

# 人工魚礁周辺の流れ場の解析と魚の蝟集に関する基礎的研究

小野正順\*・中谷誠志\*\*・鷺澤栄二郎\*\*\*・出口一郎\*\*\*\*

## 1. はじめに

近年、浅海域の埋立や都市排水による沿岸域の水質汚染により、沿岸域の環境が破壊されている。その結果、浅海域における稚魚の育成場所が失われ、水質汚染による沿岸生態系の低次の消費者である底生生物の減少により、近海の水産資源の減少が顕在化してきている。最近の漁業では水産資源保護のため TAC (Total Allowable Catch/漁獲可能量) が国際的に設定され、漁獲が制限されている。このような漁場減少・水産資源の枯渇化のもと、沿岸漁場の生産力を増強する必要があり、人工魚礁による沿岸漁場の造成が求められてきている。昔の人工魚礁は、離散した水産生物を捕獲しやすいように集魚させることを第一の目的としたが、最近では柿元 (1993) によって報告されている通り、水産生物にとって産卵場、餌場、隠れ場、休息場などの育成場として機能することも要求されている。魚食性魚類の攻撃を受ける小魚や稚仔魚は魚礁を目標として群を形成し魚礁の陰に身を隠し生残量を増やすために利用し、魚食性魚類は常に餌が保有されている餌場として魚礁を利用する。すなわち、魚礁周辺では食物連鎖が形成されている (1985)。漁獲を含めて安定した生態系を作ることができれば、持続的な水産資源が確保できると考えられる。

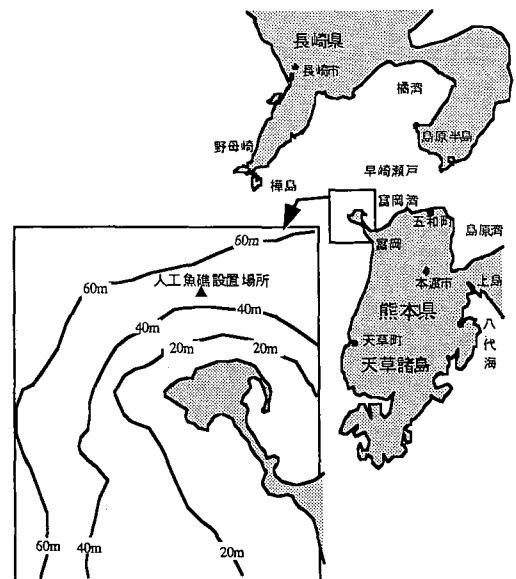
これらの観点より本研究では、実海域に設置された人工魚礁周りに集魚している魚種、蝟集状況を釣り調査、刺し網調査、潜水調査、魚探調査により実測した。また、魚礁を設置したときに最も変化すると考えられる流況に着目し、水産工学研究所で行われたマダイとイシダイの魚礁まわりの行動特性に関する実験データ (1990) と魚礁まわりの流況の数値計算結果を用いて、両魚種の人工魚礁周辺の流況と蝟集の関係について検討を行った。

## 2. 人工魚礁まわりの魚の蝟集に関する観測

本研究では、実際の魚礁の蝟集状況を観察するため

\* 正会員 工博 大阪大学講師 大学院工学研究科 土木工学専攻  
\*\* 学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻  
\*\*\* 正会員 旭化成マリンテック(株)  
\*\*\*\* 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科 土木工学専攻

