

ラオスにおけるコマツモムシ属

(半翅目：マツモムシ科)

による養殖種苗の食害の実態

2011

東京大学大学院農学生命科学研究科
農学国際専攻

佐野 幸輔

指導教員 東京大学教授

黒倉 壽

目次

第 1 章 諸言

1-1. 途上国における淡水養殖開発	1
1-2. ラオスと種苗生産	1
1-3. 本研究の目的と構成	3

第 2 章 種苗生産の実態調査

2-1 はじめに	7
2-2 材料と方法	7
2-3 結果	8
2-4 考察	11

第 3 章 種苗育成池に出現する水生昆虫

3-1 はじめに	27
3-2 材料と方法	27
3-3 結果	28
3-4 考察	30

第 4 章 コマツモムシ属による捕食実験

4-1 サイズ別捕食実験	39
4-1-1 はじめに	39
4-1-2 材料と方法	39
4-1-3 結果	41
4-1-4 考察	42
4-2 行動観察実験	51
4-2-1 はじめに	51
4-2-2 材料と方法	52
4-2-3 結果	53
4-2-4 考察	55

4-3 捕食に及ぼす照度に関する実験	66
4-3-1 はじめに	66
4-3-2 材料と方法	67
4-3-3 結果	68
4-3-4 考察	68
第5章 総合考察	
5-1 コマツモムシ属による食害	73
5-2 既往の水生昆虫対策とコマツモムシ	75
5-3 種苗生産方法の改善	77
要約	
謝辞	
引用文献	

第1章 諸言

1-1. 途上国における淡水養殖開発

途上国の農山村地域において、淡水養殖は貧困削減や食糧安全保障に大きく寄与する生産活動である (Edwards *et al.* 1997, Edwards 2000, FAO 2000, Ahmed & Lorica 2002, Frankic & Hershner 2002, FAO 2003, 2006)。このような目的で行われる淡水養殖は、養殖業者によって行われる都市部のタンパク質供給を目的とした、大規模な網イケス養殖や地中養殖とは異なり、農家の庭先の池や小規模なため池あるいは水田などを利用して粗放的に営まれる。本論文ではこのような養殖を一括して小規模養殖 (small scale aquaculture) と称する。この小規模養殖は野菜栽培、畜産や果樹などを組み合わせることで循環型生産サイクルを形成し、環境への負荷を最小化しながら、生産を向上させるためのシステムの一部としても営まれる (FAO 2000)。また、このような養殖の普及は、天然魚を乱獲から守る (FAO 2003) ツールとしても有効である。

農山村地域における小規模養殖の普及には種苗の安定的な供給が前提となる (IRRI 2001, Edwards *et al.* 2002, FAO 2007)。しかしながら、本研究の対象国であるラオス民主人民共和国 (以下ラオス) は小規模養殖の普及の前段階として、この種苗の供給に課題を抱えている国のひとつである (FAO 1988, 1998, MRC 2002, Edwards *et al.* 2002, Bush 2003, Choulamany 2005, Vientiane Times 2007)。

1-2. ラオスと種苗生産

ラオスはインドシナ半島の中央部に位置し、人口の 38% が貧困層に属している (World Bank 2006)。そのため、ラオスは国連によって特に開発の

遅れている後発開発途上国に位置付けられている（UN 2010）。ラオスの人口の 77% が農山村地域において稲作を中心とした農業に従事している（World Bank 2006）。従って農山村地域において農業を主体とした村落開発を推進することがラオスの貧困問題解決のための当面の課題である（World Bank 2006）。

ラオス政府は貧困による栄養不良問題（タンパク質摂取の不足）の解決策として、水産物供給量を 2005 年の 10~15kg/人/年から 2020 年までに 22~27kg/人/年へ増やす取り組みを行っている（Department of Livestock and Fisheries 2006）。しかしながら、ラオスの水産物の生産傾向からみると、内水面の漁業生産は既に頭打ちであり、水産物の供給増大のためには、養殖生産の増大が不可欠である（図 1-1）。このような背景から、農山村地域に適合した小規模養殖の普及が求められており、そのカギとなるのが安定的な種苗の供給である。尚、本論文で指す種苗とは、孵化後の全長が約 2~3 cm まで成長した稚魚を指す。

