

流れ場における半球型底設魚礁の水理特性に関する研究

The Study on Hydraulic Properties of Submerged Hemispheric Artificial Reef in a Flow

湊 康裕*
Yasuhiro Minato

水野 晋**
Susumu Mizuno

金子 範彦*
Norihiko Kaneko

多田 彰秀***
Akihide Tada

西平 福宏****
Fukuhiko Nishihira

要 約

従来より、人工底設魚礁は直線部材の組み合わせによる矩形構造のものが一般的である。このため、数多くの漁網切断事故を引き起こし、沿岸漁業上の大きな問題となっている。また、矩形構造は構造学的かつ水理学的に必ずしも優れたものとはいえない。ここでは、新たに半球型の人工底設魚礁を考案し、その水理特性を明らかにするため、水理実験を通して基礎的な検討を行った。実験は、2次元水路内に半球模型を設置して流れを起こし、模型に作用する流体力を測定して半球の流体力係数を求めた。さらに、模型背後の流れ特性を解明するため、半球中心軸上の断面で流れの可視化実験および流速の測定を行い、平均流速ベクトルの分布や乱れ強度の特性について考察している。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験概要
- §3. 半球に作用する流体力
- §4. 半球背後の流れの可視化
- §5. 半球背後の流況
- §6. まとめ

§1. はじめに

近年、『とる漁業からつくり育てる漁業』を目指した資源管理型漁業への転換が積極的に推進される中、コンクリート製やスチール製の人工魚礁が数多く開発されている。それらは構造様式、形状、規模等において様々のも

のが提案されているものの、構造上の強度、集魚機能、洗掘、埋没など今後解決すべき工学的課題を数多く有している。また、実海域への人工魚礁設置に関連して、投入後散乱した人工魚礁によって漁網切断事故が発生する等の問題が生じている。本研究では、いかなる流向に対しても設置効果が同一で、転倒に対しても安全であり、さらに漁網の網がかりが少ない半球型底設魚礁を考案し、開発を試みている。開発の第一段階として、まず、構造物の流体力係数を求めた。次に、集魚機能および魚礁の沈下・埋没等の原因となりえる構造物背後の反流域を含む流況について可視化および流速の測定を行った。なお、細野ら¹⁾は、半球体魚礁背後の流れが3次元であることを風洞実験より報告している。従って、半球背後の流れの構造を解明するためには、3次元的な流速測定ならびに可視化実験等が必要であるけれども、本報では今回の実験を魚礁開発の第一段階として位置づけ、流下中心軸上の鉛直断面のみを対象として実験を行っている。

*技術研究所水理研究課
**技術研究所海洋技術課
***技術研究所海洋技術課係長
****技術研究所研究部長

§ 2. 実験概要

実験は、Fig.1 に示す長さ65m、幅1.0m、高さ1.6mの2次元水路において行った。本水路には最大0.2 m³/sec までの循環流を発生できる装置が設置されている。水路底には図に示すような高さ17cmのマウンドを設

置し、その中央に半球模型を取り付けた。実験には、直径10cmの無孔半球、直径20cmの無孔および有孔半球の3種類のプラスチック製模型が用いられた。特に、有孔半球模型は、Fig.2 に示すように孔が頂部に1個（直径30mm）、側面に4個設けられている。また、側面の4つの孔

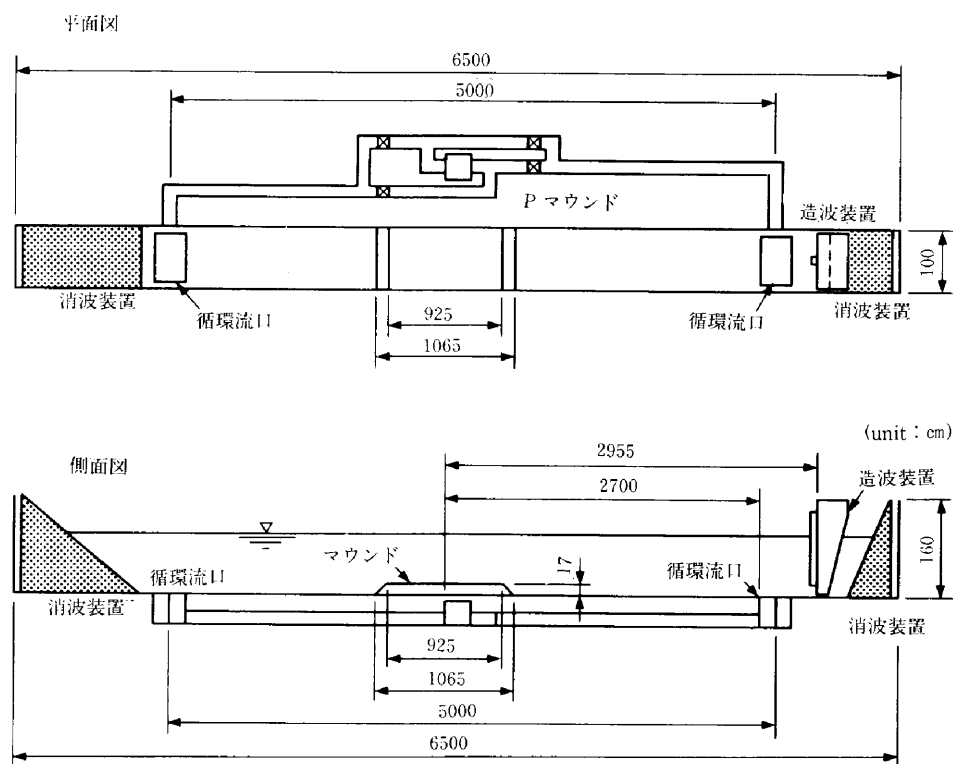


Fig.1 実験水槽の概略図

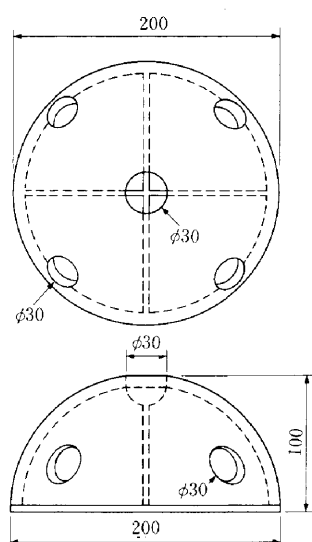


Fig.2 実験模型の模式図(有孔タイプ)