図一に示す豊岡湾 (熊本県天草郡苓北町) で3ヶ月前に沖合 1 km, 水深 42 m の位置に設置された人工魚礁まわりの魚の蝟集状況を 10, 11, 12 月の 3 回にわたり観測した。設置されている水域は図に示されているように有明海と外海との出入り口で、有明海に産卵に向かう魚と有明海で稚魚期を過ごし外海に向かう魚の通り道となっている。設置されている魚礁は図一に示すように、底面の礁幅 10.9 m, 上面の礁幅 3.6 m, 礁高 8.2 m の六角錐の形をした単体魚礁である。設置魚礁の特徴は、礁高が高く、広い空容積を有し、底面積も大きいため、浮き魚類、岩礁性魚類、底魚類など多くの種類の魚を蝟集させることができる。観測内容は、釣り調査、潜水調査、刺し網調査の 3 種類の調査により人工魚礁に集魚している魚種、個体数、体長の調査を行い、魚群探知機調査により魚礁外側に蝟集する魚群の分布状況について調査を行った。刺し網調査に用いた刺し網は外目合が 45 cm, 内目合が 10 cm で高さ 1.5 m, 長さが 91 m の網を 4 反用いた。網は夕方魚礁を取り囲むように設置し、翌朝の早朝に引き上げた。潜水調査はいずれも潮止まり時に行い、30分



図一 人工魚礁設置海域

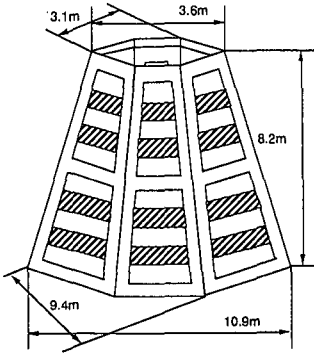


図-2 対象とした人工魚礁

程度の間で視認調査を行った。また、魚群探知機調査は漁船の航行断面でしかデータが取れないため、魚礁を横切る8方位の断面でデータを収集した。

### 3. 魚礁まわりの流況の数値計算法

3次元物体まわりの流況の数値計算は、2次元物体まわりの渦流れが計算できる SOLA 法 (1982) を3次元振動流場に拡張して計算を行った。基礎式は、式(1)-(4)に示す連続式と N-S 方程式である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = D = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \dots (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g_z + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \dots (4)$$

ここに、 $u, v, w$  は  $x, y, z$  方向の流速、 $D$  は発散、 $p$  は圧力、 $\nu$  は渦動粘性係数をそれぞれ示す。

数値計算は有限差分法を用い、移流項には dorner 差分を用い、拡散項には2次の中央差分を用いる。計算手順は N-S 方程式である式(2)-(4)を用いて時間更新された  $u, v, w$  を計算する。計算された  $u, v, w$  は連続式である式(1)を満足しないため、各セル内の発散  $D$  を式(1)を用いて計算する。各セル内の発散  $D$  を0に収束させるため圧力及び流速を修正し、この修正は各セル内の発散  $D$  が0に収束するまで繰り返される。

境界条件は、上流側で  $u = U_0, v = w = 0$  の条件で、下

流側では一つ上流側の値に等しいとする自由流出の条件としている。他の側面での境界条件は、slip の条件とした。構造物の条件は、構造物内及び構造物境界面法線方向の流速を0として与えた。

