $R_v = 0.0 \sim 0.8$ でさらに減速し、かごの外側である +0.75~+1.0 L, -0.75~-1.0 L の範囲では $R_v = 0.8 \sim 1.2$ と増速した。設定流速 0.30 m/s の時の等流速比線図でも、かごの直後で流速比が $R_v = 0.2$ 以下の最も減速した領域があること、X 軸方向に距離が離れると R_v が増速すること、Y 軸方向に距離が離れるとかごの入口前方部や両側前方部、外側で R_v の範囲が共通している。

合計 81 点の測定点の流速比 R_v は、流速が 0.15 m/s の時と流速が 0.30 m/s の時では両者に有意な差が認められなかったので (t 検定, $p > 0.05$), 流速が 0.30 m/s の時の場合についてのみ検討することにした。

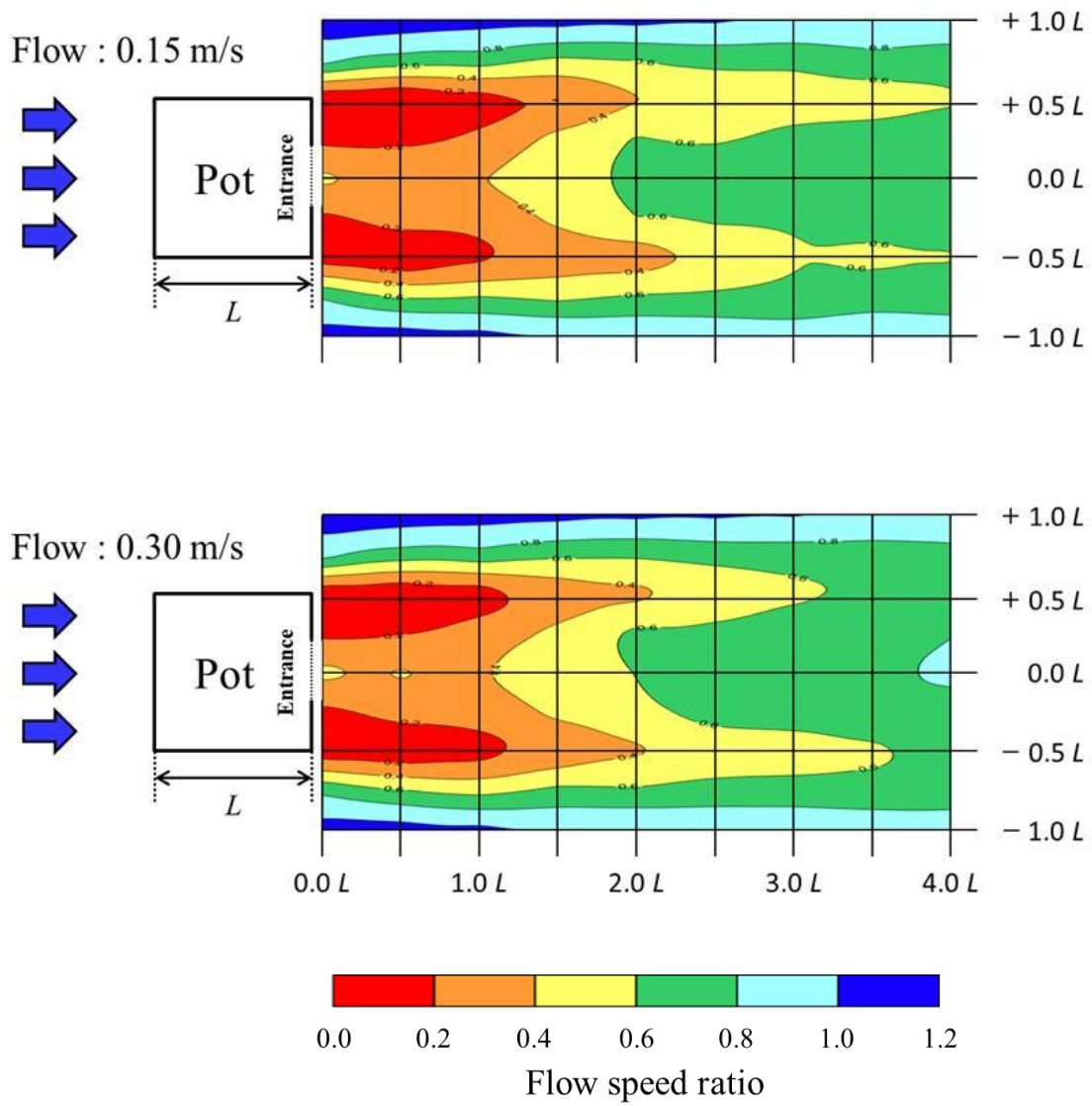


Fig.17 Distribution of flow speed ratio in the rear area of box pot covered with wooden rods ($\beta = 28\%$).

(2) かがの形状と空隙率によるかごの後流域の流速分布

丸棒で覆った角柱型かごの等流速比線図を β ごとに Fig.18 に示す。かごの下流側の流速分布は何れの β でもかごを中心として左右対称で、かごの両側で最も減速していた。 β が 28%の時の等流速比線図は、X 軸方向が $0.0 \sim 1.5 L$ の範囲では、かごの入口前方部である $Y = 0.0 \sim +0.25 L$, $0.0 \sim -0.25 L$ の範囲で流速比が $0.2 \sim 0.6$ と小さく、かごの両側である $Y = +0.25 \sim +0.75 L$, $-0.25 \sim -0.75 L$ の範囲では流速比が $0.0 \sim 0.8$ となり、 $R_v = 0.2$ 以下の減速域が $1.18 L$ まで形成された。かごの外側である $Y = +0.75 \sim +1.0 L$, $-0.75 \sim -1.0 L$ の範囲では $R_v = 0.8 \sim 1.2$ であり、 $R_v = 1.0$ 以上の領域が見られた。X 軸方向が $1.5 \sim 3.0 L$ の範囲では、かごの入口前方部には下流方向に向かうと $R_v = 0.8$ まで増加し、かごの外側で見られた $R_v = 1.0$ 以上の領域が狭くなった。X 軸方向が $3.80 L$ 以上では、かごの入口前方部には流速比が $R_v = 1.0$ まで増加し、かごの外側には $R_v = 1.0$ 以上の領域が消失した。ここで、かご後方の $R_v = 0.6$ 以下の減速域はかごの β により異なった。 $R_v = 0.6$ 以下の減速域は、 β が 28%では X 軸方向に $3.64 L$ まで出現したが、 β が大きくなると小さくなり、 β が 80%では $0.14 L$ まで見られた。特に、かごの両側に見られた流速比 R_v の最小値は、 β が 28%では 0.2 よりも小さく、 β が大きくなると大きくなり、 β が 80%では 0.4 より大きかった。

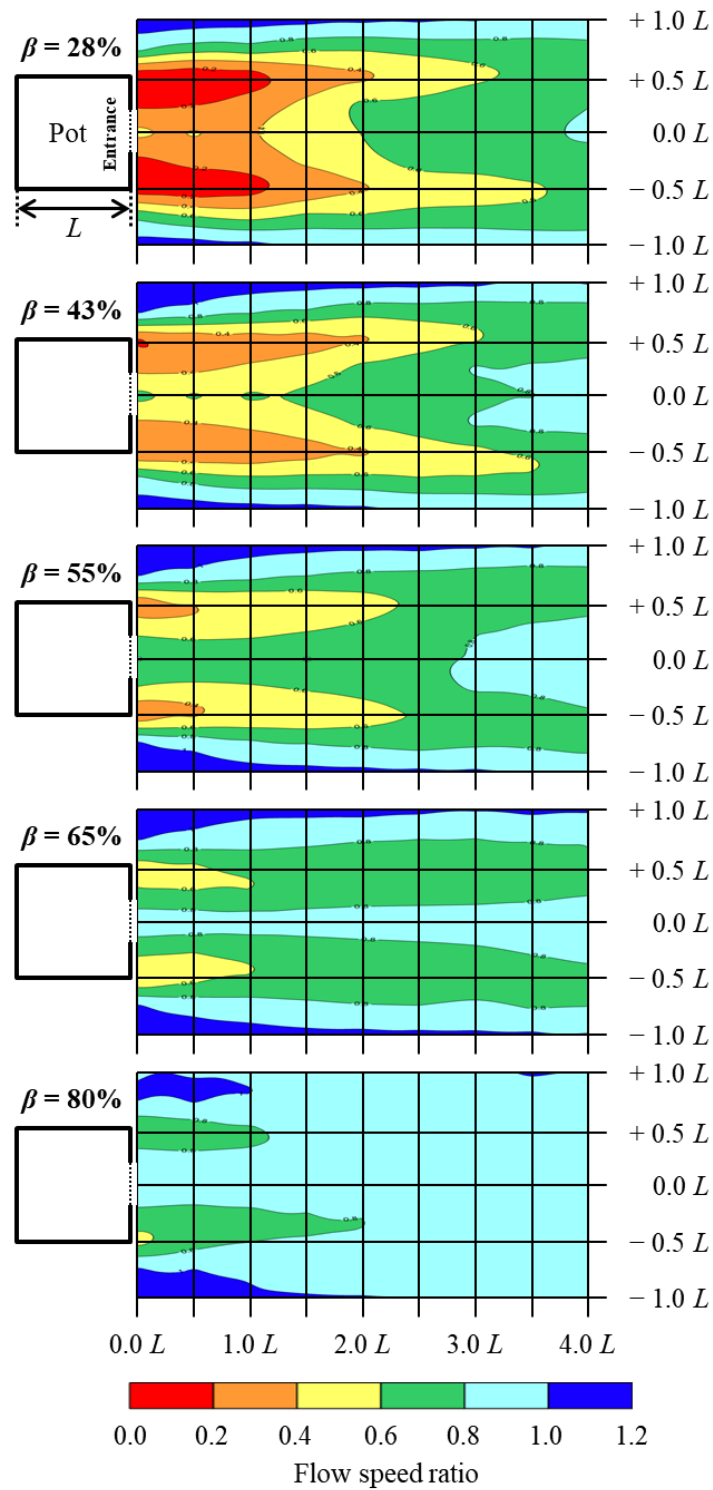


Fig.18 Distribution of flow speed ratio in the rear area of box pot covered with wooden rods.

丸棒で覆った円柱型かごの等流速比線図を β ごとに整理して Fig.19 に示す。かごの後流域の流速分布は角柱型かごと同様に左右対称で、かごの入口前方部では流速比が小さく、かごの両側ではさらに低下し、かごの外側では設定流速とほぼ等しくなっていた。かご直後にある流速比 R_v が 0.6 以下の減速域は、 β が 14% の時には X 軸方向に $2.08 L$ まで見られ、 β が大きくなると長く伸び、 β が 39% の時には $2.66 L$ まで見られた。 β が 70% になると $R_v = 0.6$ 以下の減速域は見られなかった。また、かごの後流域で渦が形成されたと考えられる $R_v = 0.2$ 以下の減速域は、 β が 14% の円柱型かごでは X 軸方向に $0.35 L$ まで伸び、 β が 28% の角柱型かごよりも $0.83 L$ 小さかった。

網地で覆った角柱型かごの等流速比線図を β ごとに整理して Fig.20 に示す。かごの後流域の流速分布は、丸棒で覆った角柱型かごと同様に β が大きくなると $R_v = 0.6$ 以下の減速域が小さくなった。しかし、 β が 63% の時には $R_v = 0.6$ 以下の減速域が X 軸方向に $2.04 L$ まで見られ、丸棒で覆った角柱型かごで β が 68% の時よりも $1.00 L$ 大きかった。また、 β が 91% 以上になるとかごの後流域のすべての測定点で R_v が 0.6 より大きかった。

網地で覆った円柱型かごの等流速比線図を β ごとに整理して Fig.21 に示す。かごの後流域の流速分布は角柱型かごと同様に左右対称であり、かご直後の $R_v = 0.6$ 以下の減速域は β が大きくなると徐々に小さくなった。 β が 62% の時には $R_v = 0.6$ 以下の減速域が X 軸方向に $0.93 L$ まで見られ、網地で覆った角柱型かごで β が 63% の時よりも $0.77 L$ 小さかった。

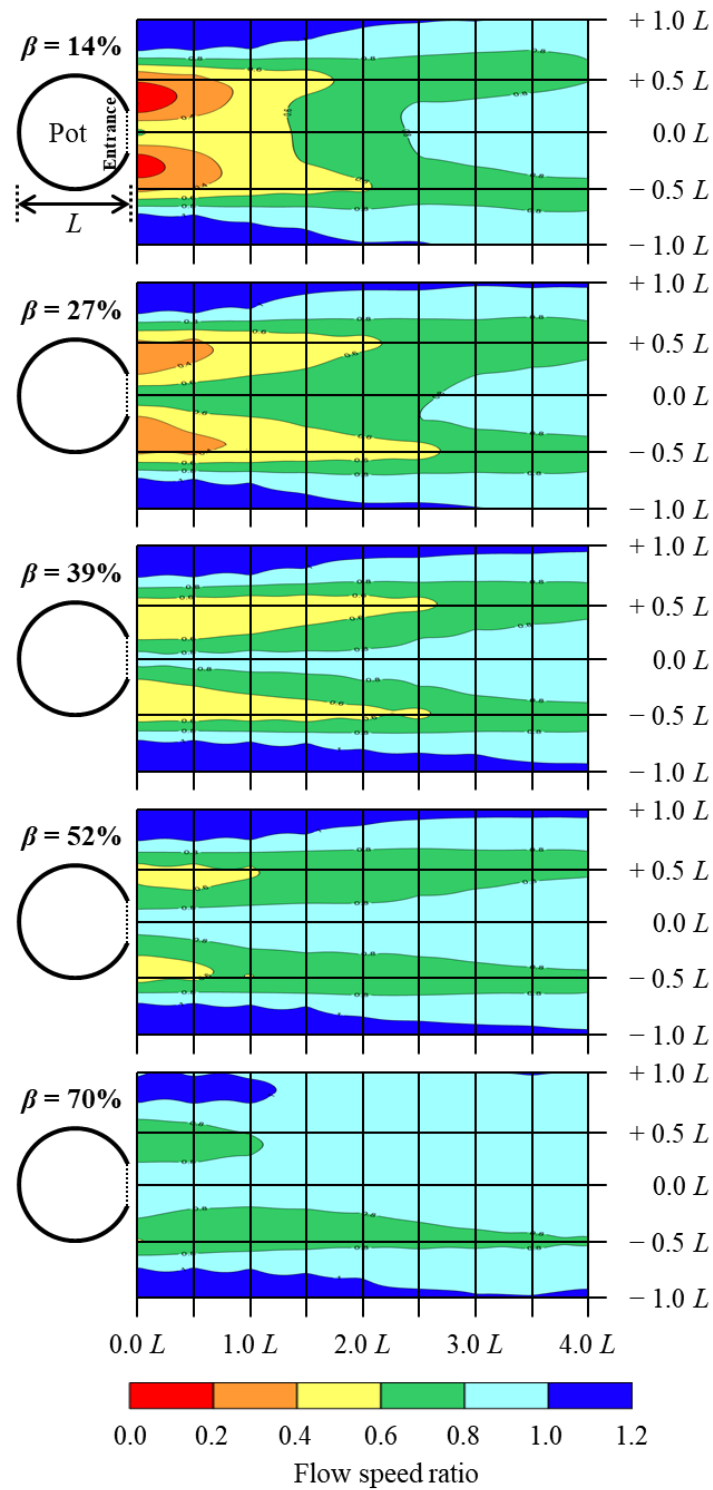


Fig.19 Distribution of flow speed ratio in the rear area of cylinder pot covered with wooden rods.