ラオスの小規模養殖農家に対する種苗の供給経路は、1. タイ・ベトナム・中国からの輸入、2. 政府機関による生産と供給、3. 民間の種苗生産業者による生産と販売の 3 つに分類される（図 1-2）（Gupta *et al.* 2000）。このうち 1 の隣国からの輸入種苗は、購入可能な農山村地域が国境周辺に限定されるほか、長距離移動による稚魚の質的劣化（FAO 1999）、国を越えた魚病の感染疾病の持ち込みの危険性等の問題がある（FAO 2002）。2 の政府機関にはラオス農林省畜水産局（Department of Livestock and Fisheries, Ministry of Agriculture and Forestry）、県（province）または郡（district）所轄の養殖センターがある。これらはラオス国内に 34 カ所あるが、施設の規模が小さく生産量が限られている（FAO 1999）うえに、地域的な偏りがあり養殖センターから遠く離れた農山村地域への種苗供給は非常に困難で

ある。3 はこれらと対照的に、各地域に点在する民間の種苗生産者によって種苗が生産されるため、地方の養殖農家にもアクセスが容易である。このことからラオスではこの民間の種苗生産者による種苗生産の増産が期待されている（FAO 1998, 1999）。

ラオスにおいては、1960 年代から FAO をはじめ多くの国や支援団体が政府や民間の種苗生産者に対して種苗生産技術を支援してきた（Gupta *et al.* 2000）。しかしながら、いまだラオス国内の種苗生産量は不安定で、需要を満たす安定的な供給は実現していない（Gupta *et al.* 2000, Edwards *et al.* 2002, FAO 2007, Vientiane Times 2007）。その原因の一つとして、種苗育成池における水生昆虫による種苗の食害が指摘されている（松田 1962, 増尾 1980, Adeyemo *et al.* 1997, Edwards *et al.* 1997, FAO 1998）。既往の研究により、水生昆虫による食害に対する様々な対策が示されており、それらはラオスで普及しているが、水生昆虫による食害を十分に抑制するには至っていない。その原因は、ラオスにおける水生昆虫による食害の実態が十分に把握されないままに、不適切な対策が取られていることにあると考えられる。

1-3. 本研究の目的と構成

そこで本研究ではラオスの農山村地域における、小規模養殖の種苗の主要な食害水生昆虫を明らかにし、それに対する有効な対策を提言することを目的とした。そのために、はじめに種苗生産者に対する聞き取り調査を行った。その結果、ラオスに広く分布するコマツモムシ（Hemiptera: Notonectidae）が多く、種苗生産者に主要な食害昆虫と認識されていることが明らかになった。次に、実際の種苗育成池で給水後に出現する捕食性水生昆虫の調査を行い、コマツモムシが大量に種苗育成池に侵入することを確認した。続いてコマツモムシが実際に稚魚を捕食する様子を室内実験によって観察し、その

捕食行動を明らかにするとともに捕食の被害を推定した。以上の結果をもとに、有効なコマツモムシ属による稚魚の捕食対策を提言した。

本論文は 5 章構成となっている。諸言に引き続き第 2 章では、調査対象地において種苗生産の現場でどのような問題点が認識されているのかを把握するため、ラオス国内の種苗生産者に対して幅広く聞き取り調査を実施した。この種苗生産上の問題点を明らかにするとともに、主要な食害水生昆虫の絞り込みを行った。第 3 章は実際にラオスの種苗育成池で出現する水生昆虫の種類と頻度を調べるために採集調査を実施した。得られた結果から本研究の対象種であるコマツモムシが最も重要な食害水生昆虫であることを確認した。第 4 章は 3 つの室内実験から構成されている。はじめにサイズ比較捕食実験で、コマツモムシによる捕食と稚魚のサイズとの関係性を明らかにした。2 つ目に行動様式観察実験で、コマツモムシがどのように稚魚を捕食するかを観察し、コマツモムシの捕食行動の特徴を考察した。3 つ目に照度比較実験により、コマツモムシによる捕食と照度の関係性からコマツモムシの視覚と捕食行動について考察した。第 5 章ではラオスの種苗生産の現場におけるコマツモムシの被害を推定し、有効な対策を提言するとともに小規模養殖における種苗生産技術開発の方向性を論じた。