### 4. 人工魚礁まわりの集魚状況

図-3 に潜水調査、図-4 に刺し網調査の魚種別個体数の分布の観測結果を示す。それぞれ (a) 図が10月調査、(b) 図が11月調査、(c) 図が12月調査結果を示す。刺し網調査で確認できたが潜水調査では確認されなかった魚種は、10月の調査ではイセエビ、マダイ、11月の調査ではイラ、メイタガレイ、12月の調査ではマアジ、メイタガレイ、マダイ、イサキである。原因としては、夜行性のもの(イセエビ)、魚礁周辺で個体数が少ないあるいは成長して魚礁を離れたために個体数が少ないもの(メイタガレイ、マアジ、イサキ)などは調査時間の短い(50分程度)潜水調査では確認できなかったと考えられる。潜水・刺し網調査から対象魚礁周辺に I 型魚種(魚礁に体を接触させている魚種:カサゴ・コロダイ)、II 型魚種(魚礁の周囲を遊泳、あるいは海底に定位する魚種:マダイ・イサキ)、III 型魚種(魚礁から離れた表・中層水域に滞泳する魚種:アジ)の種々の魚が蝟集していることがわかる。マアジの体長は、潜水調査により10月の調査では12-15 cm、11月の調査では12-17 cm、12月の釣り調査では22 cm となっており、稚魚期には定着性があり全長が20 cm 以上に達した程度で魚礁から離れて生活するものと考えられる。同様にイサキも12月の釣り調査では全長33 cm のものが4個体捕獲されており、群を作る必要がないほど成長した個体(全長30 cm 前後)は魚礁から離れて生活するものと考えられる。ウマズラハギは12月の潜水調査では確認されていないが、刺し網調査ではカワハギと同程度の個体数が捕獲されており、常に魚礁周辺に蝟集しているものと考えられる。このように II 型、III 型魚種は、成長とともに生態が変化し、時間的に集魚状況が変化しているものと考えられる。それに対して、岩礁性魚種の多い I 型魚種は、図-3, 4 の(a)~(c)にかけて個体数の変化も魚種の変化も少ないことがわかる。また、I 型と II 型の個体数の違いは II 型の集魚容量は魚礁の空容積に影響し、I 型の集魚容量は魚礁の底面積に影響すると言われており、魚種による生活空間の違いが現れていることがわかる。従って、現地観測により人工魚礁の集魚効果を把握する場合、魚種によって観測を行う時間スケールを考える必要がある。魚の成長段階により魚礁への定着性が異なる魚種や回遊性の魚種の多い II 型、III 型魚種は比較的短い一月程度の時間スケールで長期間調査する必要がある。一方、定着性の強い岩礁性魚種の多い I 型魚種は、魚種数、個体数ともに時間変

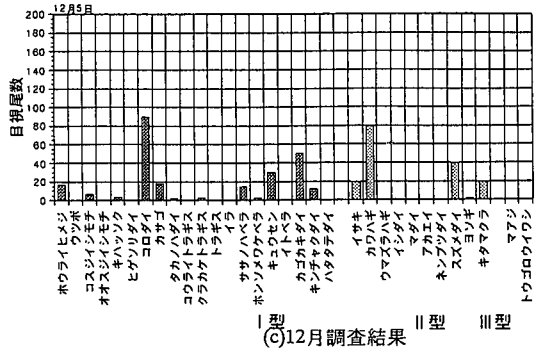
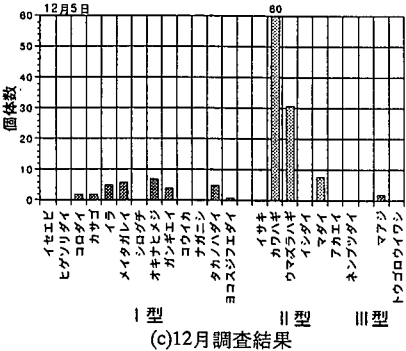
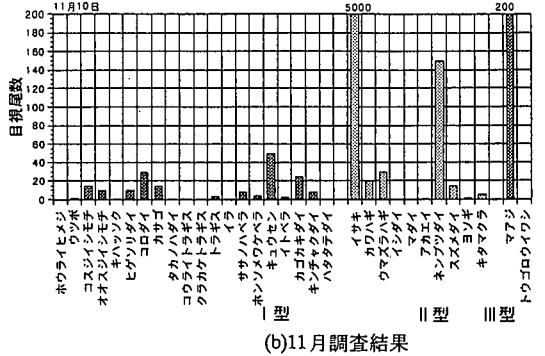
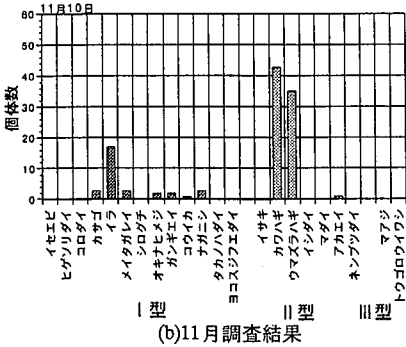
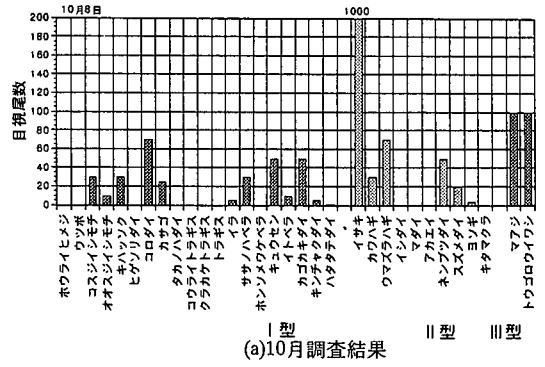
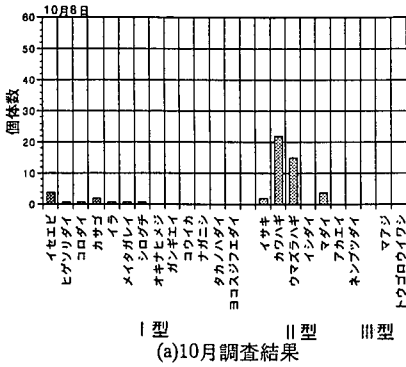