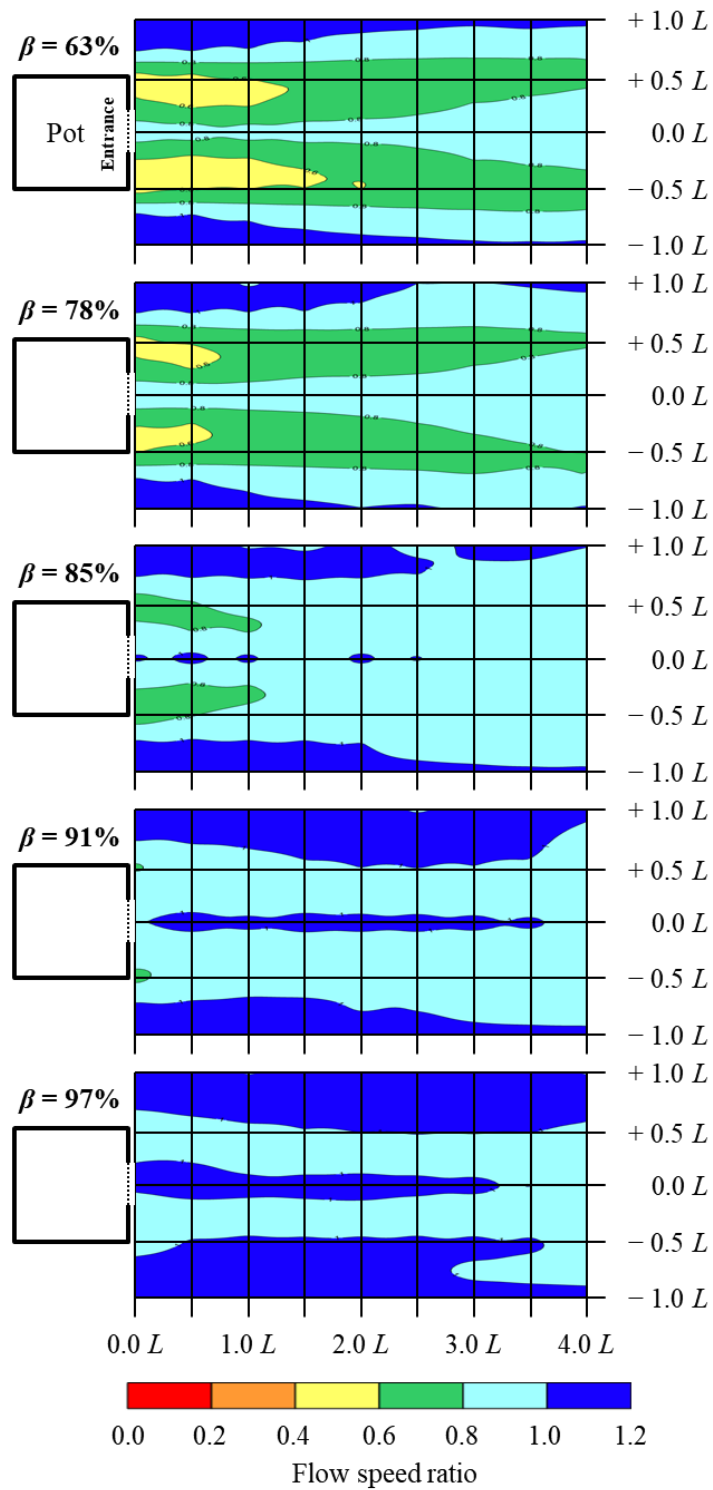


Fig.20 Distribution of flow speed ratio in the rear area of box pot covered with polyamide net.

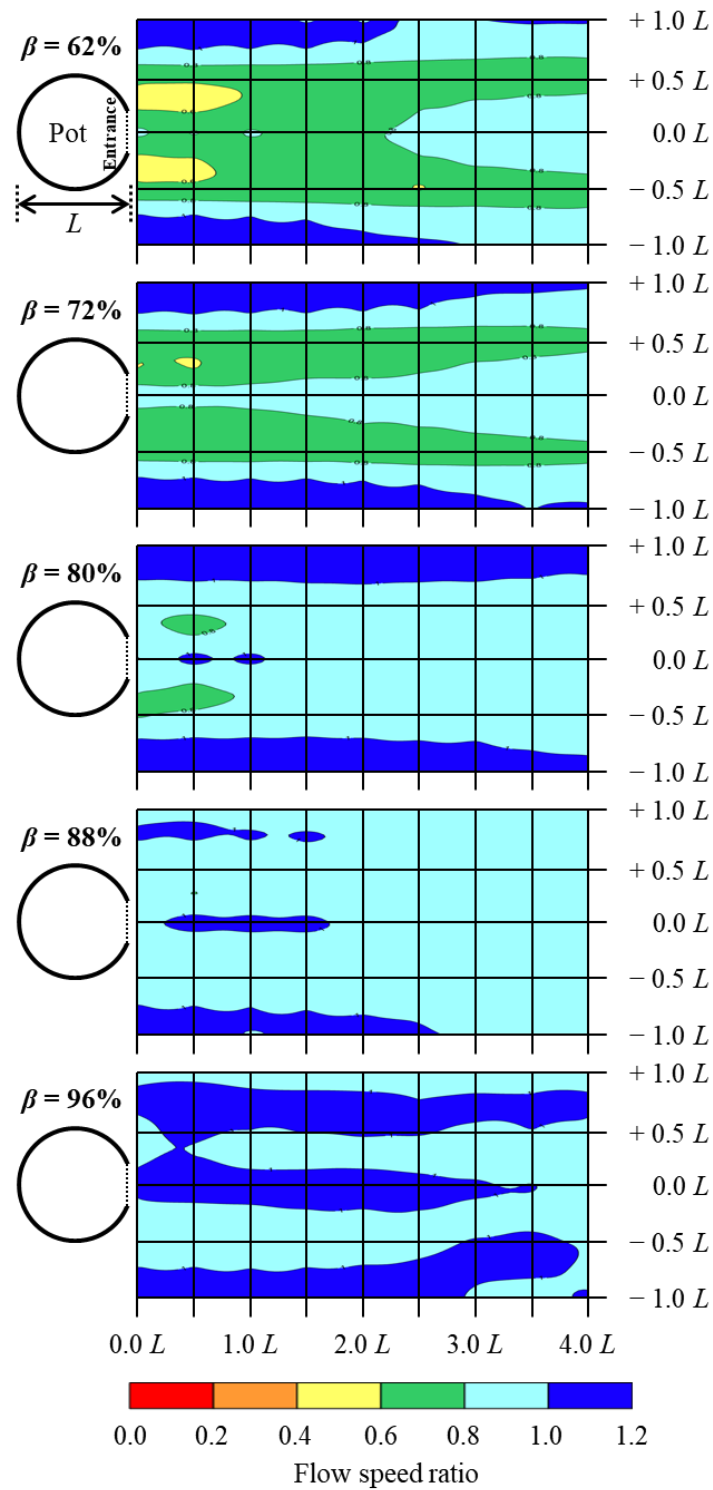


Fig.21 Distribution of flow speed ratio in the rear area of cylinder pot covered with polyamide net.

丸棒で覆った角柱型かごと円柱型かごについて、かごの入口からの距離と流速比の差 D_r の関係を Fig.22 に示した。角柱型かごの場合、 D_r はかごから下流方向に離れるにつれて減少する傾向を示している。かご直後である $X = 0.0 L$ では、 β が 55% の時に D_r が最大で、 β が 80% の時に最小であり、 $X = 4.0 L$ では、 D_r が 0.07~0.17 になった。一方、円柱型かごの場合、 $X = 0.0 L$ では、 β が 39% の時に D_r が最大で、 β が 70% の時に最小であった。 $X = 4.0 L$ では、円柱型と角柱型かごの D_r の値を比較すると円柱型の方が角柱型よりも大きい。

網地で覆った角柱型かごと円柱型かごについて、かごの入口からの距離と流速比の差 D_r の関係を Fig.23 に示した。角柱型かごの場合、 D_r は丸棒で取り付けた角柱型かごと同様にかごから下流方向に離れるにつれて減少する傾向を示した。 $X = 0.0 L$ では、 β が 78% の時に D_r が最大で、 β が 97% の時に最小になった。 $X = 4.0 L$ では、 D_r が 0.02~0.16 になった。一方、円柱型かごの場合、 $X = 0.0 L$ では、 β が 72% の時に D_r が最大で、 β が 96% の時に最小であった。 $X = 4.0 L$ では、 D_r が 0.01~0.21 となった。

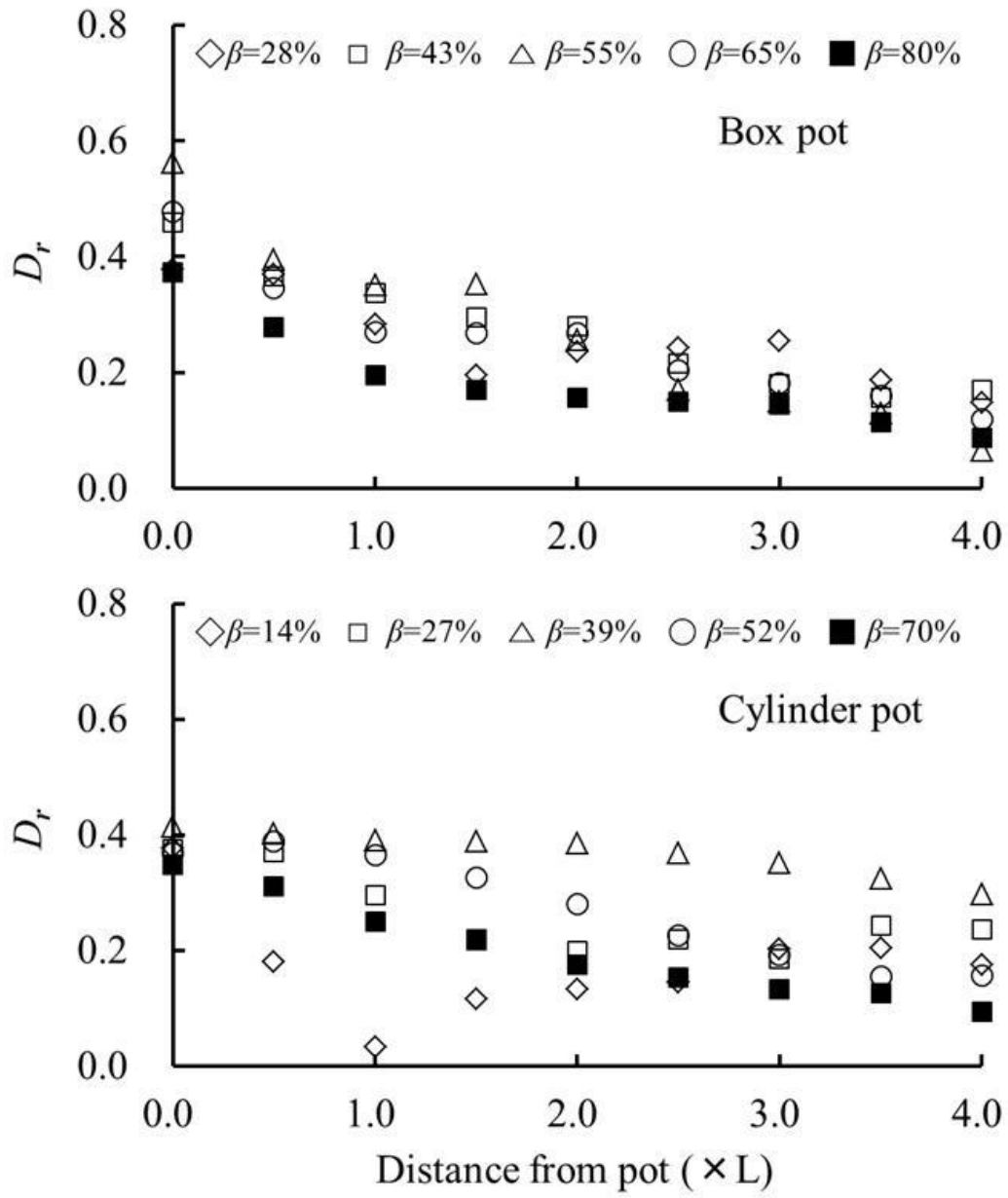


Fig.22 Relationship between distance from pot and D_r for box and cylinder pots covered with wooden rods.

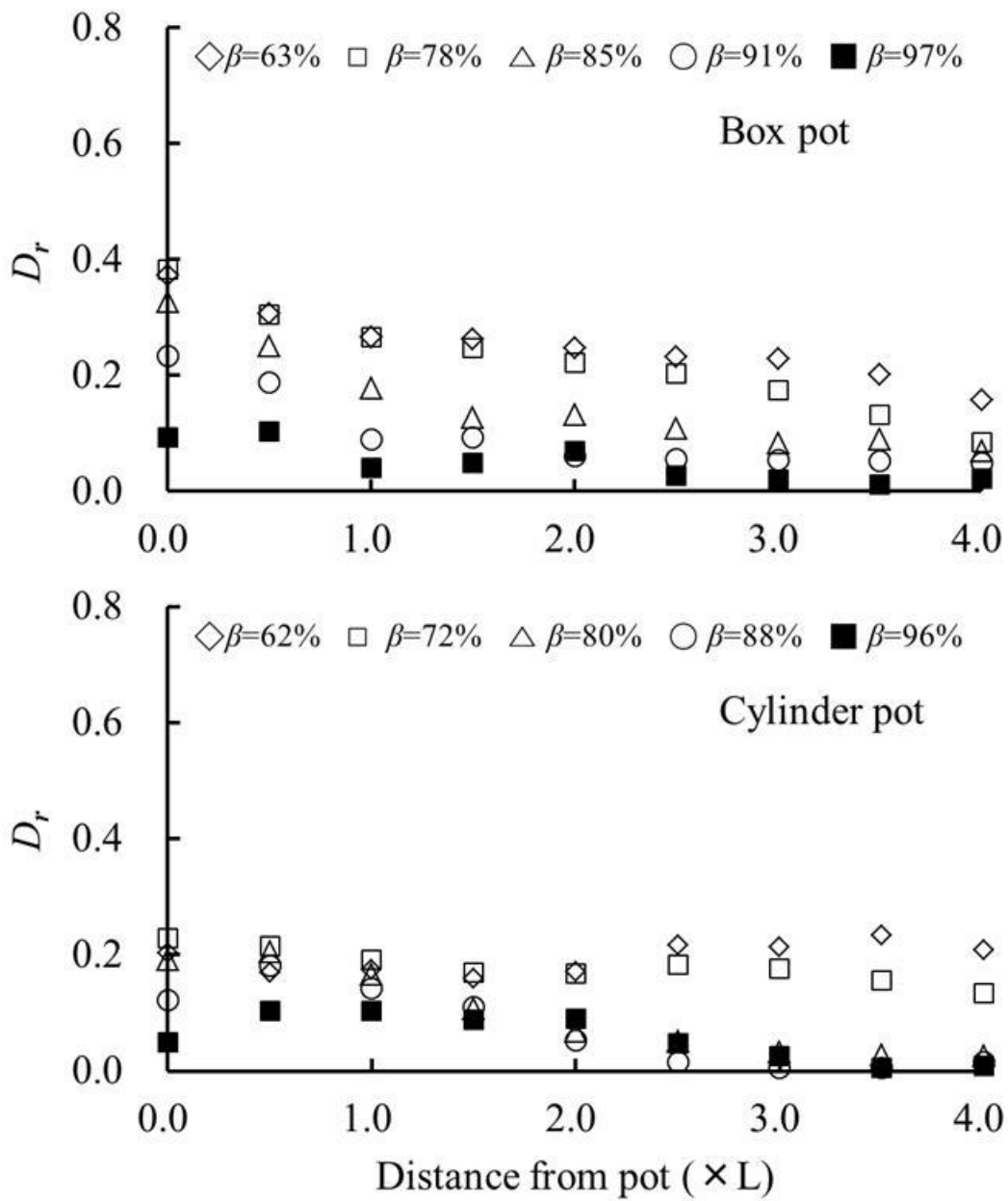


Fig.23 Relationship between distance from pot and D_r of box and cylinder pots covered with polyamide net.