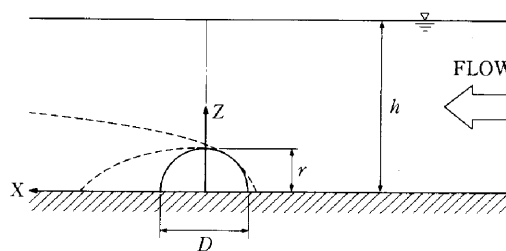


Fig.3 定義図

は、隔壁で分割された4つの空隙部に各々通じ、さらに頂部の孔へと通じている。なお、xおよびz軸は、Fig.3 に示すように、それぞれ流れの進行方向および鉛直方向と定義する。

§ 3. 半球に作用する流体力

3-1 実験方法および条件

Fig.4 に示すように、受感部に半球模型を取り付けた

Table 1

CASE	水深 h (cm)	流量 Q (ℓ /sec)	断面平均流速 U_m (cm/sec)	$Re(U_m \times r/\nu)$ ($\times 10^4$)	
				$r=5$ (cm)	$r=10$ (cm)
A	20	20	10	0.54	1.13
B	20	60	30	1.65	3.38
C	20	100	50	2.82	5.83
D	20	140	70	4.08	8.38
E	40	40	10	0.52	1.11
F	40	80	20	1.06	2.24
G	40	120	30	1.59	3.37
H	40	160	40	2.15	4.50
I	60	60	10	—	1.10
J	60	120	20	—	2.21
K	60	180	30	—	3.33
L	80	80	10	—	1.10
M	80	160	20	—	2.20

3分力検出器をマウンドの中央部に固定し、これによって半球に作用する流れ方向(x)および鉛直方向(z)の

ν :水の動粘性係数($=\mu/\rho$)である。

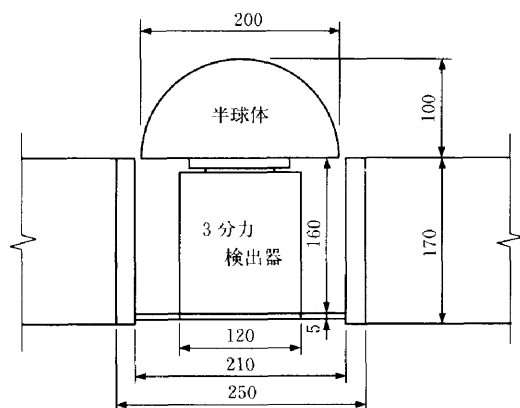


Fig. 4 流体力検出装置の概略図

流体力を測定した。なお、使用した3分力検出器(日章電気株式会社製, LMC-3502-5)は、互いに直行する3軸方向の荷重を測定できる多成分ロードセルであり、その定格負荷は各成分49N、定格出力は各 1000×10^{-6} 、非直線性は各 $\pm 0.5\%$ Fsである。さらに、荷重分解能は、4900dyn、干渉度は各分力間に対し $\pm 2\%$ Fs/Fsで、温度補償は各 0.003% Fs/°Cである。なお、実験は、Table 1に示した条件のものについて行った。ここに、

$U_m \cdot r/\nu$: Reynolds数(以下では、 Re 数と略記)

U_m :断面平均流速, r :半球体の半径,

μ :水の分子粘性係数, ρ :水の密度,

3-2 流体力係数

半球に作用する流体力は、一般に次式²⁾で表される。

$$F_x = \frac{1}{2} \rho U_m^2 C_D A_x \quad (1)$$

$$F_z = \frac{1}{2} \rho U_m^2 C_L A_z \quad (2)$$

ここに、 F_x :流れ方向流の体力, F_z :鉛直方向の流体力,

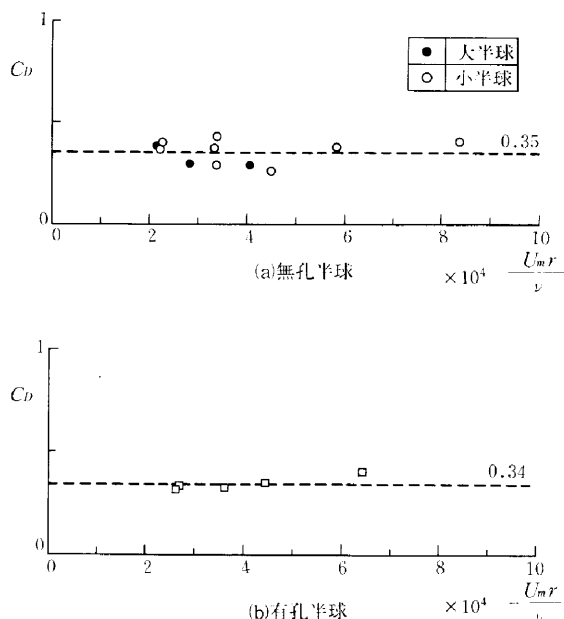
C_D :抗力係数, C_L :揚力係数, ρ :水の密度,

A_x :x方向投影面積, A_z :z方向投影面積,

U_m :断面平均流速である。

実測された流体力と上式を用いて、半球の抗力係数 C_D および揚力係数 C_L が求められた。ここで、抗力係数を求める際の投影面積 A_x には半円を、揚力係数を求める際の A_z には円の面積を用いた。有孔の模型については、 $r=10$ cmのみ実験を行い、流体力係数を求める際の投影面積は無孔と同じものを用いた。なお、計測器の精度により判断して、抗力および揚力が9800dyn未満のものについては除外した。算出された抗力係数 C_D および揚力係数 C_L をFig.5およびFig.6に示す。図中の破線は各々係数の平均値を示し、数字はその値である。