図-3 魚礁に産卵した魚種と個体数(刺し網調査)

図-4 魚礁に産卵した魚種と個体数(潜水調査)

動が小さいので季節変動程度の時間スケールで観測する必要があることがわかった。

図-5は、本数値計算法によって計算された人工魚礁内部の流況を示す。計算で作用させた流速は40 cm/s、この地点での最大流速は1 m/s程度、調査時の流速は20-40 cm/sであった。計算結果から流れは魚礁の底部付近から魚礁内へ進入し、魚礁内部では緩やかな上昇流があり、魚礁上面から抜けるような流況となっている。

図-6は潜水調査による人工魚礁内での魚種の分布状況を示す。図(a)~(c)は同様に10, 11, 12月の調査結果を示す。本研究対象である人工魚礁の礁高が高いために、魚礁の上側においてIII型魚種の産卵が確認されている。カワハギ、ウマズラハギ、イサキのII型魚種は、魚

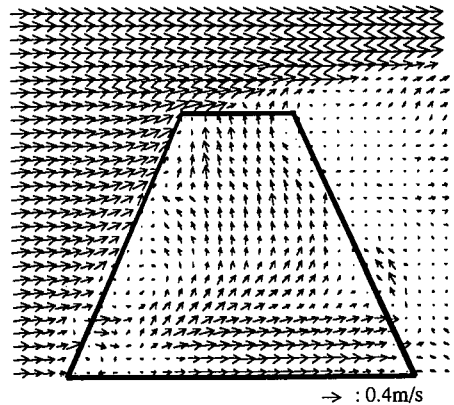
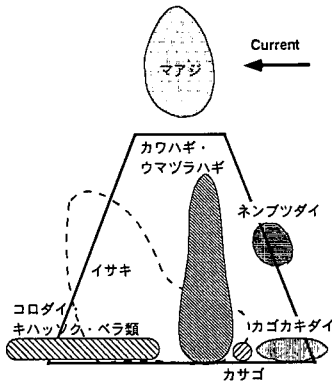
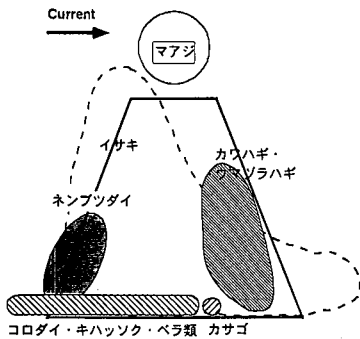


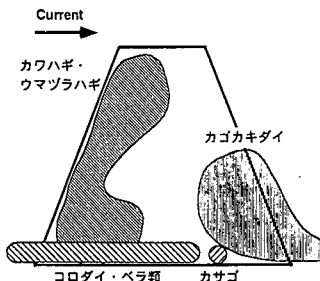
図-5 人工魚礁内の流況の計算結果



(a)10月調査結果



(b)11月調査結果



(c)12月調査結果

図-6 人工魚礁内の集魚状況の模式図

礁中層部に鰈集している。II型魚種の中でもイサキは魚礁の中層全域に分布しているが、側方からの流れに流されやすいカワハギ、ウマヅラハギは魚礁の内側側面に接触するように分布している。また、I型魚種のクロダイ、ベラ、カサゴは魚礁底部に鰈集しており、人工魚礁の底面積の広さがI型魚種の集魚効果に有効であることがわかる。