3-3 考察

本研究では、空隙率を変化させた角柱型かごと円柱型かごを用いて、かごの形状と空隙率がかごの後流域の流速分布に与える影響について検討した。

今井ら⁶²⁾は、空隙が小さい場合は網地の後流部に流速の低い領域が広がるが、空隙が大きくなると流れが網地の中を通りやすくなり、網地の後流部の流速分布に及ぼす影響が小さくなると報告した。すなわち、空隙が小さい時には、流れが網地を通過せずに網地に沿って流れるため、かごの後流域では入口前方部の流れとの差が大きくなり、空隙が大きい時には、網地を通過しやすくなるため、入口前方部との差が小さくなる。

かごの β とかごの後流域の流れの関係について考えると丸棒の場合には、流れに対して垂直に置かれた 2 本の丸棒の間隔に対する直径の比が 3.0 よりも大きくなると 2 本の丸棒の後流域の流速分布は単独の丸棒と同様な流速分布が形成される⁶³⁾⁻⁶⁷⁾。丸棒の間隔比が 3.0 の時の β は 66%であり、丸棒を取り付けた角柱型かごと円柱型かごでは、 β が 65%以下になると R_v が 0.6 以下の減速域が現れる。すなわち、 β が 65%以下では流れがかごの中を通過しにくくなり、かごの側面を沿うように流れる。網地の場合、流れ方向と網地のなす迎角が 42.9° より大きくなると網地の後流域の流速分布は、流れが網地を通過しても下流部の流速が上流部の流速とほぼ同じであると報告されている⁶²⁾。迎角が 42.9° の網地を β に換算すると 58%であり、網地で覆った角柱型かごと円柱型かごの流速分布は、 β が 78%以上では流れが網目を通過しやすくなり、 R_v が 0.6 以下の減速域が見られなくなったと考えられる。

丸棒で覆った場合、 β が 28%の角柱型かごでは、 R_v が 0.6 以下の減

減速域が X 軸方向に $3.64 L$ 、空隙率が 47%の円柱型かごでは $2.69 L$ まで伸び、角柱型かごの方が円柱型かごよりも下流方向に $R_v = 0.6$ 以下の減速域の長さが $0.95 L$ 大きくなる。また、 β が 55%の角柱型かごでは、 $R_v = 0.6$ 以下の減速域が X 軸方向に $2.38 L$ まで伸び、 β が 52%の円柱型かごよりも $1.30 L$ 大きかった。一方、網地で覆った場合、 β が 63%の角柱型かごでは、 $R_v = 0.6$ 以下の減速域が X 軸方向に $2.04 L$ 、 β が 62%の円柱型かごでは $0.93 L$ まで伸び、角柱型かごの方が円柱型かごよりも下流方向に $R_v = 0.6$ 以下の減速域の長さが $1.11 L$ 大きかった。また、 β が 78%の角柱型かごは $R_v = 0.6$ 以下の減速域が X 軸方向に $0.75 L$ まで現れたが、 β が 80%の円柱型かごでは $R_v = 0.6$ 以下の減速域が現れなかった。このことから、かご直後で形成される $R_v = 0.6$ 以下の減速域は角柱型かごの方が円柱型かごより長く伸びることがわかる。これは、流れがかごの前面と後面の 2 回通過する中で、角柱型かごでは流れとかご側面とのなす角が垂直であるが、円柱型かごでは流れとかごの側面がなす角が角柱型よりも小さくなり、そのなす角が小さくなるにつれてかごの側面に沿った流れが形成されることが考えられ、円柱型かごの方が減速域が大きくなったと考えられる。

かごの両側の流速比 R_v は角柱型かごでは、 β が 28%の時には $0.0 \sim 0.8$ で、 β が増加するによって流速比が大きくなり、 β が 97%になると $0.8 \sim 1.2$ となった。また、円柱型かごでも、 β が 14%の時には R_v が $0.0 \sim 1.0$ で、 β の増加によって流速比が大きくなり、 β が 96%になると R_v が $0.8 \sim 1.2$ となった。このことは、 β が小さい時には、かごの側面を沿った流れが形成され、かごの後流域では R_v が小さくなるが、空隙率が大きくなると流れがかごの中を通過するため、かごの後流域では R_v が大きくなったと考えられる。

南九州の河川で使用されているハート型の竹かごの β は 43% であり、かご直後の $R_v = 0.6$ 以下の減速域が下流方向に $2.50 L$ まで形成されると報告されている³⁰⁾。本研究で測定した丸棒を取り付けた円柱型かごで β が 47% の時では、下流方向に $2.69 L$ まで $R_v = 0.6$ 以下の減速域が形成され、ハート型の竹かごとほぼ同じ結果が得られた。一方、沿岸域で使用されているかごは角柱型や円柱型の形状で、 β が 80~96% である。鹿児島県沿岸で使用されている網地で覆った角柱型かごは β が 83% で、かごの後流域での R_v は 0.85~0.95 であり³¹⁾、 β が 85% の網地で覆った角柱型かごとほぼ同じ流速分布を示した。

第4章 かごの後流域の流速分布がオイカワの行動に及ぼす影響

本章では、かごの後流域の流速分布がかごに対するオイカワの行動に及ぼす影響を明らかにするために、角柱型と円柱型かごを用いて、明・暗条件と平常態・側線閉塞状態を組み合わせる行動実験を行った。

4-1 材料と方法

(1) 供試魚

供試魚は鹿児島市永田川で漁獲したオイカワ *Opsariichthys platypus*(平均体長 $BL: 90.0 \pm 0.6$ mm, 21尾)を用いた。オイカワの飼育には簡易水槽を使用し、水槽のガラス部分はアルミホイルで覆った。水槽の中には200 Wの水中用ヒーター1本を取り付けて、水温が20～25℃の範囲になるようにICサーモスタット(制御温度範囲: 15～35±1℃)で調整した。また、通気には円球形の小型エアーストン(直径50 mm)1個を用い、通気量を約1.0 l/分とした。餌料には浮上性があるキンギョ用の栄養食(日本ペットフード株式会社)を使用し、1日2回与えた。餌料を食べなかったオイカワは実験には使用しなかった。

(2) 魚の行動実験

魚の行動実験は2012年10月5日から2013年8月28日まで鹿児島大学水産学部の室内実験水槽(全長4.0 m × 幅1.0 m × 高さ0.4 m, 水深8.5 cm)で行った。実験装置の模式図をFig.24に示すように水路の上流部には仕切り板(長さ1.0 m × 幅0.2 m, 太さ1.0 cm)を取り付けて、下流部には2つの水中ポンプ(SP-150B, 120l/min.)を設置し、ポンプにより供給した水でオーバーフローさせた。かごの上流側にはプラスチック

ック製ハニカム(長さ 1.0 m × 幅 0.1 m × 高さ 0.2 m, セルサイズ 20 mm)を設置した。暗環境の実験では, 実験室の窓にアルミホイルを貼り付けて, さらに暗幕を付けて光を遮断した。デジタル照度計(M98S-011Y, 測定範囲 0.0~999,000 lx)で室内の照度を測定したところ 0.0 lx であった。暗室内で遊泳行動を撮影するために, 水槽の両端の上部には 2 台の赤外線投光器(Scene Electronics 社, S20D-IR)を設置した。

平常時の魚(以下, 平常魚と呼ぶ)は, 飼育水槽(長さ 0.4 m × 幅 0.2 m × 高さ 0.3 m)で 21 尾の中から 7 尾を任意に選んで観察每に入れ代えた。塩化コバルト水溶液で側線を閉塞した魚(以下, 閉塞魚と呼ぶ)は, 蒸留水 10ℓを入れた簡易水槽(長さ 0.4 m × 幅 0.2 m × 高さ 0.3 m)に 21 尾の中に 7 尾のみを 2 mmol/L の塩化コバルト水溶液の中に 3 時間収容して観察每に入れ代えた。^{68), 69)}

魚の行動観察は魚止め区間にオイカワ 1 尾を入れて 6 分間馴致した後, 魚止め網(金網, 網目 10 mm)を取りはずして水槽内を遊泳させた。この行動を暗視装置(S20D-IR)と共にビデオカメラ(SONY, HDR-CX700V)で 10 分間撮影し, 明・暗条件と平常態・側線閉塞状態を組み合わせ, 実験条件ごとに 7 回ずつ合計 280 回行った。

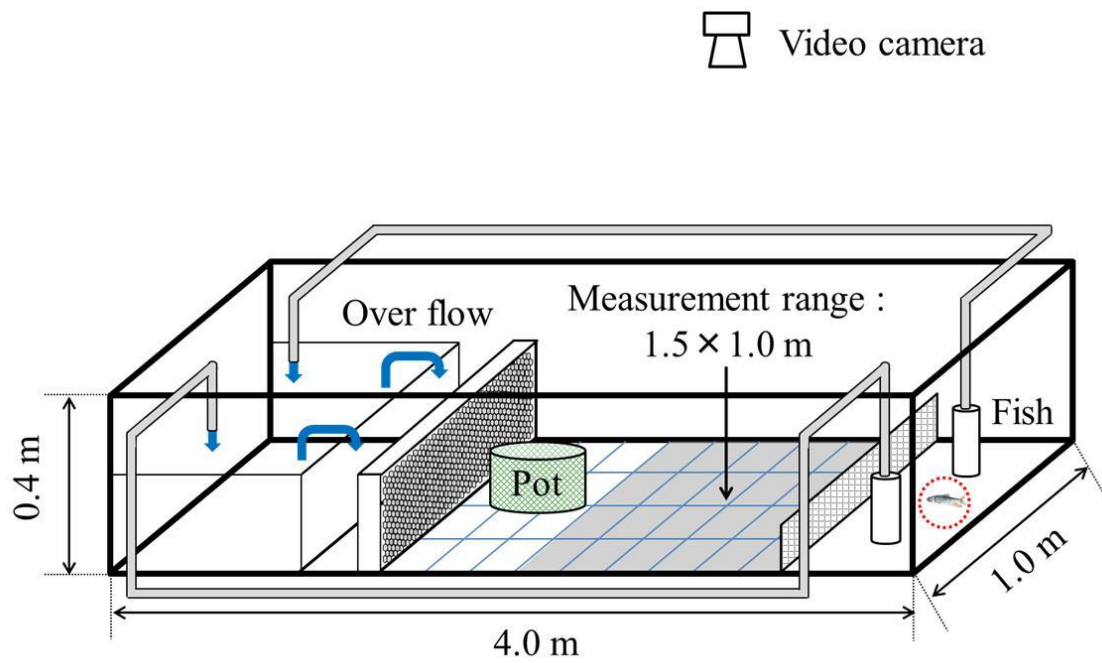


Fig.24 Schematic diagram of the experimental equipment.

(3) 実験水槽内の流速分布の測定

実験水槽内の流速分布を明らかにするために流速を測定した。測定点は Fig.25 に示すように X 軸方向には 150 cm, Y 軸方向には 100 cm の範囲で合計 91 点とした。また, 測定点の高さは底面境界層の影響を考慮して, 水槽の底面から 5 cm の位置とした。3 成分電磁流速計(ALEC Electronics, ACM300-A, 精度: 0.5 cm/s)で測定した流速計の出力はアンプで増幅し, サンプリング周波数は 20 Hz で A/D 変換して, 計測時間を 20 秒としてパソコンに取り込んだ。20 秒間の測定の平均値を各測定点での流速とした。実験時の水温は 20~25°Cであった。

測定した流速は, Z 軸方向の流速 V_z は 1.0 cm/s 以下で X 軸方向の流速 V_x と比べて小さかったため, 各点での流速 $V_{(i,j)}$ は V_x と V_y の合成として(11)式で求めた。

$$V_{(i,j)} = \sqrt{V_{x(i,j)}^2 + V_{y(i,j)}^2} \quad (11)$$

得られた流速から等高線ソフト(Sufer Version 10)を使用して 1.0 cm/s ごとに等流速線図を描いた。撮影した映像は動画解析ソフト(PV STUDIO 2D)を用いて, 供試魚の頭部を魚の遊泳位置として 1.0 秒間隔で座標を算出した。魚の遊泳時間は魚の止め網を取りはずした後, 魚が観察範囲内での遊泳軌跡を 1.0 秒間隔でプロットして等流速線図を重ねて, 流速毎に魚が遊泳した時間を数えた。観察されたすべての遊泳時間 N に対する流速毎の遊泳時間 n を R_f として(12)式で求めた。

$$R_f = \frac{n}{N} \quad (12)$$

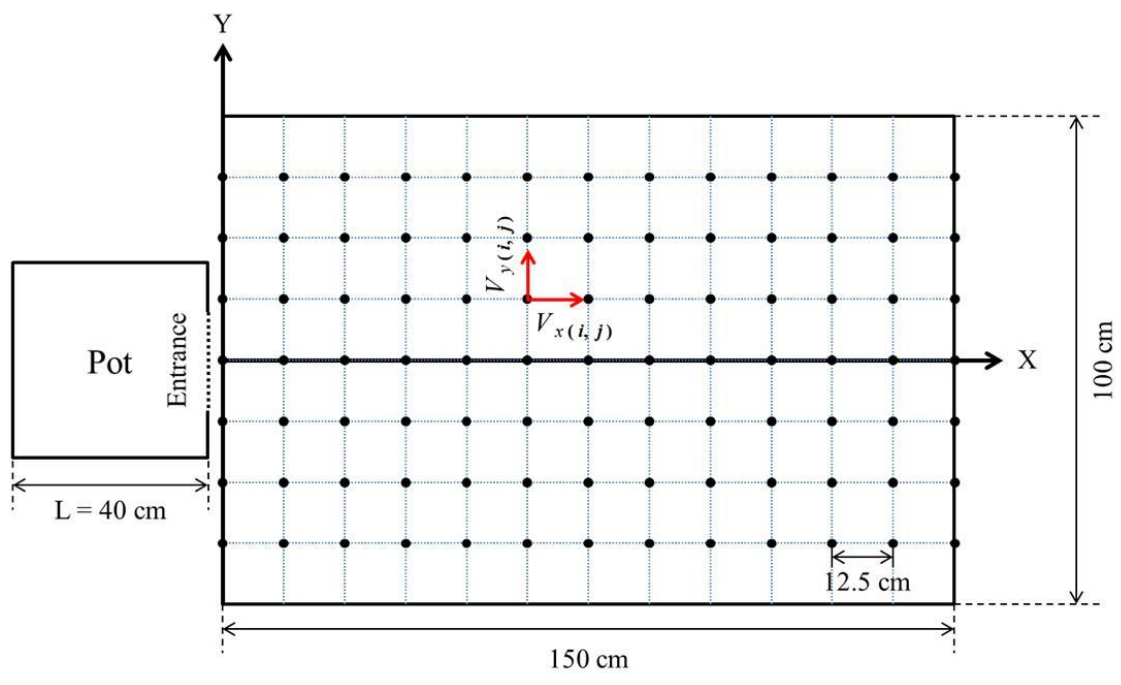


Fig.25 Schematic drawing of experimental set up for measuring flow speed.