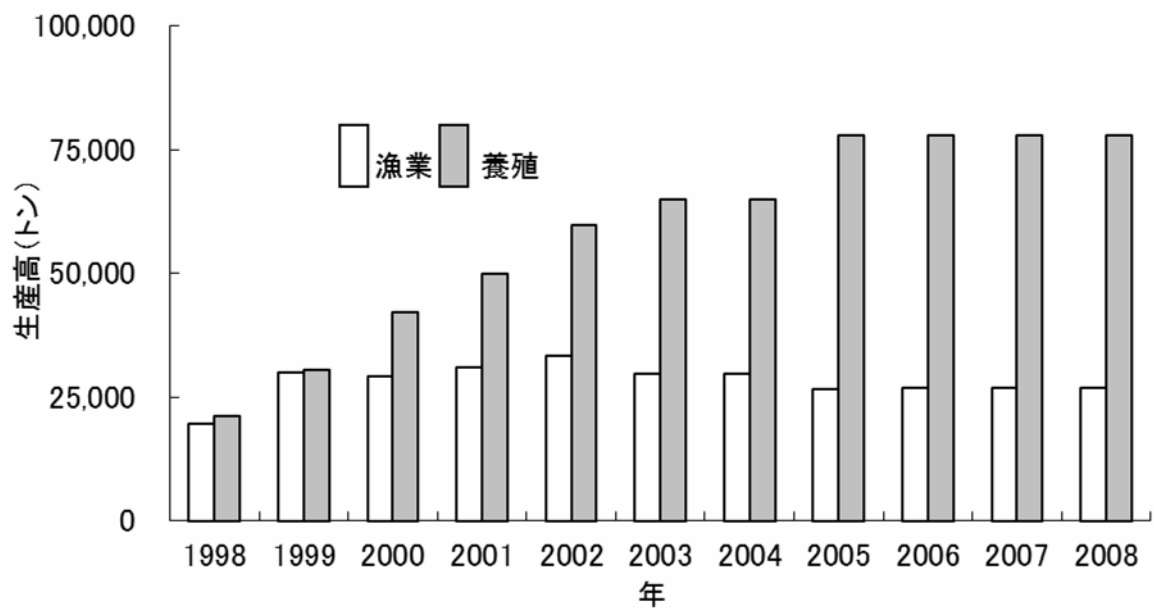


図 1 - 1 . 1998 年から 2008 年までのラオスの漁業生産高と養殖生産高
(FAO 資料より作成) <http://www.fao.org/fishery/statistics/software/fishstat>

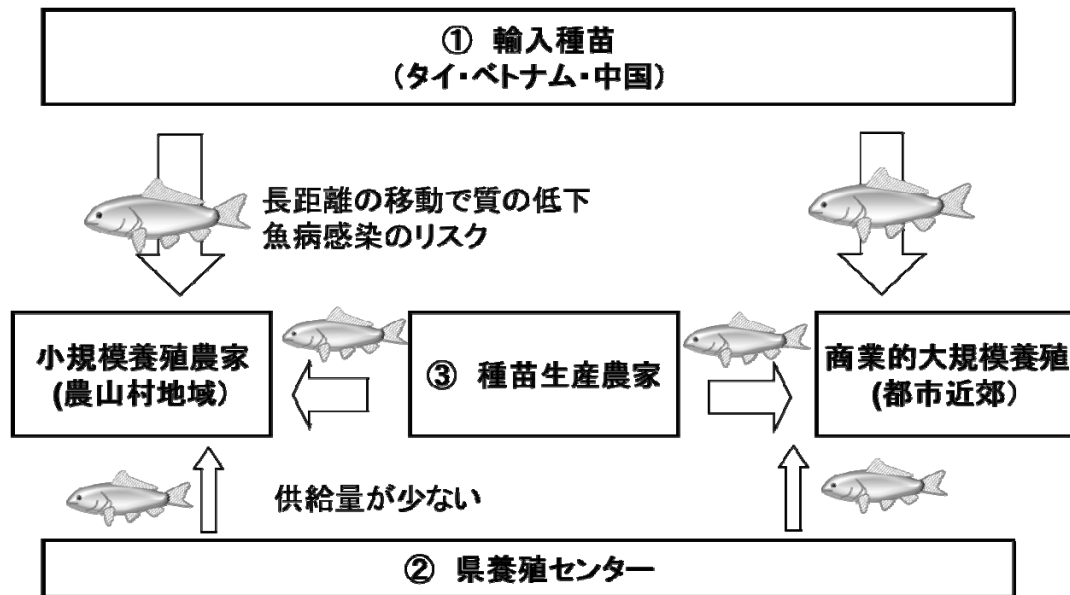


図 1 - 2 . ラオスにおける 3 つの種苗の供給経路

第2章 種苗生産の実態調査

2-1 はじめに

ラオス国内における種苗の供給を改善するには種苗の生産性を向上させることが急務であり、そのためには種苗生産現場で実際に生産性を阻害している要因を把握しなければならない。