まず、無孔半球の C_D は、平均値(0.35)からのばらつきが若干認められる。一方、有孔半球での C_D は、破線からのばらつきも小さく、すべて平均値(0.34)に近い値となっている。すなわち、抗力係数 C_D は無孔、有孔に伴う有意な差は認められず、本模型に設けた孔が抗力に及

Fig.5 C_D と Re 数の関係

ばず影響は小さいことが推測される。今回の実験は、底面に固定された半球を対象としたものである。従って、定常流中に置かれた球の抗力係数と単純に比較はできないが、参考までにその値を示す。すなわち、ポテンシャル理論によって求められる球の抗力係数は $C_D = 0.5^{2)}$ であり、本実験で得られた $C_D = 0.35$ より少し大きな値となっている。次に、無孔半球での C_L は、 Re 数が 20000 ~ 50000 においてばらつきが顕著にみられるものの、その平均値は 0.41 となっている。有孔半球の C_L は、 Re 数の増加に伴い増加し、無孔半球の C_L の平均値に漸近する傾向が確認された。これは、半球の孔を通る水の流れによるものと考えられる。

以上より、今回行った実験の範囲である Re 数が 20000 ~ 70000 程度では、半球に設けた孔が抗力特性に及ぼす影響は見られなかった。一方、揚力特性には影響を及ぼすようである。

§ 4. 半球背後の流れの可視化

4-1 実験方法

比重 1.03、直径 1.0 mm の白色ポリスチレン球（積水化成工業株式会社製）をトレーサーとして用い、これにアルゴンレーザー光線を半球体中心軸上に照射して、Fig.7 に示すようにビデオおよび写真撮影（露出時間：4 秒）を行った。

4-2 模型背後の流れの可視化

一般に、流れの中に物体を置いた場合、物体の背後に

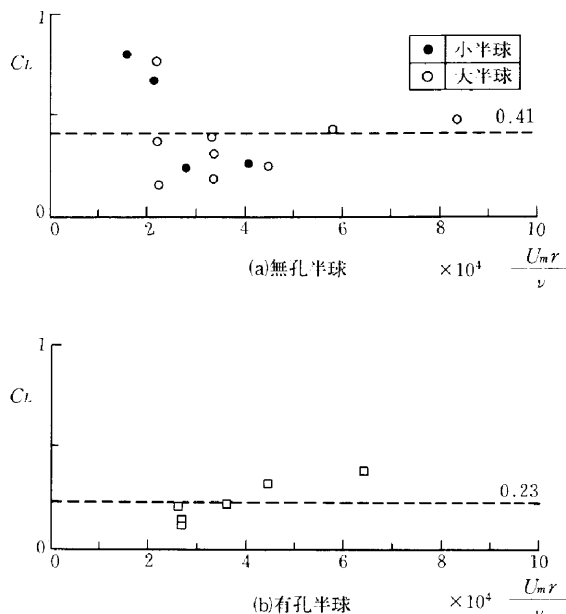
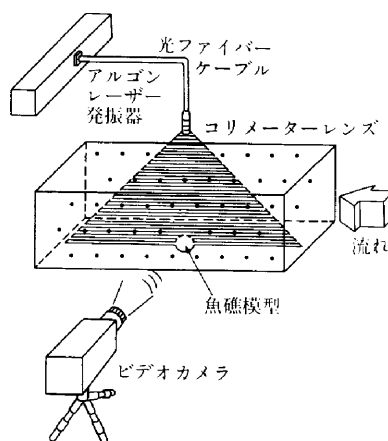
Fig.6 C_L と Re 数の関係

Fig.7 可視化実験の模式図

は断面平均流速 U_m よりも小さい流速の領域が発生し、構造物が存在しない場合の流れと比較して特性の異なる流域となっている。鶴谷ら³⁾、あるいは杜多⁴⁾は、流れ場に置かれた板構造物背後の領域を主流域、反流域、混合域に分けて考えている。ここでも、同様に半球背後の流れ場を Fig.8 に示す 3 領域に大きく分類することにする。すなわち、

- ①主流域：この領域は、構造物設置により縮流の影響が現れるものの、断面平均流速とはほぼ同程度の流速であり、相対的に乱れ強度が小さい。
- ②反流域：ここでの平均流速は主流域に比べて小さ

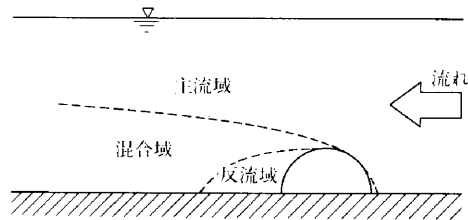


Fig.8 半球体背後の流れの分類

く、水平方向の流速が負の値となっている。なお、この領域は他の領域と比較的に容易に区別することが可能である。

- ③混合域：構造物により流れが剥離し、渦が発生・発達する領域であり、主流域と反流域が混合する領域である。

可視化実験は、Table 1 に示す CASE-E, CASE-F, CASE-G および CASE-H の条件下で行った。実験結果の一例を Photo 1 に示す。写真から、半球背後でトレ