4-2 実験結果

(1) 室内実験水槽内の流速分布

丸棒で覆った角柱型かごと円柱型かごを設置した時の流速分布を Fig.26 に示す。かごの後流域の流速分布は、何れの空隙率でもかごを中心線として左右対称で、かごの両側で最も減速した。角柱型かごの場合、空隙率が 28% の等流速線図は、X 軸方向が 0~50 cm の範囲では、かごの両側である Y 軸方向が 0~R25, 0~L25 cm の範囲で流速 V が 2.0 cm/s 未満の領域があり、かごの外側である $Y = R50 \sim R100$ cm, $L50 \sim L100$ cm の範囲では V が 1.0~7.0 cm/s となった。X 軸方向が 50~100 cm の範囲では、Y 軸方向が 0~R25, 0~L25 cm の範囲では V が 1.0~4.0 cm/s と小さく、 $Y = R50 \sim R100$ cm, $L50 \sim L100$ cm の範囲では V が 2.0~7.0 cm/s であった。X 軸方向が 100~150 cm の範囲では、Y 軸方向が 0~R25, 0~L25 cm の範囲では V が 1.0~4.0 cm/s と小さく、 $Y = R50 \sim R100$ cm, $L50 \sim L100$ cm の範囲では V が 2.0~7.0 cm/s であった。ここで、 V が 3.0 cm/s 未満の減速域は β が 28%~43% までは 150 cm/s まで見られたが、 β が大きくなると小さくなり、 β が 65% になると消失した。円柱型かごの場合、空隙率が 14% の等流速線図は、X 軸方向が 0~50 cm の範囲ではかごの両側である Y 軸方向が 0~R25, 0~L25 cm の範囲で V が 3.0 cm/s 未満と最も減速し、かごの外側である $Y = R50 \sim R100$ cm, $L50 \sim L100$ cm の範囲では V が 2.0~6.0 cm/s となった。X 軸方向が 50~100 cm の範囲では、Y 軸方向が 0~R25, 0~L25 cm の範囲で V が 2.0~4.0 cm/s と小さく、 $Y = R50 \sim R100$ cm, $L50 \sim L100$ cm の範囲では V が 3.0~6.0 cm/s であった。X 軸方向が 100~150 cm の範囲では、Y 軸方向が 0~R25, 0~L25 cm の範囲で V が 3.0~4.0 cm/s と小さく、 $Y = R50 \sim R100$ cm, $L50 \sim L100$ cm の範囲では V が 3.0~6.0

cm/s であった。V が 3.0 cm/s 未満の減速域は β が 14% の時には X 軸方向が 90 cm まで見られたが、 β が大きくなると小さくなり、 β が 70% になると消失した。

網地で覆った角柱型かごと円柱型かごを設置した時、室内実験水槽内の流速分布を Fig.27 に示す。かごの後流域の流速分布は丸棒で覆った角柱型かごと同様にかごを中心線として左右対称であり、かごの両側で最も減速した。角柱型かごの場合、V が 3.0 cm/s 未満の減速域は β が 63% の時には X 軸方向が 4 cm まで見られたが、 β が 78% 以上になると見えなくなった。円柱型かごの場合、V が 3.0 cm/s 未満の減速域は β が 62% の時には X 軸方向が 112 cm まで見られたが、 β が大きくなると小さくなり、 β が 80% 以上になると消失した。

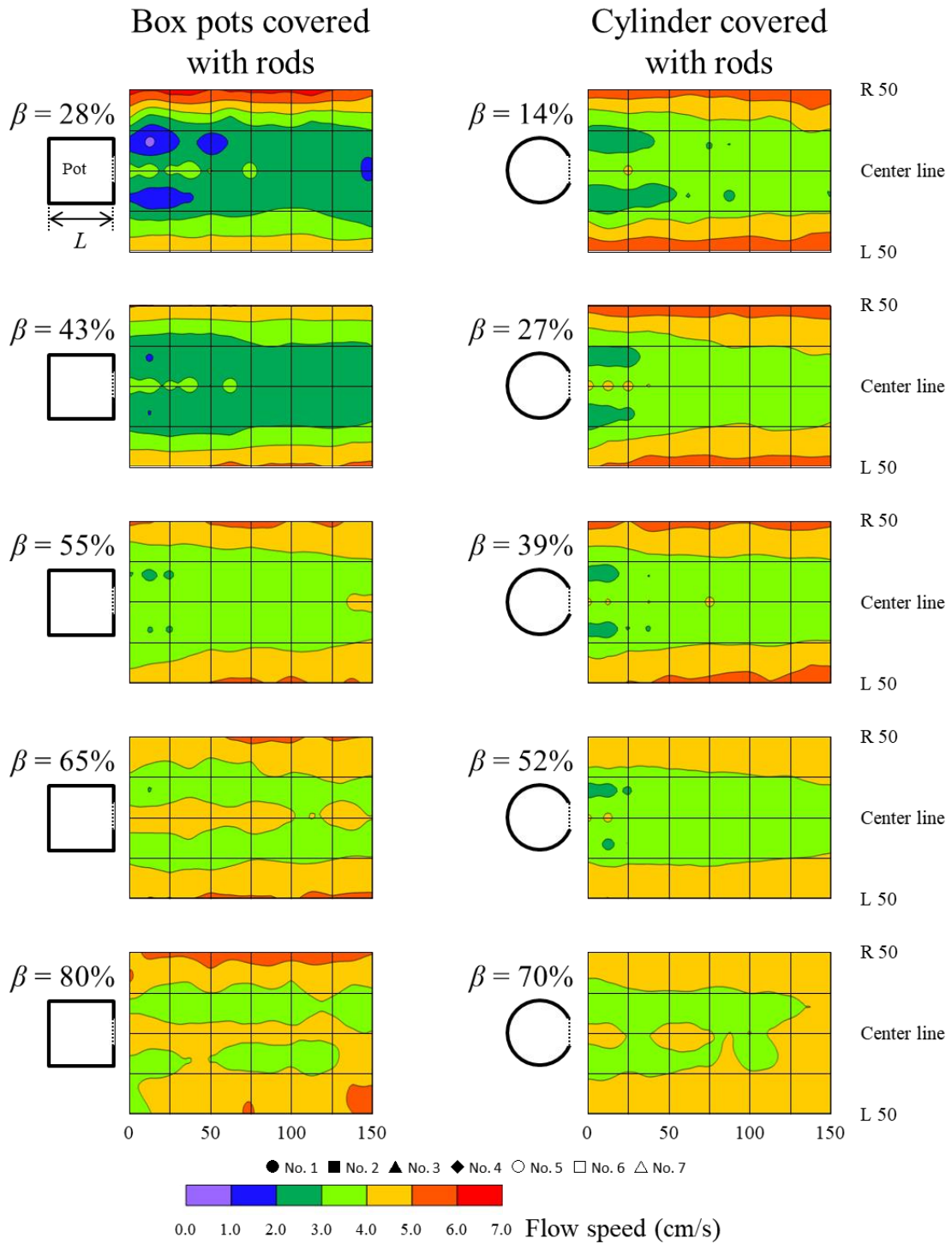


Fig.26 Distribution of flow speed in the rear area of box and cylinder pot covered with wooden rods.

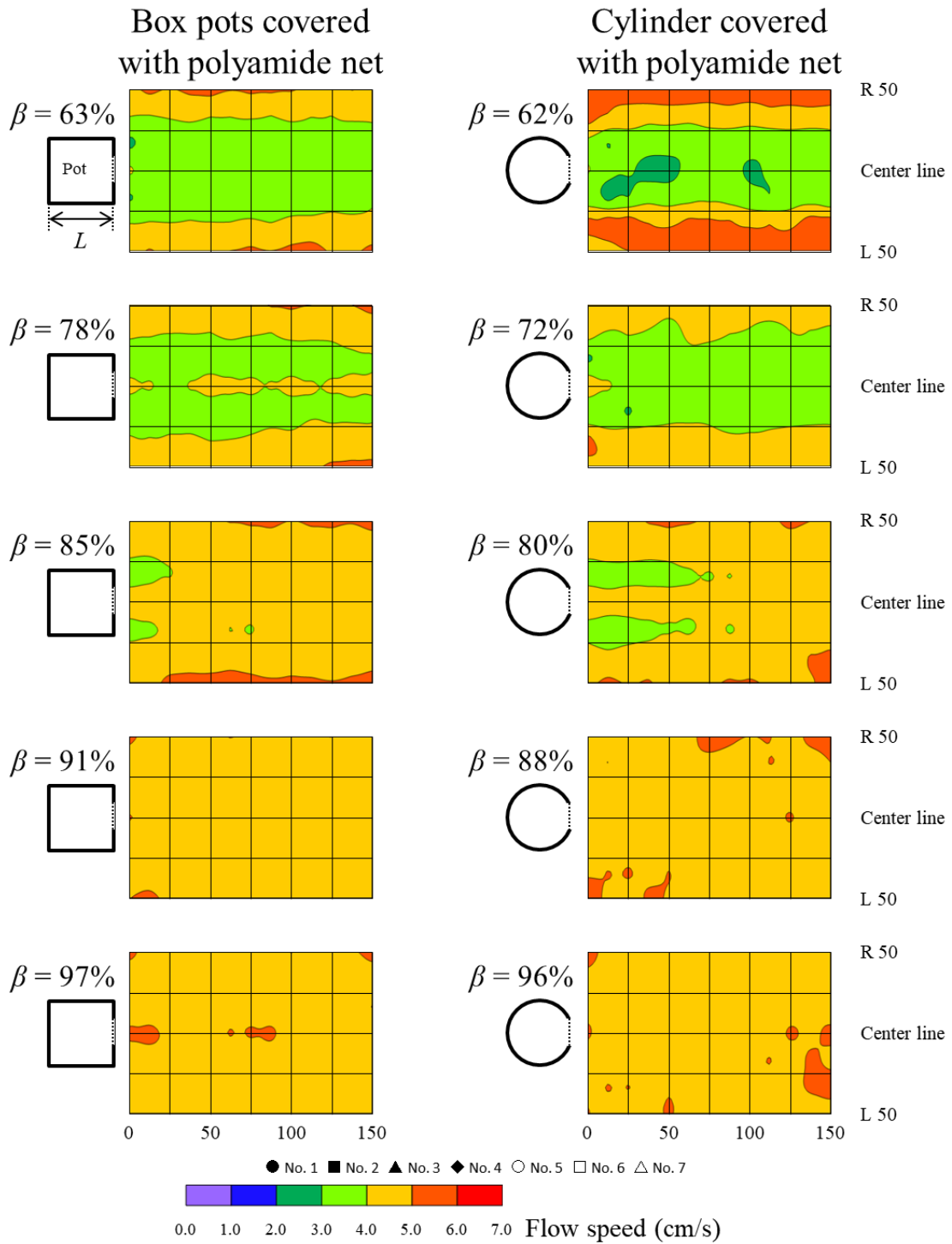


Fig.27 Distribution of flow speed in the rear area of box and cylinder pot covered with polyamide net.

(2) 明・暗条件における平常魚の行動

丸棒で覆った角柱型かごを設置した時の平常魚の遊泳軌跡を1秒間隔でプロットした図と等流速線図を重ねて Fig.28 に示した。明条件における平常魚は β が 28% では $V = 2.0 \sim 3.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳したが、かご直後である $V = 1.0 \text{ cm/s}$ 未満とかご外側である $V = 6.0 \sim 7.0 \text{ cm/s}$ の範囲では遊泳しなかった。 β が 43% では $V = 4.0 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳し、 $V = 1.0 \sim 2.0 \text{ cm/s}$ の範囲では遊泳しなかった。 β が 55% では $V = 3.0 \sim 4.0 \text{ cm/s}$ の範囲での遊泳時間が 132 秒間で全体の 70.2% を占めた。 β が 65% と 80% には、 $V = 4.0 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ の範囲で遊泳時間がそれぞれ 137 秒間と 161 秒間であった。 β が 28% では平常魚が魚止め網を取り外した直後からかごの入口後方の中央部まで遊泳し、かごの両側である $V = 2.0 \text{ cm}$ 未満の減速域で再び泳いでかごの直後で回転した後入りかごした。 β が 80% では平常魚が魚止め網を上げた直後からかごの入口直後まで遊泳した後、かご入口直後から下流側に向けて水槽の中央部まで後退して再び入口に向けて遊泳し入りかごした。一方、暗条件における平常魚は、明条件と同様に β が 28% では $V = 3.0 \sim 4.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳し、 β が大きくなると $V = 4.0 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳した。そのうち、入りかごする行動は観察されなく、水槽の壁を沿って平行に泳ぐ行動が多く見られた。

丸棒で覆った円柱型かごを設置した場合 (Fig.29), 明条件における平常魚の遊泳時間は β が 14% では $V = 3.0 \sim 4.0 \text{ cm/s}$ の範囲で 309 秒間であったが、かご直後で形成された $V = 2.0 \sim 3.0 \text{ cm/s}$ の範囲では 6 秒間であった。 β が大きくなると平常魚は $V = 3.0 \sim 4.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳し、 β が 70% では $V = 4.0 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ の範囲で 158 秒間であり、入りかごする行動は観察されなかった。一方、暗条件における平常魚は、

明条件と同様に β が 14%～39%では $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/s の範囲で多く遊泳し、 β が 52%以上になると $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で多く遊泳した。平常魚は魚止め網を取り外した直後からかごの入口後方の中央部まで遊泳しかごの外側で形成された $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で到達するとかご直後で形成された $V = 2.0 \sim 3.0$ cm/s の減速域まで遊泳した後入りかごした。

網地で覆った角柱型かごを設置した場合(Fig.30)、明条件における平常魚は β が 63%では $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/s の範囲で多く遊泳したが、かご直後で形成された $V = 2.0 \sim 3.0$ cm/s の範囲では遊泳しなかった。暗条件における平常魚は、何れの β でも $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で多く遊泳した。そのうち、平常魚が水槽の壁を沿って平行に泳ぐ行動が多く、入りかごする行動は明条件と同様に観察されなかった。

網地で覆った円柱型かごを設置した場合(Fig.31)、明条件における平常魚は β が 62%では $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/s の範囲で遊泳時間が 129 秒間であったが、 $V = 2.0 \sim 3.0$ cm/s の範囲では 10 秒間であった。 β が 72%では $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/s の範囲で 502 秒間と 75.5%を占めた。 β がそれ以上になると平常魚は $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で多く遊泳した。そのうち、入りかごする行動は観察されなかった。一方、暗条件における平常魚は、 β が 62%ではかごの外側である $V = 5.0 \sim 6.0$ cm/s の範囲で遊泳時間が 411 秒間であり、 β がそれ以上になると $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で多く遊泳し、水槽の壁を沿って泳ぐ行動が多く、入りかごしなかった。

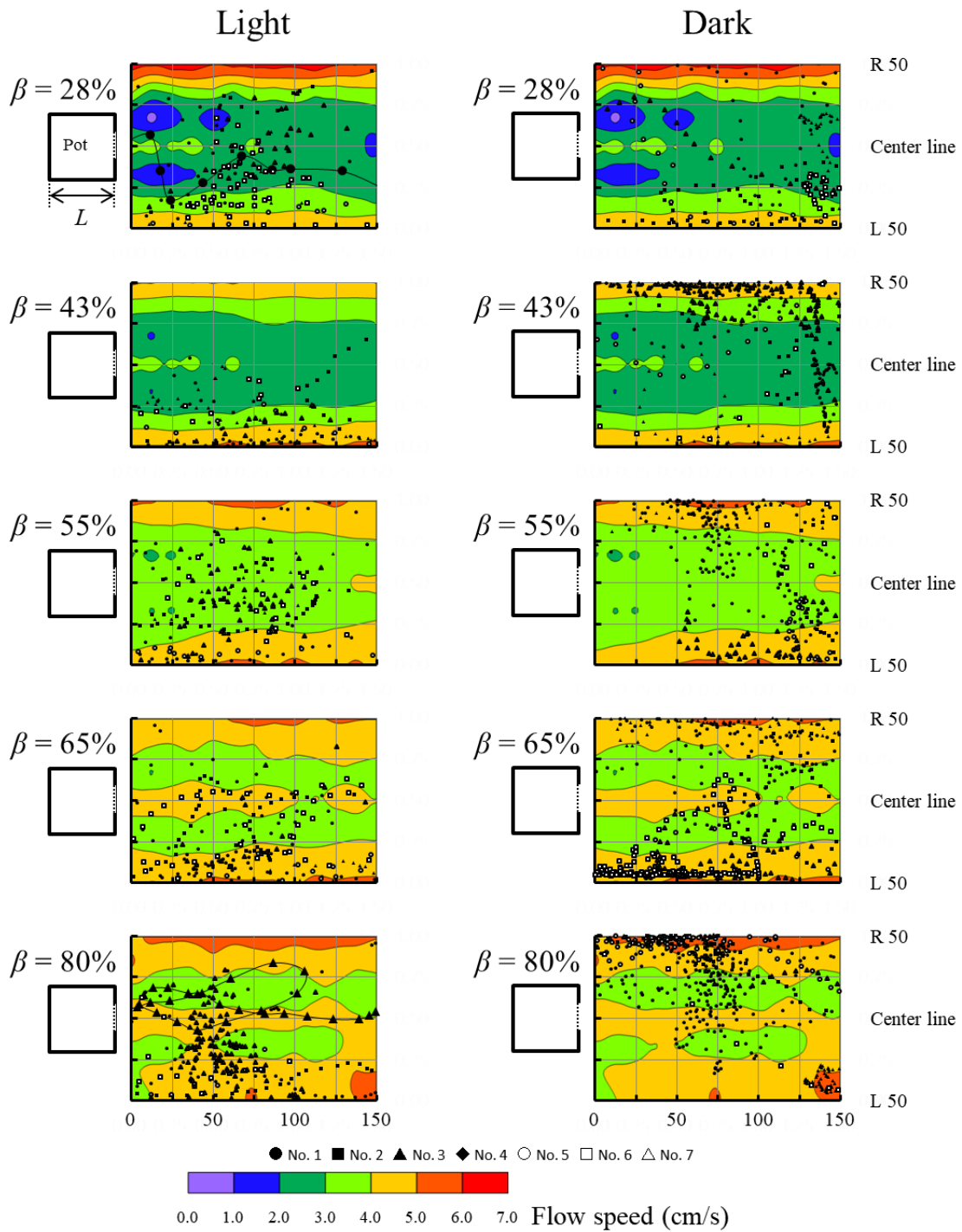


Fig.28 Tracks for swimming of fish with unblocked lateral line in the rear area of box pot covered with wooden rods under light and dark condition.