最後に紙面の都合上割愛するが魚探調査結果より、水面から30m以浅の魚群は流れに対して魚礁の下手側に、魚礁に接する程度に接近している魚群は魚礁の上手側に確認された。

### 5. マダイ・クロダイの魚礁まわりの行動特性に関する実験の概要 (1990)

実験は、全長3-5cmのマダイ・クロダイ種苗5-10匹について行われている。水槽は奥行き40cm、深さ50cmの循環水槽を用いている。水深は40cm、魚礁は10cm×10cm奥行き40cmの矩形型魚礁が水槽中央部の底面に設置されている。作用させた定常流速は0~30cm/sの流速で、水深方向40cm魚礁の上下流側95cmを側方からカメラにより5秒毎に各流速で1時間測定し、滞留頻度及び滞留時間を測定している。

### 6. マダイ・クロダイの魚礁まわりの行動特性

図-7-10は、マダイ、クロダイの魚礁周辺の滞留頻度分布を示す。図-7, 8はそれぞれ流れを作用させていない場合のマダイとクロダイの滞留頻度分布を示し、図-9, 10はそれぞれ20cm/s, 30cm/sの流速を作用させた場合のマダイとクロダイの滞留頻度分布を示している。流れの作用させていない図-7, 8の場合、マダイ、クロダイ共に水槽全域で移動しているのに対して、流れを作用させることで魚礁の後流域に逃避行動をとっていることがわかる。逃避行動は図-7, 8を比較してもわかるように、クロダイよりもマダイの方が強く現れる。これはマダイとクロダイの遊泳力の差であると考えられる。これらの結果を滞留時間と流速の関係について図-11, 12に示す。マダイ・クロダイ共に主流の流速によって滞留できる限界流速が異なることがわかる。従って、主流の流速で無次元化し、図-13, 14に整理し直した。図-13, 14に示されるように、マダイは主流の流速の0.6-0.8倍程度の小さい流速の領域(後流渦領域)に滞留し、主流より大きい流速域ではあまり滞留は見られない。また、クロダイは主流の1.25倍程度の流速領域では滞留することができる。このように、魚礁周辺では流れ場が変化し、魚種によって魚礁まわりで滞留できる場所が異なり、魚礁周辺で魚種による棲み分けがなされていることがわかる。

### 7. 結論

(1) 潜水・刺し網調査から本研究で対象とした人工魚礁周辺にI型魚種(魚礁に体を接触させている魚種:カサゴ・メバル)、II型魚種(魚礁の周囲を遊泳、あるいは海底に定位する魚種:マダイ・イサキ)、III型魚種(魚礁から離れた表・中層水域に滞泳する魚種:アジ)の種々の魚が鰈集し、特にII型魚種が多く鰈集していることがわかった。

(2) 10月・11月・12月の現地観測結果から、鰈集している魚種に季節変動があり、鰈集効果を評価するには、

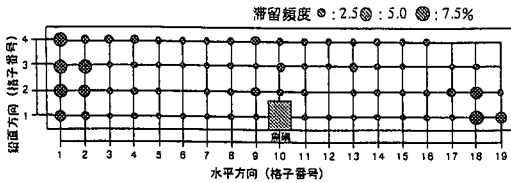


図-7 魚礁周りの流況とマダいの滞留頻度分布 ( $U_0=0$  cm/s)

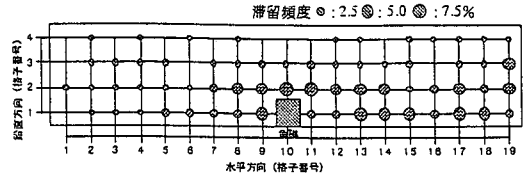


図-8 魚礁周りの流況とクロダいの滞留頻度分布 ( $U_0=0$  cm/s)