ーサーが渦を形成していることが認められ、先に示した3つの領域が大まかに判別できる。

Photo 1 (a) に示す CASE-E ($U_m=10\text{cm/sec}$) の場合には、大きな反流域および混合域が形成されている。また、断面平均流速の増大に伴い、反流域が小さくなり混合域が半球に接近していくのがわかる。さらに、それらの領域と主流域との区別も明確になり、半球背後において主流の影響が強くなっていく様子がうかがえる。

本報には結果を示さないが、 $z=5\text{cm}$ の水平面上で可視化を行ったところ流下方向の水平面上にも周期性を有する渦の発生が認められた。これらのことから、半球体背後の流れは3次元的事実であることが確認された。

4-3 有孔半球を用いた流れの可視化

半球頂部の孔からの染料の吹き出し効果を見るために、Fig.9 に示す様な半球の中に内径1mmのパイプを設置し、コンデンスミルクを注入して可視化実験を行った。

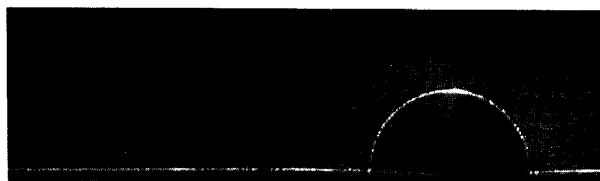
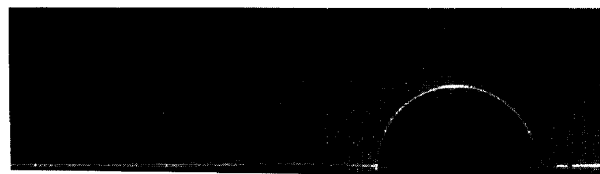
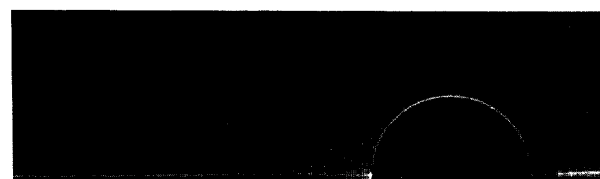
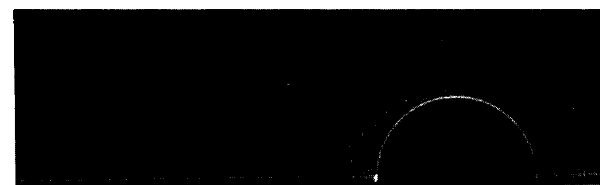
(a)CASE-E ($U_m=10\text{cm/sec}$)(b)CASE-F ($U_m=20\text{cm/sec}$)(c)CASE-G ($U_m=30\text{cm/sec}$)(d)CASE-H ($U_m=40\text{cm/sec}$)

Photo 1 可視化状況（無孔）
($h=40\text{cm}$, $D=20\text{cm}$)

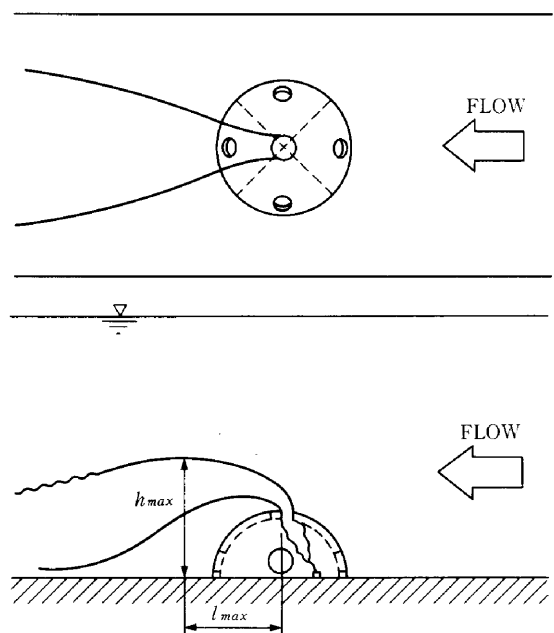


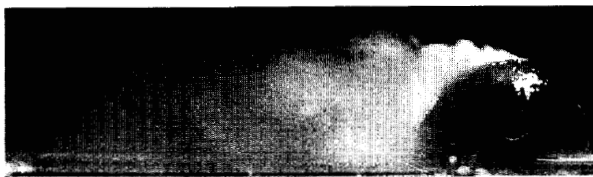
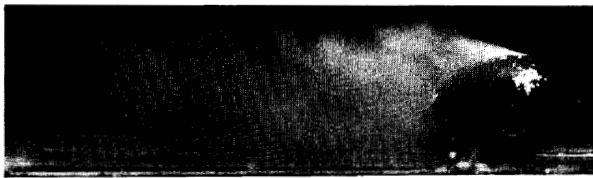
Fig.9 可視化実験の模式図

実験条件は Table 2 に示すとおりである。Photo 2（露出時間：1/8秒）は可視化の結果の一例であり、平均断面流速 U_m の増加に伴い、染料の吹き出し効果の違いを比較したものである。写真より、 U_m が増大するにつれて、半球背後での染料の移流拡散が顕著になっていく傾向が確認される。