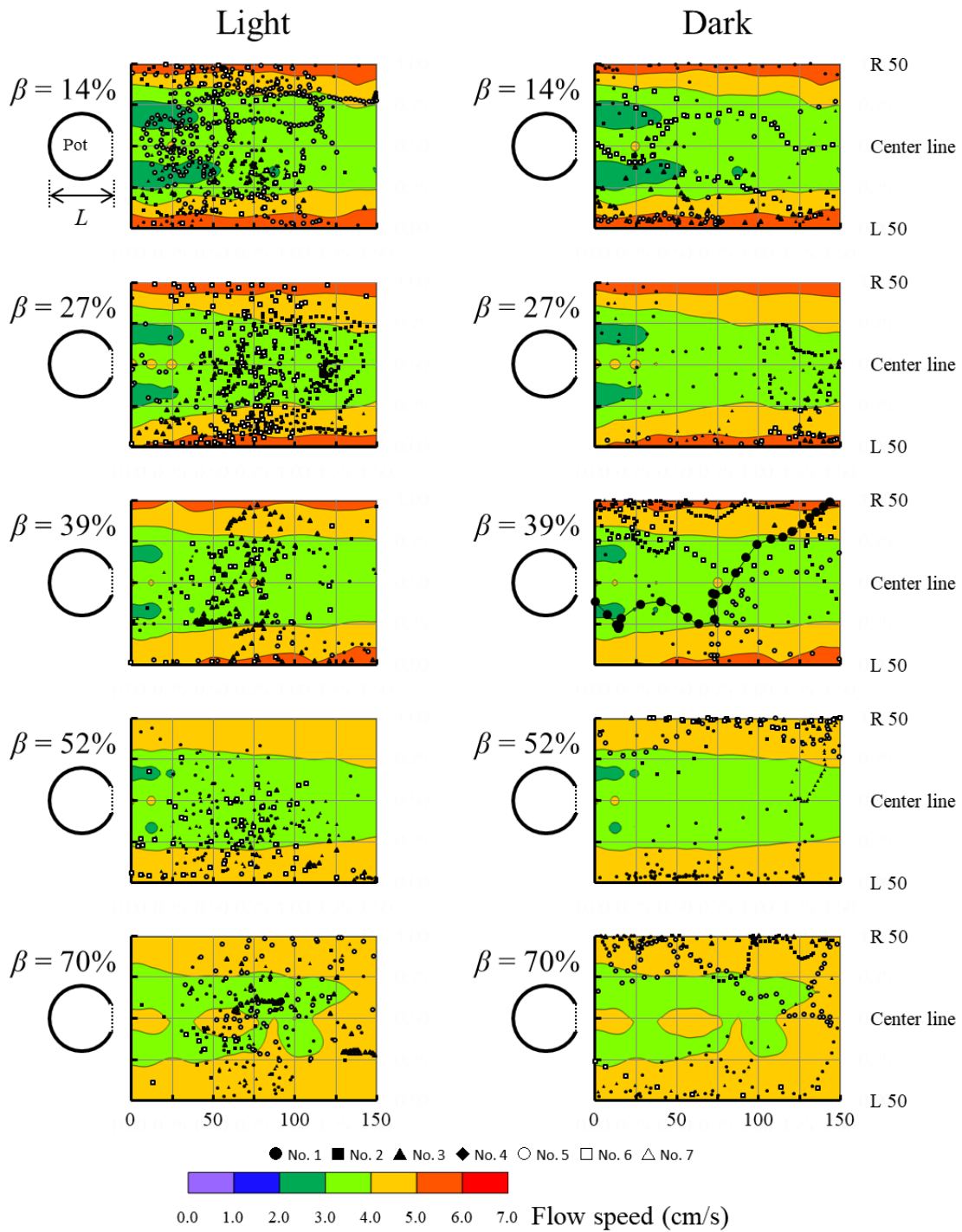


Fig.29 Tracks for swimming of fish with unblocked lateral line in the rear area of cylinder pot covered with wooden rods under light and dark condition.

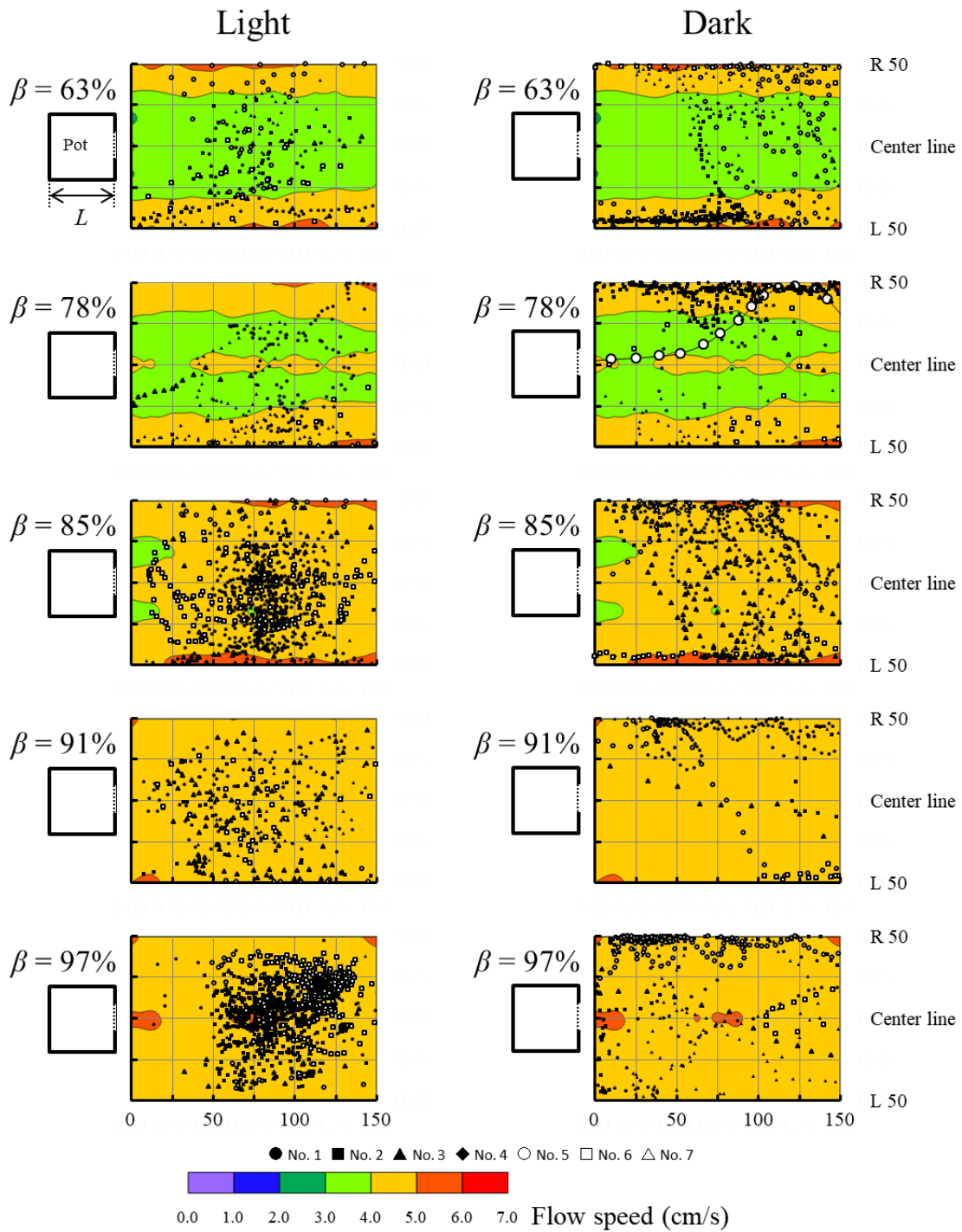


Fig.30 Tracks for swimming of fish with unblocked lateral line in the rear area of box pot covered with polyamide net under light and dark condition.

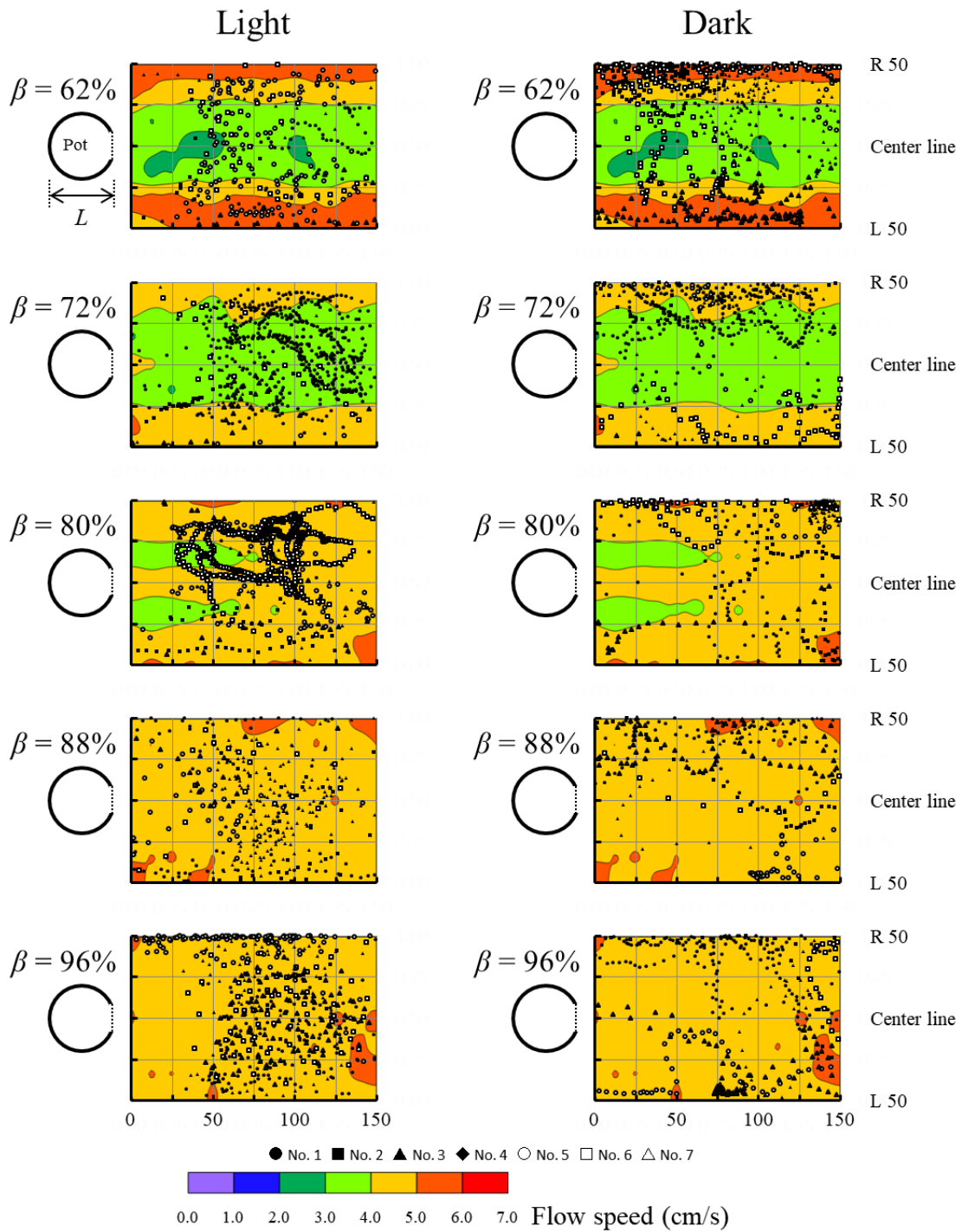


Fig.31 Tracks for swimming of fish with unblocked lateral line in the rear area of cylinder pot covered with polyamide net under light and dark condition.

(3) 明・暗条件における閉塞魚の行動

丸棒で覆った角柱型かごを設置した場合，閉塞魚の遊泳軌跡 7 を 1 秒間隔でプロットした図と等流速線図を重ねて Fig.32 に示した。明条件における平常魚は β が 28%～55%までは $V = 2.0 \sim 3.0$ cm/s の範囲で多く遊泳し， β がそれ以上になると $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で多く遊泳した。そのうち，入りかごする行動は 8 回観察された。 β が 28%では閉塞魚が下流部の右側から入口後方の中央部まで遊泳し，かご直後で形成された $V = 2.0$ cm/s 未満の減速域まで到達した後に入りかごした。 β が 55%では閉塞魚が下流部の右側からかごの入口後方の中央部まで遊泳した後かごの入口を向かって泳いで入りかごする行動と下流部の左側からかごの入口を向かって直進して入りかごする行動が観察された。

丸棒で覆った円柱型かごを設置した場合(Fig.33)，明条件における閉塞魚は β が 14%～52%では $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/s の範囲で多く遊泳し， β が 70%になると $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で多く遊泳した。そのうち，入りかごする行動は β が 39%で観察された。暗条件における閉塞魚は， β が 14%～27%では $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/s の範囲で多く遊泳し， β がそれ以上になると $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/s の範囲で多く遊泳した。そのうち，閉塞魚が水槽の壁を沿って泳ぐ行動が多く観察されたが， β が 27%と β が 70%でそれぞれ 2 回と 1 回入りかごした。 β が 27%では明条件と同様に閉塞魚が下流部の左側からかごの入口後方の中央部まで遊泳した後かごの入口を向かって泳いで入りかごした。また，閉塞魚が下流部の左側から壁を沿って中央部まで到達した後かごの直後で形成された $V = 2.0 \sim 3.0$ cm/s の領域まで遊泳してかごの入口に向かって魚体を動かして入りかごした。 β が 70%では閉塞魚が下流部の左側からかごの外側の

中央部まで遊泳した後かごの入口を向かって泳いで入りかごした。

網地で覆った角柱型かごを設置した場合(Fig.34), 明条件における閉塞魚は β が 63%~78%では $V = 3.0 \sim 4.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳し, β がそれ以上になると $V = 4.0 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳した。そのうち, 閉塞魚が入りかごしたのは 7 回であった。 β が 63%では閉塞魚が下流側の右側からかごの外側の中央部まで遊泳し, かごの両側の $V = 2.0 \sim 3.0 \text{ cm/s}$ の領域の後方まで到達して魚体を左側に動かしてかご入口の後方に泳いだ後かご入口を向かって入りかごした。 β が 78%では閉塞魚が下流側の左側から遊泳しかご入口を向かって泳いで入りかごした。 β が 85%では閉塞魚が下流側の左側から遊泳しかごの外側で形成された $V = 5.0 \sim 6.0 \text{ cm/s}$ の領域を沿って上流部まで到達した後, かごの両側で形成された $V = 3.0 \sim 4.0 \text{ cm/s}$ の領域まで遊泳して入りかごした。 β が 91%では閉塞魚が下流側の右側の壁からかごの入口を向かって左右に泳ぐ行動を繰り返しながら入りかごした。 β が 97%では閉塞魚が下流側の左側からかごの入口を向かって左右に遊泳しながら入りかごした場合とかごの入口後方の中央部で一回転した後かごの入口を向かって遊泳して入りかごした場合が見られた。また, 閉塞魚が下流部の右側からかごの外側の右側まで泳いだ後, かごの入口直後で形成された $V = 5.0 \sim 6.0 \text{ cm/s}$ の領域まで遊泳して入りかごした。一方, 暗条件における閉塞魚は, 何れの β でも $V = 4.0 \sim 5.0 \text{ cm/s}$ の範囲で多く遊泳した。そのうち, 閉塞魚が水槽の壁を沿って平行に泳ぐ行動が多く観察されたが, β が 63%と β が 78%でそれぞれ 1 回ずつ入りかごした。 β が 63%では閉塞魚が下流部の右側からかごの外側の中央部まで遊泳した後かごの入口を向かって泳いで入りかごした。 β が 78%では閉塞魚が下流部の右側から中央部である右の壁まで遊泳し壁に衝突した後に

かごの入口を向かって泳ぎ入りかごした。

網地で覆った円柱型かごを設置した場合(Fig.35), 明条件における閉塞魚は β が62%~72では $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/sの範囲で多く遊泳し, β が80%では閉塞魚が下流部の右側からかごの入口後方の中央部まで遊泳し,かごの両側で形成された $V = 3.0 \sim 4.0$ cm/sの領域まで到達した後かごの入口を向かって遊泳し入りかごした。 β が88%では閉塞魚が下流部の右側からかごの外側の上流側まで遊泳した後,かごの入口に向かかって遊泳し入りかごした。 β が96%では閉塞魚が下流部の右側からかごの入口後方の下流部まで遊泳した後,再びかごの入口を向かって遊泳して入かごした。一方,暗条件における平常魚は, β が62%ではかごの外側である $V = 5.0 \sim 6.0$ cm/sの範囲で85秒間であり, β がそれ以上になると $V = 4.0 \sim 5.0$ cm/sの範囲で多く遊泳した。閉塞魚では水槽の壁を沿って泳ぐ行動が多く,入りかごする行動は観察されなかった。