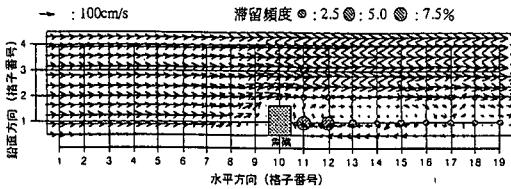


図-9 魚礁周りの流況とマダいの滞留頻度分布 ( $U_0=20$  cm/s)

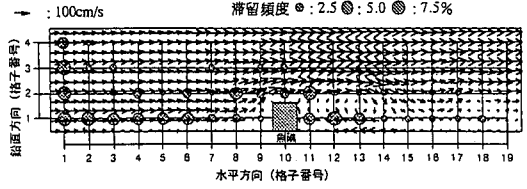


図-10 魚礁周りの流況とクロダいの滞留頻度分布 ( $U_0=30$  cm/s)

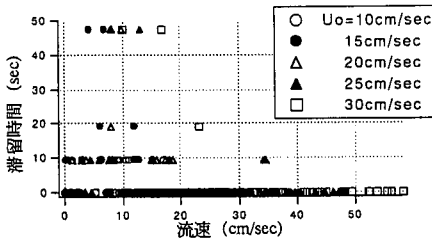


図-11 平均流速と滞留時間の関係 (マダイ)

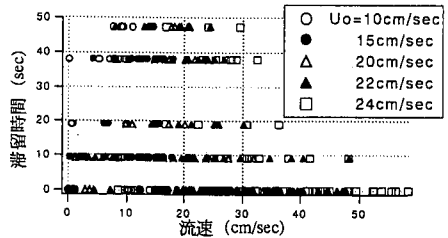


図-12 平均流速と滞留時間の関係 (クロダイ)

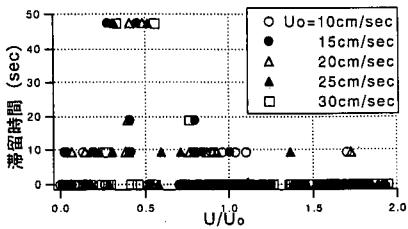


図-13 主流に対する相対流速と滞留時間の関係 (マダイ)

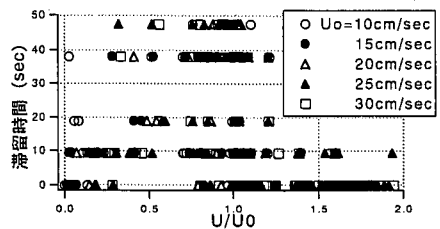


図-14 主流に対する相対流速と滞留時間の関係 (クロダイ)

最低でも1年間観測を行う必要がある。

(3) 流れからの逃避行動に関する結果から、マダイは流速の小さい魚礁背後で滞留頻度が高く逃避行動をとっていることがわかる。マダイとクロダイでは特に遊泳能力の低いマダイの方がより顕著に流れからの逃避行動がみられる。

(4) マダイは、主流の流速より小さい流速の領域(後流渦領域)に滞留し、主流より大きい流速域ではあまり滞留は見られない。クロダイも主流以下の流速の領域で滞留するが、主流の1.25倍以上の流速領域では滞留することが少なくなる。このように、魚種によって魚礁まわりで滞留する場所が異なり、主流とその場所の流速の比によって滞留する場所が決まっていることがわかる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり吉田郁男参事、坂井副組長をはじめとする苓北町漁業協同組合の方々には現地観測などに多大な御協力を頂きました。また、全国沿岸漁業振興開発協会 柿元 皓技術委員には貴重なご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

柿元 皓(1993): 人工魚礁による魚群行動制御, 水産工学, Vol. 30 No. 1, pp. 59-68.  
 柿元 皓・大久保久直 (1985): 新潟県沿岸域における人工魚礁の総合的研究と事業, 新潟県水産試験所, pp. 1-224.  
 高橋良一編著 (1982): コンピューターによる流体力学(演習), 構造計画研究所, 275 p.  
 安永義暢・日向野純也 (1990): マダイ・クロダイ幼魚の耐流性状に関する基礎的実験, 水産工学研究所技報, 水産土木, 第12号, pp. 11-22.