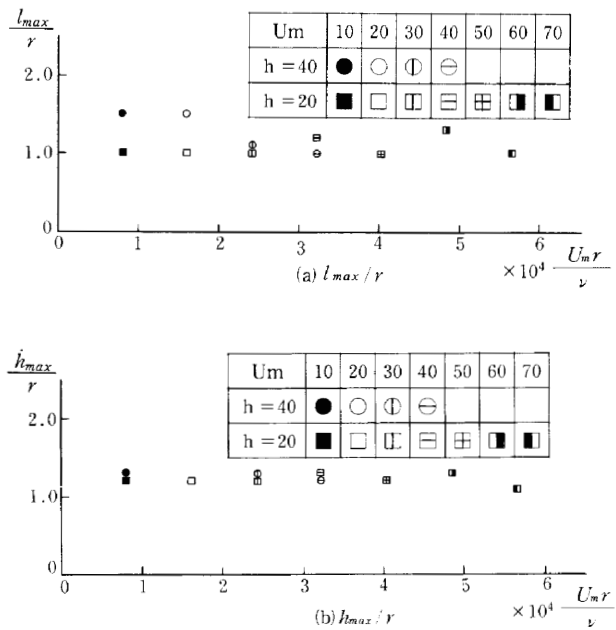
半球頂部からのコンデンスミルクの吹き出し効果を定性的に把握するため、Fig.9 に示すようなコンデンスミルクが最も上昇した位置 (l_{max} , h_{max}) をビデオテープから読み取った。Fig.10 は、求められた l_{max} および

Table 2

CASE	水深 h (cm)	流量 Q (ℓ /sec)	断面平均流速 U_m (cm/sec)	$Re(U_m \times r / \nu)$ ($\times 10^4$)
				$r = 10$ (cm)
H A	20	20	10	0.86
H B	20	40	20	1.72
H C	20	60	30	2.62
H D	20	80	40	3.54
H E	20	100	50	4.45
H F	20	120	60	5.44
H G	20	140	70	6.42
H I	40	40	10	0.88
H J	40	80	20	1.79
H K	40	120	30	2.68
H L	40	160	40	3.61

(a) CASE-E ($U_m = 10$ cm/sec)(b) CASE-F ($U_m = 20$ cm/sec)(c) CASE-G ($U_m = 30$ cm/sec)(d) CASE-H ($U_m = 40$ cm/sec)Photo 2 可視化状況 (有孔)
($h = 40$ cm, $D = 20$ cm)

h_{max} を半球の半径 r で無次元化した量と、 Re 数との関係を示したものである。両者は、水深および Re 数にかかわらず、ほぼ一定の値となっている。すなわち、最大の上昇量は頂部より 2~3 cm のところであり、その地点は半球の中心から 15 cm 以内にあることが確認される。

Fig.10 無次元長さ と Re 数の関係

以上の可視化実験の結果を総合すれば、断面平均流速が大きくなるに従い半球直後の反流域の面積が小さくなることが明らかになった。また、有孔半球では、内部の空隙部から頂部の孔に吹き出す流れの存在が確認された。しかしながら、その流れは局所的なものであり、主流に与える影響は弱いようである。

§ 5. 半球背後の流況

5-1 流速ベクトルの時間変化

半球中心軸上を通る流れ方向の鉛直断面内で、2方向電磁流速計（計測技研株式会社製、VM-201型およびVMT2-200-08PL型）を用いて水平方向（x）および鉛直方向（z）の流速を測定した。可視化実験でも既に確認されたように、半球周辺部では3次元性の極めて高い流れが発生している。従って、半球中心軸上の鉛直断面に注目して、その全般的な流れの特性を論じることは適当ではないが、可視化実験と同様に、半球中心軸上の断面のみで流速測定を行った。

水深40 cm、平均流速30 cm/sec の流れ場に半径20 cmの半球を設置し、Fig.11 に示す主流域、混合領域および反流域をそれぞれ代表する3点 A, B, C で測定した流速の水平成分 U および鉛直成分 W を Fig.12 に示す。なお、水平成分は流れ方向を正、鉛直成分は上向きの流れを正とした。Fig.12 (a) の主流域での流速の水平方向成分は上流から下流に向き、流速の変動は小さい。Fig.12 (b) の混合域での流速は、水平および鉛直方向成分

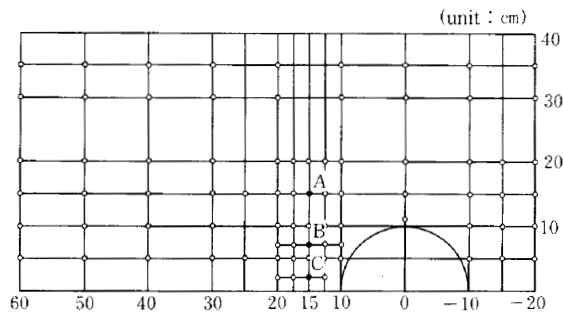
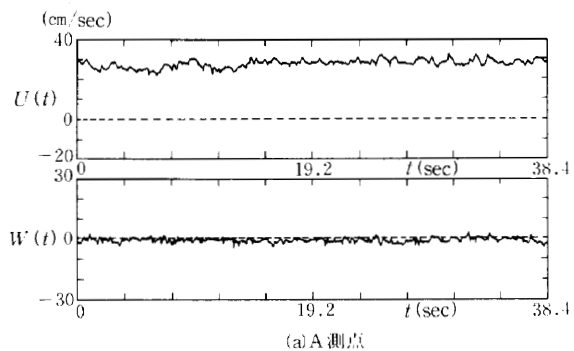
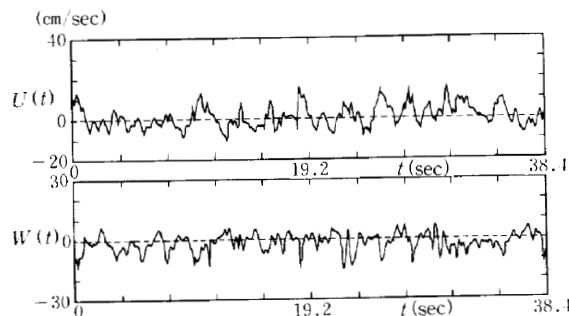