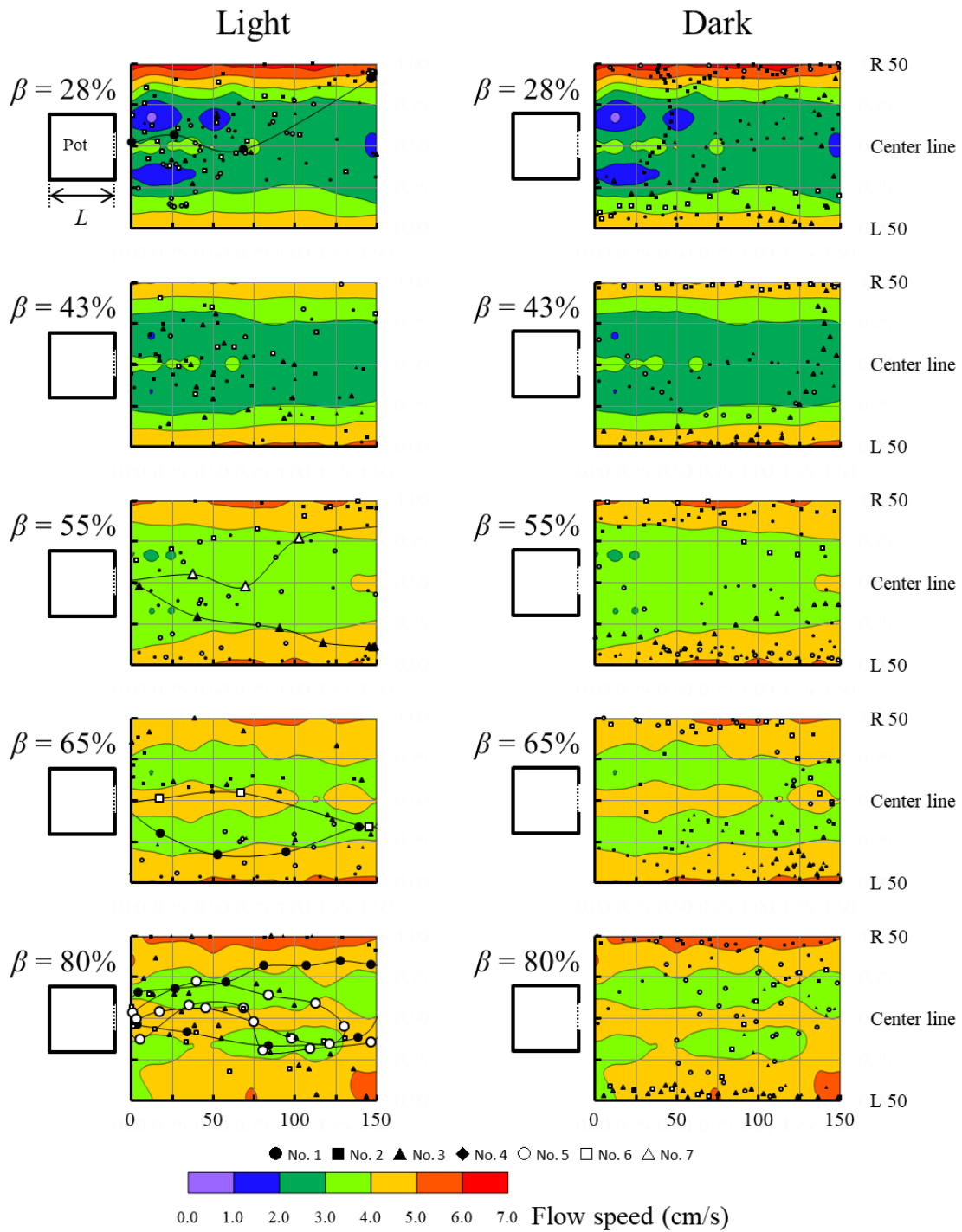


Fig.32 Tracks for swimming of fish with blocked lateral line in the rear area of box pot covered with wooden rods under light and dark condition.

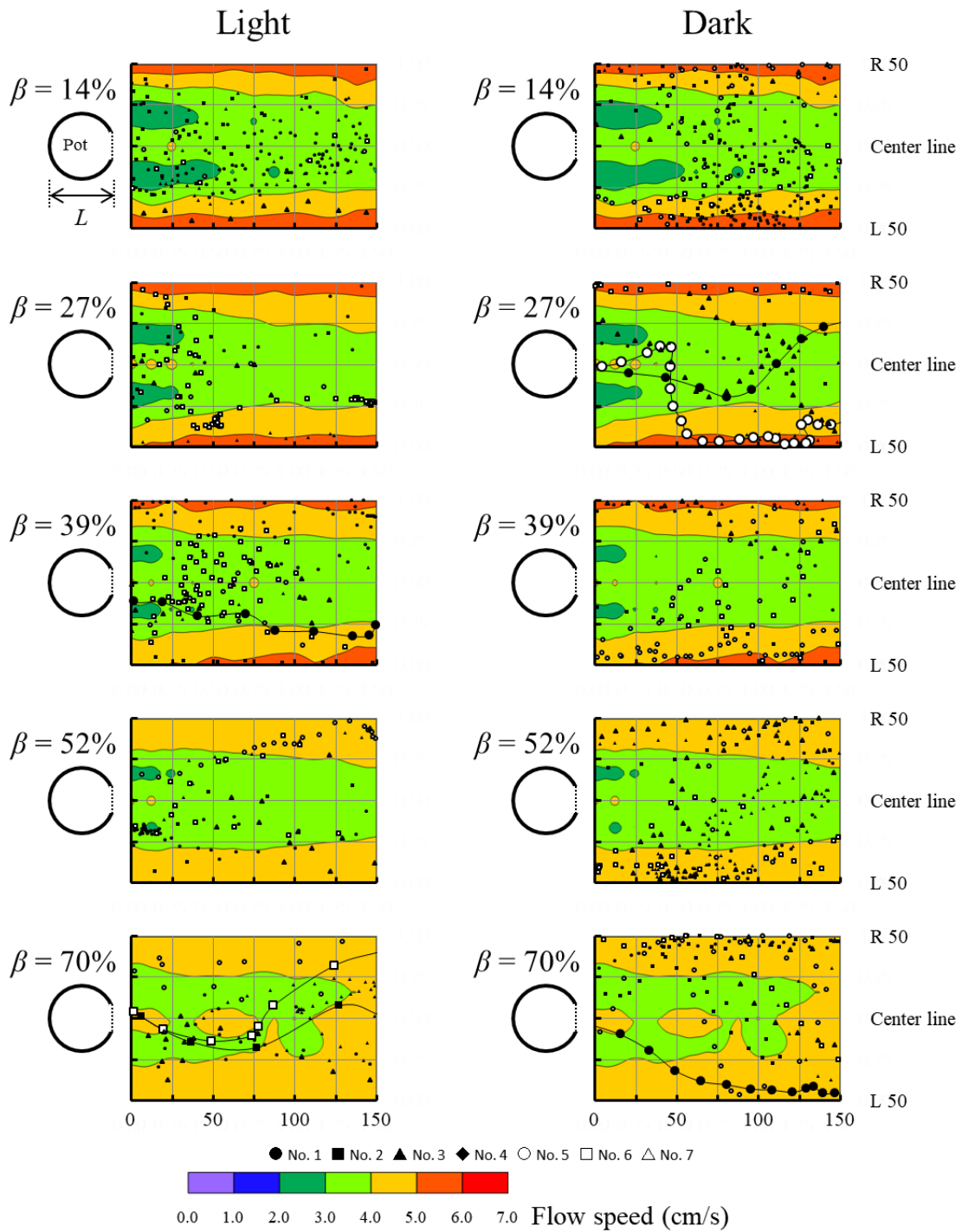


Fig.33 Tracks for swimming of fish with blocked lateral line in the rear area of cylinder pot covered with wooden rods under light and dark condition.

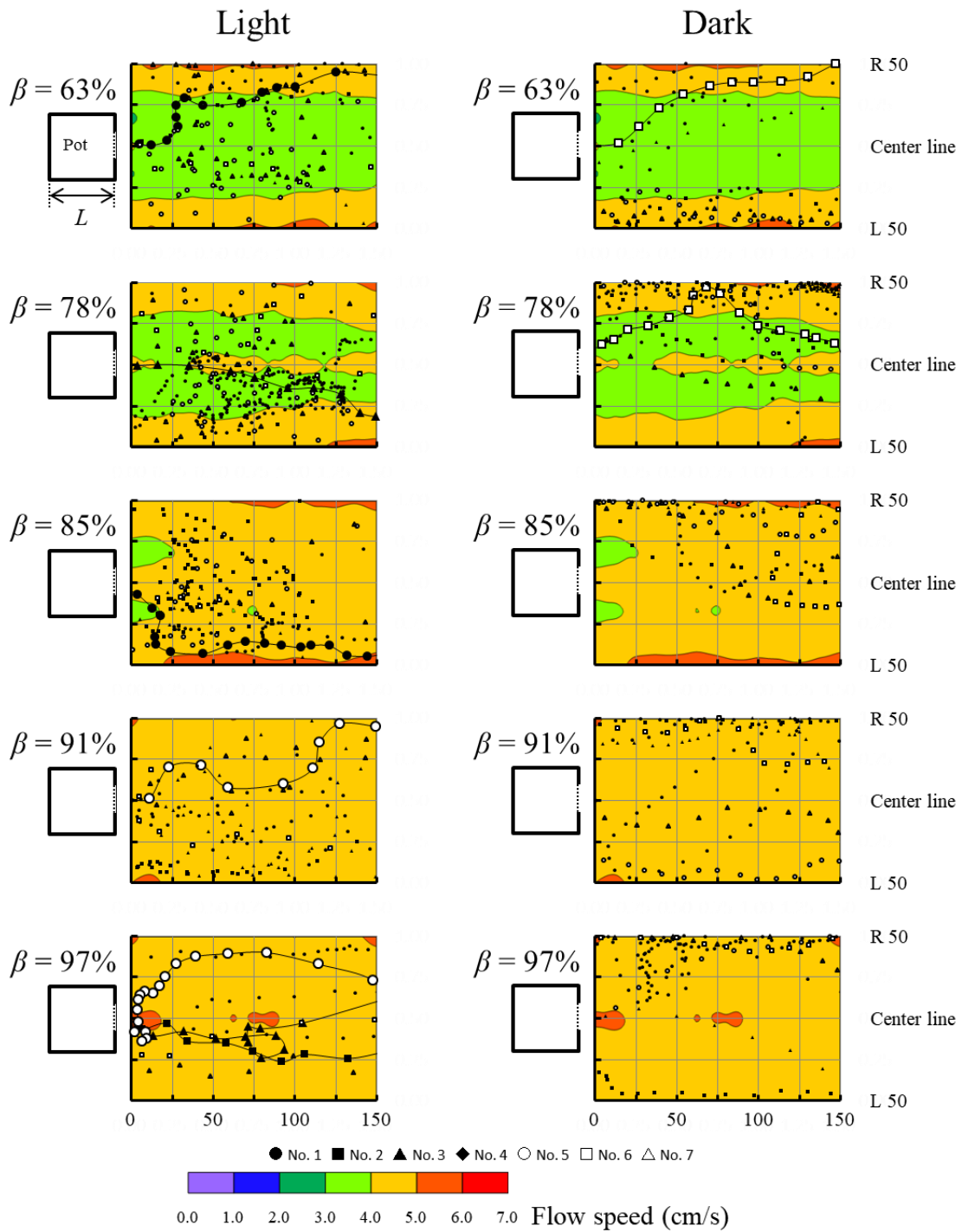


Fig.34 Tracks for swimming of fish with blocked lateral line in the rear area of box pot covered with polyamide net under light and dark condition.

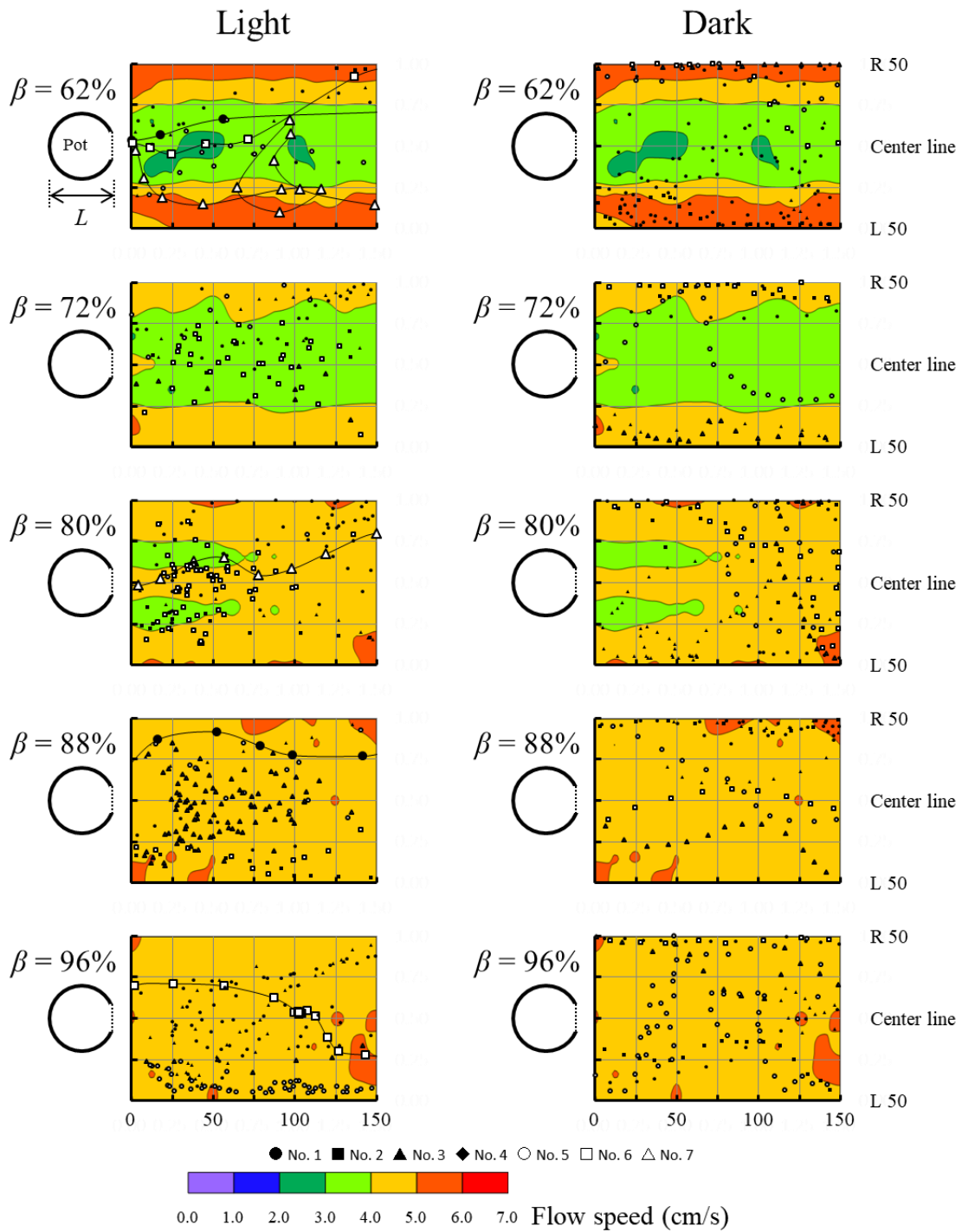


Fig.35 Tracks for swimming of fish with blocked lateral line in the rear area of cylinder pot covered with polyamide net under light and dark condition.