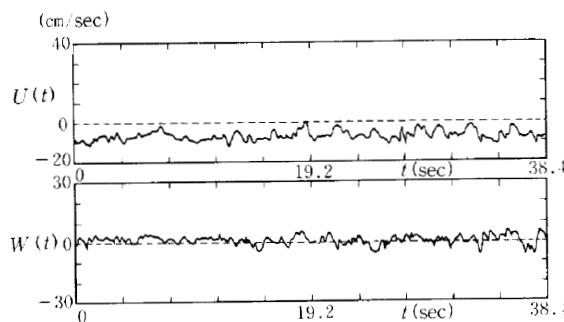
Fig.11 流速測点図(大半球)



(a) A 測点



(b) B 測点



(c) C 測点

Fig.12 流速変動の記録例
($h=40$ cm, $D=20$ cm, $U_m=30$ cm/sec)

ともに周期性のある流速が測定されており、平均流速は 0 に近づいている。Fig.12 (c) の反流域での流速は、

下流から上流に向かって逆流し、その大きさは平均流速の 1/3 以下の値となっている。さらに、その変動成分は小さいようである。

5-2 平均流速ベクトル

Fig.13 は、Table 1 に示す CASE-E, CASE-F, CASE-G および CASE-H の条件下で得られた半球模型 ($D=20$ cm) 近傍の平均流速ベクトルの分布図である。ベクトルの大きさは、各測点での平均流速をそれぞれ断面平均流速 U_m で無次元化した値に等しい。なお、これらの流速ベクトルは同時計測によって得られたものではないが、平均的な流況を把握する意味で、同一図面上にプロットしている。

Fig.12 の実験条件に対応する Fig.13 (c) (CASE-G) に注目し、Fig.11 に示されている A, B, C 点での平均流速ベクトルの大きさを求めてみた。その結果、それぞれ 27.7, 2.2, 7.2 cm/sec となり、B 点および C 点では平均断面流速よりもかなり小さな値となっていることがわかった。さらに、この図に対応する可視化実験の Photo 1 (c) に示す写真との照合により、流速の小さな測点が混合域あるいは反流域に属していることがわかる。また、それらの測点では種々のスケールの渦が発生しているようである。

Fig.13 (a) の CASE-E ($U_m=10$ cm/sec) では、半球背後の流向は、 $z=7.0$ cm 以下で半球の方に向いている。この図と Photo 1 (a) より、この領域は反流域に相当し、しかも半径の大きな渦ができていているものと考えられる。さらに、 $z=5$ cm での流向は $x=30$ cm より下流で主流域と同じ方向に向きつつある。CASE-G ($U_m=30$ cm/sec) では、 $z=7.0$ cm における流向が主流域の流向に反転しつつある。これらの結果より、断面平均流速の増加に伴い、半球背後部で主流域の影響が強くなっていく傾向がわかる。Photo 1 (c) の写真からもわかるように、 $z=7.0$ cm 以下の領域では流向が定まらず乱れていることも認められる。また、 $z=5$ cm, $x=25$ cm においては、既に流向が主流方向を向いており、先の $U_m=10$ cm/sec の場合と比べて反流域の長さが短くなっている。 $U_m=40$ cm/sec では、 $z=7.0$ cm での流向が流下方向に向いており、主流域の影響がさらに強くなっていることが認められる。また、 $z=5$ cm, $x=20$ cm の位置において既に流向は主流方向に近づいており、反流域の長さが短くなっていることをうかがわせる。このようなことから、主流の流速が増加するに従い、構造物背後で主流の影響が支配的になるとともに、反流域が小さくなることが明らかになった。

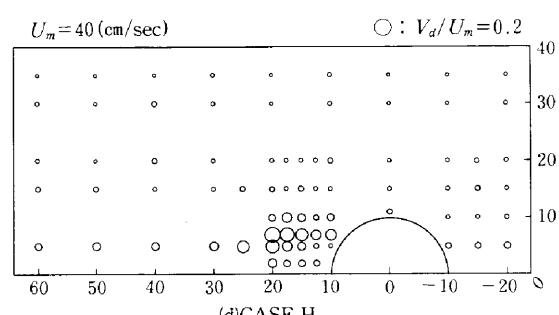
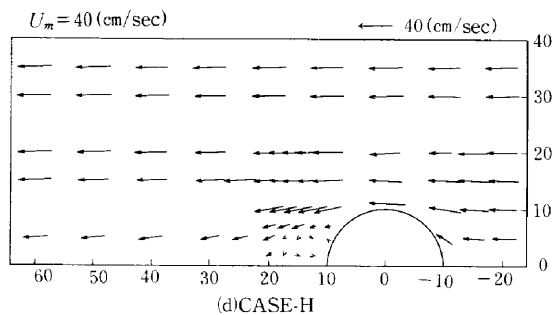
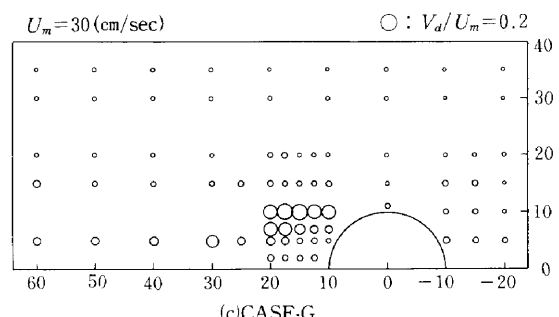
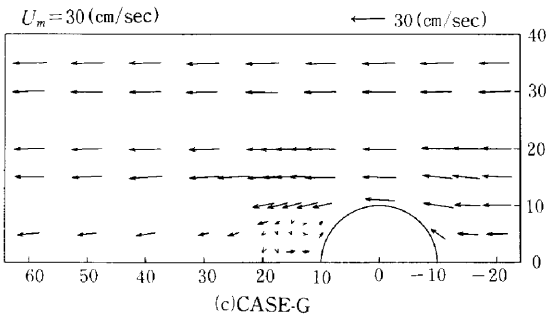
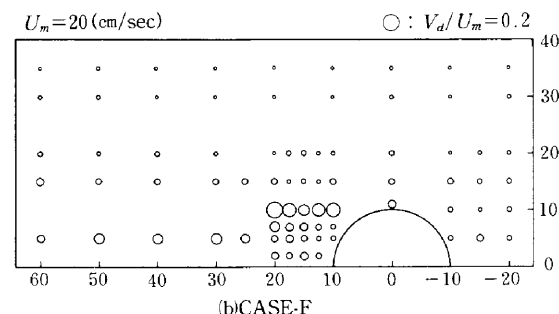
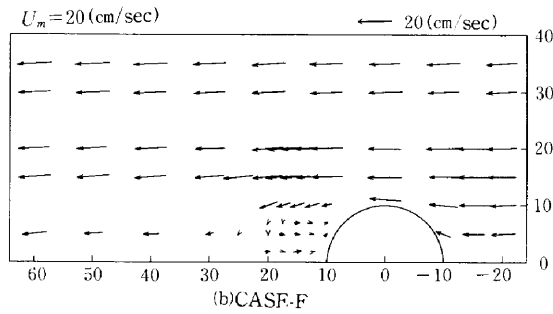
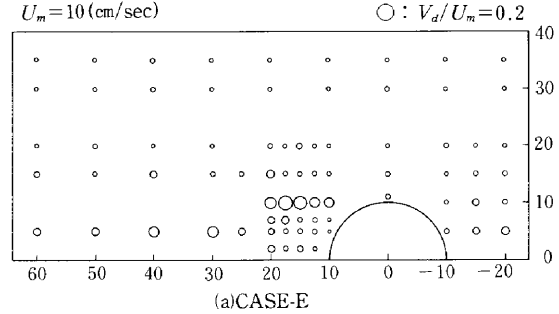
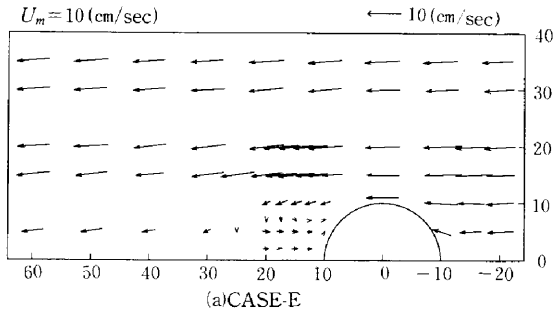


Fig.13 平均流速のベクトル分布図
($h=40\text{cm}$, $D=20\text{cm}$)

Fig.14 V_d/U_m の分布図
($h=40\text{cm}$, $D=20\text{cm}$)

5-3 乱れ強度の特性

半球後流域での乱れ強度の特性を明らかにするため、以下に示すような式を用いて流速の乱れ変動量 V_d を定義する。

$$V_i = \sqrt{U_i^2 + W_i^2} \quad (3)$$

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (4)$$

$$V_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_i - V_m)^2}{N}} \quad (5)$$

ここに、 U_i : 水平方向流速, W_i : 鉛直方向流速,
 V_i : 流速 ($i=1 \sim N$), V_m : 測定値の平均値,
 V_d : 乱れ変動量である。

Fig.14 は、流速の乱れ変動量 V_d を断面平均流速 U_m で正規化した乱れ強度 V_d/U_m の分布を円で示したものである。実験条件は、 $h=40\text{cm}$, $D=20\text{cm}$ の下で U_m を

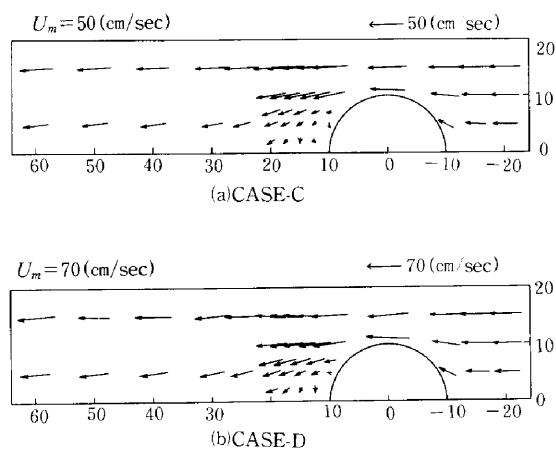


Fig.15 平均流速のベクトル分布図
($h=20\text{cm}$, $D=20\text{cm}$)

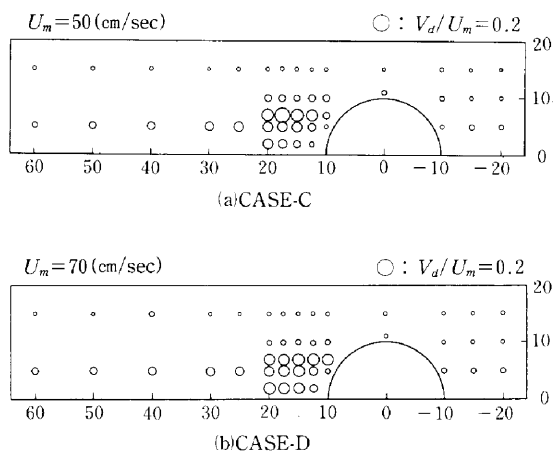


Fig.16 V_d/U_m の分布図
($h=20\text{cm}$, $D=20\text{cm}$)