(4) かごからの距離に対する魚の行動

入かごした場合のかごからの距離 T と魚の遊泳時間の関係を Fig.36 に示す。平常態の場合、明条件では T が 125~150 cm の範囲で 4 秒間と最小で、かごからの距離が短くなると長くなり、 T が 0~25 cm の範囲で 11 秒間と最大値を示した。暗条件では、 T が 0~150 cm の範囲で 5~8 秒間の範囲であった。側線閉塞状態の場合、明条件では平常態の明条件と同様に T が 25~150 cm の範囲で 31 秒間で、かごからの距離が短くなると長くなり、 T が 0~25 cm の範囲で 56 秒間で最も長かった。暗条件では、 T が 125~150 cm の範囲で 17 秒間であり、かごからの距離が短くなると短くなり、 T が 0~25 cm の範囲で 8 秒間であった。

(5) 実験条件における流速毎の魚の行動の比較

入りかごした場合の遊泳時間 N に対する流速毎の遊泳時間 n の比である(12)式で求めた R_f を実験条件ごとに Fig.37 に示す。平常態の時、明条件では V が 4.0 cm/s 未満での R_f が 0.56 で、暗条件では V が 4.0 cm/s 未満での R_f が 0.68 となった。側線閉塞状態の時、明条件では V が 4.0 cm/s 未満での R_f が 0.31 で、暗条件では V が 4.0 cm/s 未満での R_f が 0.46 となった。平常態と側線閉塞状態の V が 4.0 cm/s 未満での R_f を比較すると何れの場合でも平常態の方が側線閉塞状態よりも大きかった。

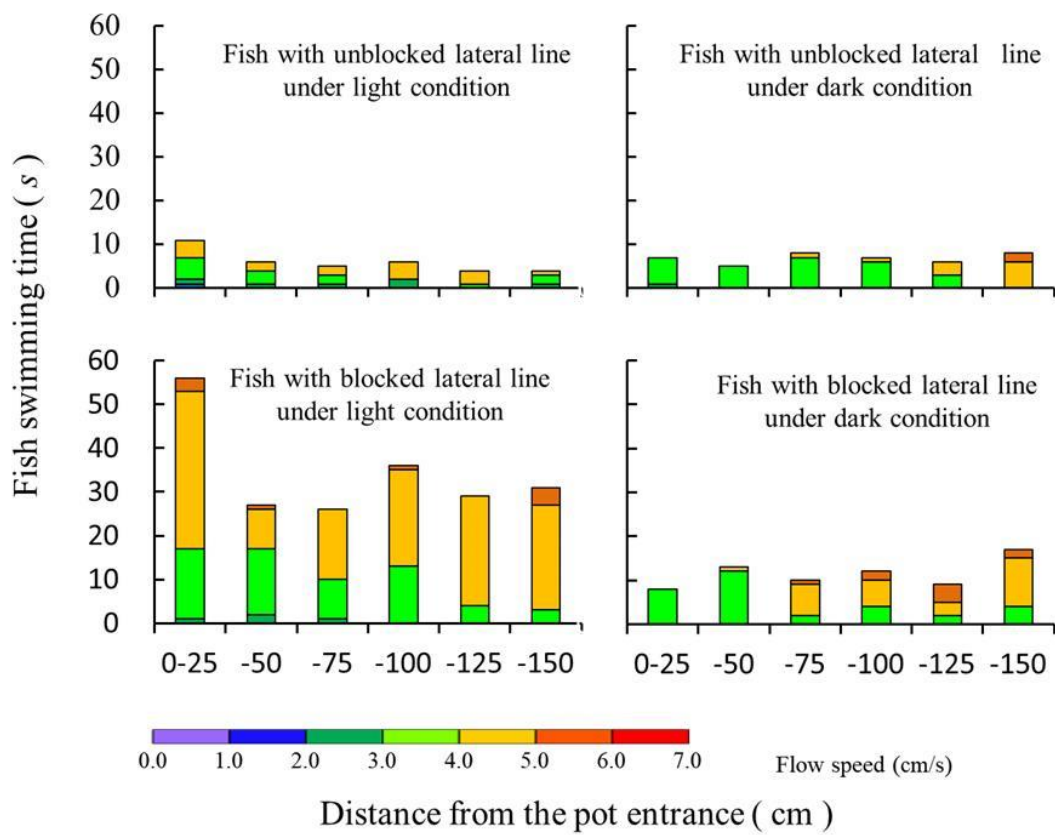


Fig.36 Comparisons between fish swimming time and the distance between pot entrance and fish.

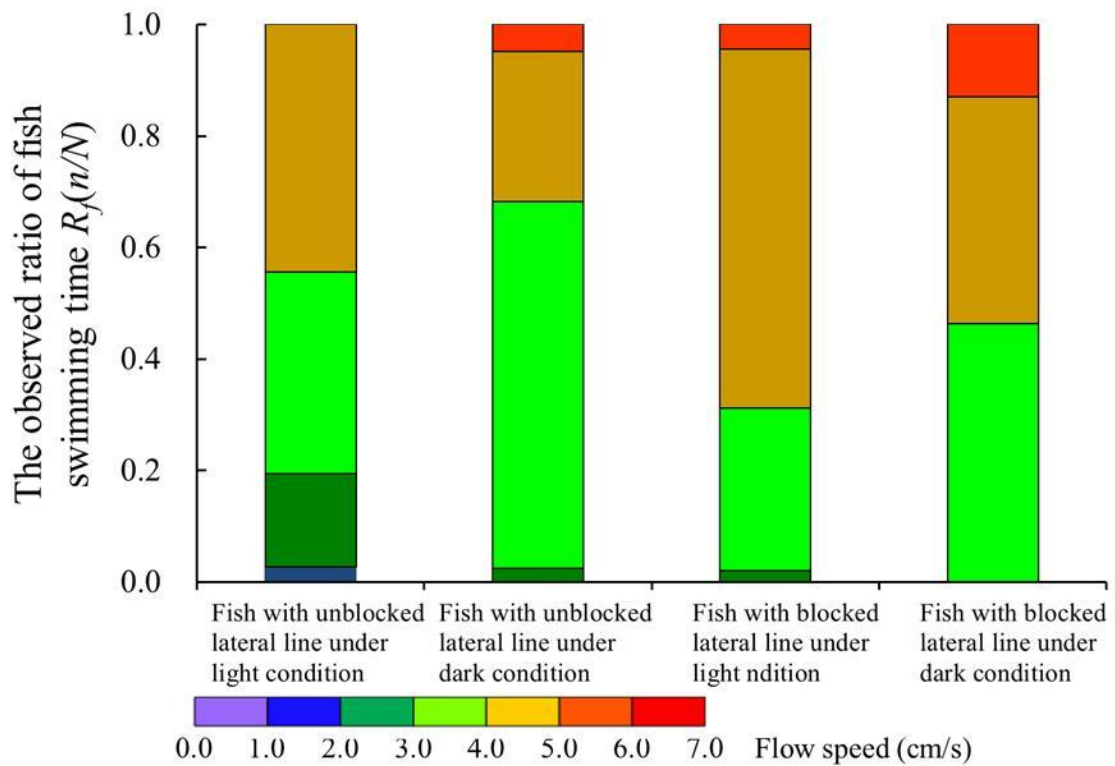


Fig.37 The observed ratio R_f of the fish staying time on each flow speed (n) to total fish staying time (N) in the rear area of box and cylinder pots covered with wooden rods and polyamide net.

4 - 3 考察

本章では、魚の視覚と側線感覚がかごの後流域の流速分布におけるオイカワの行動に与える影響を明らかにするために、室内実験水槽で明・暗条件、平常態・側線閉塞状態を組み合わせた魚の行動実験を行い、かごの後流域の流速分布と魚の遊泳時間との関係を調べた。

流れに対する魚の行動について、John⁷⁰⁾はゼブラフィッシュ *Danio rerio* の幼魚を用いて水槽実験を行い、定常流下では側線で流速の勾配を感じて流速が速い中央部まで遊泳することを明らかにした。

かごを設置した場合のオイカワの遊泳時間は β が小さいほどかごの下流側で形成された流速が 4.0 cm/s 未満の減速域で多く遊泳し、 β が大きくなるとかごの外側である流速が 4.0 cm/s 以上の範囲で多く遊泳した。

井上らの研究⁷¹⁾では、河川で棲息するカワムツ *Opsariichthys platypus*, ウグイ *Tribolodon hakonensis*, アブラハヤ *Moroco steindachneri* について群れの行動実験を行い、カワムツは他の 2 種類により走流性における視覚依存度が大きいことを明らかにした。本実験で使用したオイカワはコイ科であり、視覚の依存度が高いと考えられる。⁷¹⁾⁻⁷⁵⁾

魚類の体表には側線器官と呼ばれる機械受容器が多数存在し、流れが少ない環境では表在感丘の発達し、大洋型や流水型の活発に泳ぐ魚では管器がよく発達している。⁷³⁾Watanabe *et al.*⁷⁶⁾はカワムツ、コイ、ヨシノボリの体表に分布する表在感丘と側線孔の分布を調べ、カワムツの表在管丘数はヨシノボリとほぼ同じでコイよりも少なく、側線孔はコイとカワムツがヨシノボリより頭部と体幹部に広く分布していることを明らかにした。供試魚として使用されたオイカワでも同種であるカワムツより遊離感丘数が少ないが、^{77), 78)}頭部と体幹部に広く分布

している。Fig.37 に示したように減速域である流速が 4 cm/s 未満での R_f は平常態の明条件での R_f が大きく、暗条件での R_f が小さくなったのは、暗になると視覚的な刺激が弱くなり、水圧や水流、振動などの刺激を感じる側線感覚がより強く反応し、水の流向や流速の変化が小さいかごの外側である流速が 4.0 cm/s 以上の領域で遊泳するためである。側線を閉塞すると明条件における流速が 4 cm/s 未満での側線魚の R_f が暗条件での平常魚の R_f より大きかったのは平常態の明条件と共通するが、かごの後流域の流速分布における遊泳時間が平常態の明条件と暗条件でのと比べて少なかった。このことは、魚の側線を閉塞することによって微妙な流れの変化を感じる事が薄くなり、4 cm/s 未満での減速域に留まる行動が少なかったためだと考えられる。

魚の遊泳行動における視覚と側線の関与に関しては、Hanssan *et al.*⁷⁹⁾ は、視覚を持っていない Blind Mexican cave fish *Astyanax hubbsi* では、側線を閉塞すると魚の遊泳速度が増加している。しかし、視覚を持つ同属の *Astyanax mexicanus* では、視覚が機能している時に側線を閉塞しても魚の遊泳速度に変化は無かったが、視覚を失う時に側線を閉塞すると遊泳速度が増加することから、側線が遊泳時の速度を制御に関与することを考察している。本実験では、魚の体長 BL に対して魚の移動速度を求めると、明条件での平常魚の中央値は 1.45 BL/s で、暗条件では 0.80 BL/s であり、明条件の方が暗条件よりも 1.8 倍大きい。また、側線を閉塞すると明条件での閉塞魚は 1.60 BL/s と明条件の平常魚と比べて 1.1 倍大きく、暗条件での閉塞魚は 1.10 BL/s と平常態の暗条件より 1.4 倍大きくなり、側線閉塞状態の明・暗条件の遊泳時間が平常態の明・暗条件より少なかったのは魚の遊泳速度も影響を与えたと考えられる。

流水中の流れの変化が魚の行動に影響する研究に関しては、石川ら⁸⁰⁾がウグイの行動実験を行い、魚は魚道周辺の緩やかな流れを選びながら上流側に向かって遊泳することを報告した。また、Montgomery *et al.*の研究⁸¹⁾では、視覚目標とした円型パイプ(直径 : 2 cm)に対するニジマスの行動を調べ、円型パイプの下流側で遊泳する割合が 70%で上流側より大きかったが、側線を閉塞すると円型パイプの下流側で遊泳する割合が 25%と小さくなり、表在感丘と管感丘のどちらかを閉塞しても同じであると明らかにした。本研究でも、流速が 4.0 cm/s 未満の減速域で遊泳した時間は明条件と暗条件に関わらず側線を閉塞することによって少なくなったことは共通した。

第 5 章 総合考察

(1) かごの形状と空隙率がかごの漁獲機構に及ぼす影響

本研究ではかごの漁獲機構を明らかにするために、韓国と日本の沿岸域及び内水面で利用されているかごの種類を参考に、その形状は角柱型と円柱型が多く、かごの表面を覆う材料は丸竹またはポリアミド製やポリエチレン製の有結節網地が多かったため、形状を角柱型と円柱型の 2 種類として、それを覆う材質には木製の格子とポリアミド製有結節網地を選定した。

かごの流体抵抗実験ではかごの形状と空隙率がかごの流体抵抗に及ぼす影響や、かごの後流域の流速分布の測定実験ではかごの形状と空隙率がかごの後流域の流速分布に与える影響を明らかにし、かごの後流域の流速分布が魚の行動に及ぼす影響を調べた。そして、以下のようにかごの漁獲機構に関する基礎的な知見を得ることができた。

かごの流体抵抗を測定した結果、流水中でかごに作用する抗力は β が大きくなると減少し、 β がほぼ同じであれば円柱型よりも角柱型の方が大きくなることを明らかにした。また角柱型かごでは、迎角 θ が 45° で抗力が最も大きくなったが、円柱型かごでは、迎角が $0^\circ \sim 90^\circ$ に大きくなるにしたがって抗力が増加した。こられの原因はかごの形状の違いによって丸棒間および網地間の流れの変化が異なるためである。

かごの空隙率と抗力係数の関係は何れの場合においても β が大きくなるにつれて抗力係数 C_D が増加する傾向が見られた。また、 β が小さい時には円柱型よりも角柱型の方が C_D は大きくなり、 β が大きくなるにつれて両者の C_D の差は小さくなった。かごを設計する際には、形状を角柱型よりも円柱型として、また β は漁獲対象とする生物がかごか

ら脱出しない範囲で可能な限り大きくした方が流水中でかごが受ける抵抗が小さくなり、安定的に設置することができると考えられた。

26),28),29)

かごの後流域の流速分布は、何れの形状でもかごを中心として左右対称でかごの両側で最も減速した。角柱型かごでは β が 80%未満までは設定流速より小さな $R_v = 0.6$ 以下の減速域が現れること、円柱型かごでは β が 80%以上になると $R_v = 0.6$ 以下の減速域が消失することを明らかにした。これらの理由は、 β が小さい時にかごの側面を沿った流れが形成され、かごの後流域では R_v が小さくなるが、 β が大きくなると流れがかごの内部を通過するためかごの後流域では R_v が大きくなったと考えられた。⁶²⁾

かごの後流域における魚の行動では、 β が小さいほどかごの下流側で形成された流速が 4.0 cm/s 未満の減速域で多く遊泳し、 β が大きくなるとかごの外側である流速が 4.0 cm/s 以上の領域で多く遊泳した。明条件における平常魚の遊泳時間はかごを設置することでかごからの距離が 100 cm 以下の範囲で一定な距離を持ち多く遊泳し、暗くすると視覚目標であるかごを認識しにくくため、流速分布の違いによって魚の遊泳時間が異なった。側線を閉塞すると一定な距離を持って遊泳位置を維持することができなくなるため、明条件と暗条件の平常魚よりも遊泳時間が短くなった。これらの理由は、魚は流水中に設置したかごを視覚で認識しながら一定な距離を持ち遊泳し、かごの後流域の流れの変化を側線でより強く感じながら流速が 4.0~5.0 cm/s の範囲で多く遊泳すると考えられた。すなわち、かごの後流域の流速分布における魚の行動は一つの感覚ではなく、魚の視覚と側線が共にかごの入口への接近行動に影響を与えたと考えられた。

(2) かがの最適設計および最適な操業方法

かが漁業において漁獲対象種をかがの入口まで誘導するには、かがの後流域に減速域を形成することによって、対象種がかがに接近しやすい環境をつくる必要がある。そのため、かがの後流域の流速分布は、かがの入口につながる細長い減速域があり、その両側では最も減速する領域が存在するのが有効であると考えられる。すなわち、かがの入口前方部とその両側との間に流速差が非常に大きい流速分布が形成され、魚の視覚と側線感覚を大きく刺激する状態である。ここで、かがの漁獲過程を考えると広い範囲から何れかの刺激を感じてかが後方まで達する魚は、かがの構造や流れの変化などの視覚的刺激や機械的刺激を感じて、かがの入口に接近すると考えられる。かがの入口前方部では側面の空隙と入口との視覚の勾配によって魚が視覚刺激をより強く受けてかがの入口まで誘導される。さらにかごの両側ではかがの入口前方部より最も減速した領域が形成され、流速の勾配によって魚が機械的刺激をより強く受け、魚がかがの外側へ向かう行動を抑制し、かがの入口へ接近する行動を促進することで漁獲されることが考えられる。