10cm/sec から40cm/sec まで変化させている。まず、Fig.11 に示す主流域、混合域、反流域を代表する3点A, B, Cでの乱れ強度を平均流速30cm/secの場合について求めてみる。それぞれ0.065, 0.127, 0.071となり、混合域での乱れ強度は他領域のほぼ2倍になっていることがわかる。従って、Fig.14において乱れの大きい点すなわち円の大きな所は混合域に相当するものと考えられる。特に、 $U_m=10\text{cm/sec}$ の場合を示したFig.14(a)では、 $z=10\text{cm}$ の高さ(半球頂部の高さ)で乱れが大きくなっている。また、 $U_m=20\text{cm/sec}$ の場合を示したFig.14(b)では、 $z=10\text{cm}$ に加えて $z=7.0\text{cm}$ でも乱れが大きくなりつつあることが認められる。さらに、同図においては、 V_d/U_m の大きい領域が半球頂部の下方方向にも見られる。これは、断面平均流速の増加とともに混合域が半球に接近していくためと推測される。Fig.14(c)の $U_m=30\text{cm/sec}$ では、 $x=20\text{cm}$, $z=7.0\text{cm}$ の地点で V_d/U_m の急激な増加がみられる。一方、 $U_m=40\text{cm/sec}$ では、他の3ケースと異なり、 $z=10\text{cm}$ では V_d/U_m が小さくなり、 $z=7.0\text{cm}$ で V_d/U_m が最も大きくなっている。これは、混合域がさらに半球に接近し、反流域が小さくなったためと考えられる。

さらに、 Re 数を大きくした場合の流況について追加検討する。但し、ポンプの性能上、水深40cmでは断面平均流速を40cm/sec以上に設定することが不可能である。そのため、水深20cmで $U_m=50, 70\text{cm/sec}$ の2例の場合について調べることにする。なお、 $h/D=1.0$ となることにより自由水面および底面が流況に大きく影響を及ぼすものと予想されるが、ここでは、それらを無視して議論を進める。両ケースの流況について可視化した状況をPhoto 3(露出時間: 4秒)に示す。さらに、Fig.15



(a)CASE-C ($U_m=50\text{cm/sec}$)



(b)CASE-D ($U_m=70\text{cm/sec}$)

Photo 3 可視化状況(無孔)
($h=20\text{cm}$, $D=20\text{cm}$)

およびFig.16は、それぞれ両ケースの平均流速ベクトルおよび乱れ強度の分布を示している。

$h=20\text{cm}$ の $U_m=50\text{cm/sec}$ の条件下では、流況、乱れ強度ともに先のCASE-H($U_m=40\text{cm/sec}$)の場合とよく似た結果となっている。 $U_m=70\text{cm/sec}$ の場合は、反流域が大変小さくなっている。さらに、乱れ強度の分布では半球背後で均等に乱れているのがわかる。これは、混合域の鉛直方向の幅が広くなり、反流域が狭くなっているためであると推測される。以上、乱れ強度の分布図より、断面平均流速が増加するに従い、半球背後に生じる混合域が半球に沿うように形を変えながら厚さを増していくようである。それに従い、半球と混合域の間でできる反流域の面積が狭くなっている。

§ 6. まとめ

本実験は、半球型魚礁の流れ場での水理特性について基礎的実験を行ったものである。得られた結果を以下に要約する。

- (1) 無孔半球の抗力係数は平均値0.35となり、値のばらつきは小さかった。一方、揚力係数は、今回の実験の範囲内では値にかなりのばらつきがあり、 Re 数との間に有意な関係が認められなかった。
- (2) 有孔半球の抗力係数は0.34と無孔の場合とほぼ同じ値となった。揚力係数は、 Re 数の増加に伴い増加し、無孔半球の C_L の平均値に漸近する傾向が確認された。
- (3) 流れの可視化では、断面平均流速が増加するに従い混合域の鉛直方向の幅が広がると共に、反流域が少なくなることが明らかにされた。同様の特性は、流速分布および乱れ強度分布からも認められた。

新型魚礁開発の第一段階として行った今回の実験では、半球体背後の流れを中心軸上の鉛直断面でしかとらえていない。半球体近傍の水理現象を厳密に把握するためには、数多くの断面での可視化および3次元的な流速測定を行う必要がある。今後は、半球に設けた孔の形状あるいは大きさ等を変化させて流況に与える影響を調べると共に、群体で設置した場合の相互干渉の効果についても検討していきたい。さらに、半球構造物を波動場に設置した場合の実験も行う予定である。

最後に、本実験を行うに際し、多大な御協力を頂いた鳥取大学大学院生西田秀紀君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 細野成一, 川口彰久, 藤沢康雄, 本間義教: 人工礁漁場造成のための魚礁ブロックの渦流現象, 大林組技術研究所報, No.18, pp.110~114, 1979.
- 2) 大西外明: 水理学II, 森北出版, 1981.
- 3) 鶴谷広一, 松延嘉國, 惟住智昭, 柳鳴慎一: 水中に設置された構造物背後の流れと乱流構造に関する研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.581~585, 1987.
- 4) 杜多 哲: 魚礁後流の海水交換に関する研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.623~627, 1983.