かがの設計においては、かがを海底に安定的に設置することや、かがの後流域に減速域を形成することで、魚をかがの入口まで誘導することが求められる。すなわち、かがの形状を円柱型で、 β が 70%未満で設計した方が、漁獲対象種の視覚と側線を大きく刺激することができ、そのことによって、対象種をかがの入口まで誘導しやすくなり、かがの漁獲効率を高めることができると考えられる。⁸²⁾⁻⁸⁴⁾

かがを設置する時には、かがの入口を下流方向に向けるようにすることで、かがの入口前方部とその両側との流速差が大きくなり、また、

かごが受ける流体抵抗も小さくなり，海底に安定的に設置することができる。

謝辞

本研究を行うにあたり，最後の審査が終わるまでご助言とご指導を賜りました鹿児島大学水産学部教授西 隆一郎博士に深甚なる感謝の意を表します。本論文を完成するために最後までご助言とご指導を賜りました鹿児島大学水産学部准教授江幡 恵吾博士に深甚なる感謝の意を表します。投稿論文の英文修正や鹿児島で生活にご助言とご指導を賜りました鹿児島大学水産学部教授バスケス A. ミゲル(VAZQUEZ ARCHDALE, Miguel Federico)博士に深甚なる感謝の意を表します。審査が終わるまでご助言とご指導を賜りました鹿児島大学水産学部教授重廣 律男博士に深甚なる感謝の意を表します。審査が終わるまでご助言とご指導を賜りました鹿児島大学水産学部教授地頭 隆博士に深甚なる感謝の意を表します。2015年3月に退官されたが終始一貫してご助言とご指導を賜りました鹿児島大学水産学部教授不破 茂博士に深甚なる感謝の意を表します。2016年3月に退官されたが国際関係や他国の水産業についてご助言を賜りました鹿児島大学水産学部教授松岡達郎博士に深甚なる感謝の意を表します。魚の行動実験でのご助言を賜りました鹿児島大学水産学部准教授安樂 和彦博士に深甚なる感謝の意を表します。海外研修や現場調査にご助言を賜りました鹿児島大学水産学部准教授石崎 宗周博士に深甚なる感謝の意を表します。なお、適切にご助言を頂いた韓国の済州大学教授金 碩鍾博士に深甚なる感謝の意を表します。また，大型回流水槽での流体抵抗実験や流速分布実験、簡易水槽を使用した魚の行動実験にご協力を頂いた鹿児島大学水産学部丸儀雅孝技術職員および長野章一技術職員に深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金田禎之. 「日本漁具・漁法図説」成山堂, 東京. 1977 ; 567-591.
- 2) 谷川英一, 田村 正, 金森政治, 新川伝助. 「新編水産学通論」恒星社厚生閣, 東京. 1977 ; 185-189.
- 3) 竹内正一 (かご漁業の漁労法). 「かご漁業」(日本水産学会編) 恒星社厚生閣, 東京. 1981 ; 22-36.
- 4) 海洋水産部(江原道). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 93-134.
- 5) 海洋水産部 (慶尚南道). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 128-171.
- 6) 海洋水産部(京畿道). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 88-125.
- 7) 海洋水産部 (全羅北道). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 121-150.
- 8) 海洋水産部 (慶尚北道). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 121-150.
- 9) 海洋水産部 (慶尚南道). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 128-171.
- 10) 海洋水産部 (釜山). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 131-201.
- 11) 海洋水産部 (忠清南道). 「沿近海漁業総調査報告書」国立科学研究院, 釜山. 2005 ; 108-161.
- 12) 小池 篤 (かごの漁具構造と漁獲). 「かご漁業」(日本水産学会編) 恒星社厚生閣, 東京. 1981 ; 51-65.

- 13) Youm MG. The improved artificial trap baits. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*. 1998 ; 34 : 185-190.
- 14) 不破 茂, 川野和昭, 杉本裕司, 石崎宗周, 今井健彦. かご漁具の形状と漁獲機構. 鹿児島大学水産学部紀要 1997 ; 46 : 21-30.
- 15) Vazquez Archdale M, Anraku K, Yamamoto T, Higashitani N. Behavior of the Japanese rock crab 'Ishigani' *Charybdis japonica* towards two collapsible baited pots: Evaluation of capture effectiveness. *Fisheries Science* 2003 ; 69 : 785-791.
- 16) 杉本裕司, 不破 茂, 石崎宗周, 今井健彦. 魚かごの形状と漁獲性能. 日水誌 1996 ; 62 : 51-56.
- 17) 不破 茂, 霜村佳孝, 石崎宗周, 今井健彦. フグ籠網の漁獲機構に関する二, 三の知見. 日水誌 1994 ; 60 : 455-460.
- 18) 不破 茂, 石崎宗周, 迫 和隆, 今井 健彦. フグかごの漁獲モデルについて. 日水誌 1995 ; 61 : 356-362.
- 19) 不破 茂, 石崎宗周, 山口健介, 今井健彦. フグかごの体長選択性. 日水誌 1996 ; 62 : 727-732.
- 20) 不破 茂, 大石卓哉, 石崎宗周, 今井健彦. かごに対するサバフグ類の行動の水中観察. 日水誌 1998 ; 64 : 171-177.
- 21) 平山 完, 不破 茂, 石崎宗周, 今井健彦. フグかご入口におけるサバフグ類の行動と漁獲機構. 日水誌 1999 ; 65 : 419-426.
- 22) 平山 完, 不破 茂, 石崎宗周. かご入口内でのフグの遊泳行動に基づくフグかごの漁獲モデル. 日水誌 2000 ; 66 : 207-211.
- 23) Sinoda M and Kobayasi T. Studies on the fishery of Zuwai Crab in the Japan Sea-4. Efficiency of the Toyama Kago (a kind of Crab Trap) in capturing the Beni-zuwai crab. *Nippon suisan gakkaiishi* 1969 ; 35 :

948-956.

- 24) 渡部俊広, 山崎慎太郎. ベニズワイガニ籠漁業における漁具の浸漬時間と漁獲. 日水誌 1999 ; 65 : 642-649.
- 25) Boutiller JA and Sloan NA. Effect of trap design and soak time on catches of the British Columbia prawn (*Penadalus platceros*). *Fisheries Reserch*. 1987 ; 6 : 69-79.
- 26) Yamane T and Iitaka T. Relation between ingress, escape and height of pot entrance. *Nippon suisan gakkaiishi* 1987 ; 53 : 2145-2150.
- 27) 金 成勲, 平石智徳, 山本勝太郎, 李 珠熙. トヤマエビかごにおけるエビの歩行特性と入かご過程に関する研究. 水産工学 2008 ; 45 : 25-33.
- 28) 山口恭弘, 西ノ首英之, 山根 猛. 島原湾コウイカかご漁場の流動環境と漁獲の関係について. 日水誌 2001 ; 67 : 438-443.
- 29) Budiman J, Fuwa S, Ebata K. Fundamental studies on the hydrodynamic resistance of small pot traps. *Fisheries Science* 2004 ; 70 : 952-959.
- 30) Fuwa S, Ishizaki M, Kawano K. Fluid dynamic resistance and flow distribution about a heart-shaped bamboo trap. In : Arimoto T, Haluan J (eds). *Proceedings of the 3rd JSPS International Seminar Sustainable Fishing Technology in Asia Towards the 21st Century*. TUF-JSPS International project. Tokyo University of Fisheries, Tokyo 2000 ; 8 : 130-135.
- 31) Budiman J, Fuwa S, Ebata K and Vazquez Archdale M : Fundamental studies on the flow speed distribution around small traps. *Fisheries Science*, 71 : 1264-1273, 2005.
- 32) Li Y, Yamamoto K, Hirashi T, Nashimoto K. Stability of fish traps for

- catching arabesque greening used in Matsumae, Hokkaido. *Fisheries Engineering* 2003 ; 39 : 219-225.
- 33) 金 成勲, 平石智徳, 山本勝太郎, 李 珠熙. 北海道で使用されている 3 種のエビ籠の海底での安定性. *日水誌* 2008 ; 74 : 1030-1036.
- 34) 今井健彦. 無結節網地の投影面積. *日水誌* 1984 ; 50 : 1817-1822.
- 35) 今井健彦. 蛙又結節網地の投影面積. *日水誌* 1984 ; 50 : 1823-1828.
- 36) 今井健彦. 平面網地の流体抵抗に関する基礎的研究-3, 網地模型の流水抵抗特性. *鹿児島大学水産学部紀要* 1978 ; 21 : 131-137.
- 37) 今井健彦. 平面網地の流体抵抗に関する基礎的研究-4, 有結節網地と無結節網地の流水抵抗特性について. *日水誌* 1979 ; 45 : 1277-1282.
- 38) 今井健彦. 平面網地の流体抵抗に関する基礎的研究. *鹿児島大学水産学部紀要* 1986 ; 35 : 165-253.
- 39) 今井健彦, 中村 毅. 蛙又網地の抗力係数におよぼすレイノルズ数の影響. *日水誌* 1989 ; 55 : 1753-1757.
- 40) Furevik DM and Løkkeborg S. Fishing trials in Norway for torsk (*Brosme brosme*) and cod (*Gadus morhua*) using baited commercial pots. *Fisheries Reserch*. 1994 ; 9 : 219-229.
- 41) 井上 実. 「魚の行動と漁法」恒星社厚生閣, 東京. 1978 ; 148-174.
- 42) Montgomery JC, Baker CF and Carton AG. The lateral line can mediate rheotaxis in fish. *Nature* 1997 ; 389 : 960-963.
- 43) Kim DA and Ko KS. Fishing mechanism of pots and their modification.2. Behavior of crab, *Charybdis japonica*, to net pots. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*. 1987 ; 20 : 348-354.
- 44) Kim DA and Ko KS. Fishing mechanism of pots and their modification.4. An experiment for modifying the pot for crab, *Charybdis japonica*.

- Bulletin of the Korean Fisheries Society*. 1990 ; 23 : 310-314.
- 45) Kim DA and Ko KS. Fishing mechanism of pots and their modification.5.
An experiment for modifying the pot for conger eel, *Astroconger myriaster*. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*. 1990 ; 23 : 315-322.
- 46) Jang DJ, Kim DA and Ko KS. Modification of fishing baskets for crab, *Charybdis japonica*. *Bulletin of the Korean Fisheries Society*. 1997 ; 33 : 90-96.
- 47) Lee JH, Kwon BG, Lee CW, Kim HS, Jeong SB, Cho YB, Yoo JB, Kim SH and Kim BY. Improvement of gill net and trap net fishing for the resource management in the southern sea of Korea. Mesh selectivity of spring frame trap for conger eel, *Conger myriaster*. *Bulletin of the Korean Society of Fisheries Technology*. 2005 ; 41 : 27-34.
- 48) An YI and Park JY. Octopus fisheries in the coastal waters of Gangneung-1 Pot fishery. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology* 2005 ; 41 : 271-278.
- 49) Chang HY, Koo JG, Lee KW and Cho BK. Attracting effect of baits used in trap for swimming crab. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology* 2007 ; 43 : 301-309.
- 50) Shin JK, Cha BJ, Park HH, Hho SK, Kim HY, Jeong EC, Kim YH and Kim BY. Comparison of fishing efficiency on octopus traps to reduce bycatch in the East Sea. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology* 2008 ; 44 : 1-9.
- 51) Bae BS, An HC, Park SW, Park HH and Chun YY. Catch characteristics of shrimp trap by submerged time. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology* 2009 ; 45 : 201-210.

- 52) Bae BS, An HC, Jeong EC, Park HH, Park SW and Park CD. Fishing power estimation of biodegradable traps in the East Sea. *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology* 2010 ; 46 : 292-301.
- 53) 国立水産科学院ホームページ : <http://portal.nfrdi.re.kr/>.
- 54) 松田 皎編著.「漁具物理学」,成山堂書店,東京. 2001;24-25.
- 55) 熊沢泰生, 胡 夫祥, 木下弘実, 東海 正. ダイニーマ綆網の流体力特性. 日水誌 2012 ; 78 : 180-188.
- 56) 熊沢泰生, 久津輪修一, 石崎宗周, 不破 茂, 今井健彦. 二子撚り式無結節網地の抗力係数とレイノルズ数. 日水誌 1994;60:167-171.
- 57) Aenea. J. Reid : A Net Drag Formula for Pelagic Nets. *Scottish Fisheries Research Report* 1977 ; 7 : 1-12.
- 58) 大坂英雄, 山田英巳, 羽野茂浩, 影山芳郎. 平織り金網を通過する流れとその抵抗特性. 日本機械学会論文集(B編)1986;52:312-317.
- 59) 姜 京範, 不破 茂, 江幡恵吾, バスケス A. ミゲル, 金 碩鍾. かごの形状と空隙率がかごの後流域の流速分布に及ぼす影響. 水産工学 2015; 51:185-192.
- 60) 小山武夫. トロール網の抵抗について. 日水誌 1967 ; 33 : 74-88.
- 61) 熊沢泰生, 胡 夫祥, 渡部俊広, 木下弘実, 東海正. カイト式表中層トロール網の開発. 水産工学 2010;46:197-204
- 62) 今井健彦, 石崎宗周, 不破 茂, 久津輪修一, 金 碩鍾, 洪 性完. 網地剛体近傍の流速分布. 鹿児島大学水産学部紀要 1994 ; 43 : 1-9.
- 63) 広瀬幸治. 「流れ学」共立出版, 東京. 1976 ; 93-122.
- 64) 日本機械学会. 「流れ」丸善株式会社, 東京. 1984 ; 2-48.
- 65) 岡本史紀. 「流体力学」森北出版, 東京. 1995 ; 162-187.
- 66) 石線良三. 「流体力学入門」森北出版, 東京. 2000 ; 109-126.

- 67) 佐藤恵一，木村繁男，上野久儀，増山 豊．「流れ学」朝倉書店，東京．2004；129-164.
- 68) Montgomery JC, Baker CF and Carton AG. The lateral line can mediate rheotaxis in fish. *Nature* 1997；389：960-963.
- 69) Karlsen HE and Sand O. Selective and reversible blocking of the lateral line in freshwater fish. *Journal of Experimental Biology* 1987；113：249-262.
- 70) John O. Dabiri. How fish feel the flow. *Nature* 2017；547：406-407.
- 71) 井上 実，有元貴文，河野一郎．回流水槽におけるカワムツ群の分散度と水質．日水誌 1979；45(12)：1485-1490.
- 72) Wald G. The significance of vertebrate metamorphosis. *Science* 1958；128：1481-1490.
- 73) 川本信之．「魚類生理」恒星社厚生閣，東京．1977；451-534.
- 74) 井上 実，黒岩広次．魚の視覚運動反応における相称刺激の効果．日水誌 1983；41(12)：1219-1227.
- 75) 井上 実，任 為公，有元貴文．河川魚類の明・暗環境における向流行動．日水誌 1982；48(12)：1697-1701.
- 76) Watanabe K, Anraku K, Monteclaro HM and Babaran RP. Morphological characteristics of lateral line in three species of fish. *Aquaculture Science* 2010；58(1)：25-35.
- 77) 川村軍蔵，向井幸則，太田開之．アユ，オイカワ仔魚の眼と遊離感丘の形態および流水中の行動．日水誌 1983；49(10)：1527-1532.
- 78) Mukai Y and Kobayashi H. Development of free neuromasts in larvae of cyprinid fish. *Memoirs of the Faculty of Agriculture of Kinki University* 1994；27：1-14.

- 79) Hassan ES, Abdel-Latif H and Biebricher R. Studies on the effects of Ca^{++} and Co^{++} on the swimming behavior of the blind Mexican cave fish. *Journal of Comparative Physiology A* 1992 ; 171 : 413-419.
- 80) 石川雅朗, 白井淳治, 胡 夫祥, 東海 正. バーチカルスロット型実験魚道におけるウグイ魚群の遡上経路と行動. 水産工学 2006 ; 43(1) : 9-20.
- 81) Montgomery JC, McDonald F, Baker CF, Carton AG and Ling N. Sensory integration in the hydrodynamic world of rainbow trout. *Proceedings of Royal Society of London B* 2003 ; 270 : 195-197.
- 82) 原 俊昭. 「魚類生理 (嗅覚)」川本信之編, 恒星社厚生閣, 東京. 1970 ; 428-450.
- 83) 小林 博, 石田義成, 白澤定志. エビ殻浸出液のマダイの嗅覚に対する刺激効果. 水産養殖 1998 ; 46 : 269-272.
- 84) 川村軍蔵, 田村松之助. 魚籠の魚種選択性. 日水誌 1990;56:917-921.