これまで養殖技術を指導する現場において、ラオス政府や支援団体は種苗生産者に対してトップダウン式に支援をすることはあっても、現場の問題点を吸い上げるようなボトムアップ式の調査は殆ど実施されたことがない。このため種苗生産者の実態を反映した種苗生産技術の問題点が把握されていない。

本章ではラオスにおける種苗生産の実態を明らかにし、水生昆虫による養殖種苗の食害を含む問題点が現場でどれだけ認識されているのかを把握することを目的として、種苗生産者に対する聞き取り調査を実施した。

2-2 材料と方法

調査は2006年6月から2009年6月にかけて、原則としてラオス農林省畜水産局職員または県郡農林事務所職員を伴い、質問票を用いた聞き取りによって行った。調査対象はラオス国の全県としたが、著者が直接調査を行えない地方については、県郡農林事務所の職員に依頼し、回収した調査結果に不明点があった場合は、県郡の職員に電話等で回答内容を再確認した。調査対象者はラオス国内の養殖種苗の生産者とした。これには民間に属する小規模な種苗生産農家や大規模な種苗生産業者および政府に属する養殖センターや研究センターが含まれる。また、種苗生産の規模により種苗生産農家を以下のように分類した。年間の種苗生産尾数が100,000尾未満の種苗生産農家を小規模種苗生産農家、100,000尾以上1,000,000尾未満を中規模種苗生産農家、そして1,000,000尾

以上を大規模種苗生産農家とした。

質問項目は 1. 種苗生産している魚種、2. 各魚種の年間種苗生産尾数、3. 種苗育成池に放養するまでの各魚種の孵化後日数、4. 放養 45 日後における各魚種の平均生残率、5. 種苗育成池で飼育している間の問題点、とした。また 5. において水生昆虫による食害と回答したものには最も被害の大きい水生昆虫を尋ねた。

2-3 結果

回答件数

調査で得られた総回答数は 58 件で、このうち 25 件は県養殖センターなどの政府機関、残り 33 件は民間の種苗生産者からであった。生産規模からみると、小規模種苗生産農家の数は 17 件、中規模種苗生産農家は 34 件および規模種苗生産農家は 7 件であった。また、ラオス国内 16 県 1 特別市の全てから回答を得ることができた。

取扱い魚種と種苗生産

回答者が種苗生産している魚種は 4 科 15 種で、コイ科 Cyprinidae 9 種、ヒレナマズ科 Clariidae 1 種、シクリッド科 Cichlidae 1 種、パンガシウス科 Pangasiidae 1 種、オスフロネムス科 Osphronemidae 1 種、その他 2 種であった(表 2-1)。取扱いが最も多いのは *Cyprinus carpio* で、全回答者のうち 91.4% が取り扱っていた。次に *Barbonymus gonionotus* が 84.5%、*Oreochromis niloticus* 72.4%、*Cirrhinus cirrhosis* 67.2%と続いた。回答者の年間総種苗生産尾数は合計 53,433,462 尾で、1 生産者あたりの平均種苗生産数は 989,509 尾/年(±2,987,317, 標準偏差)であった(n=54)。このうち魚種ごとに年間生産尾数が確認できたのは合計 23,484,637 尾(44.0%)であった(表 2-2)。こ

れによると *O. niloticus* の生産尾数が最も多く約 5,950,000 尾で 25.4%、次いで *C. carpio* が約 4,640,000 尾で 19.8%、*B. gonionotus* が約 4,470,000 尾で 19.0%、*Clarias batrachus* が約 3,200,000 で 13.6%と続いた。

これらの結果から、ラオスにおいてコイ科 3 種 (*B. gonionotus*, *C. carpio*, *C. cirrhosus*)、*C. batrachus* および *O. niloticus* の種苗生産が広く普及していることが判る。

種苗生産の方法は各科によって異なるが、同一の科においては、どの生産者も共通した方法を用いている。コイ科 3 種の方法は施設内で育成した親魚にホルモン剤を注射して成熟と排卵を促し、搾出法か自然採卵法によって採卵する。孵化は小型のコンクリート製水槽や目合いの細かいネットを用いて行う。孵化数日後、孵化仔魚を野外の素掘り池（種苗育成池）に放養する。種苗生産者は放養から約 45 日後に種苗として販売する（図 2-1）。

C. batrachus はホルモン剤を注射して成熟と排卵を促す。その後、雄から精巢を切り出し、雌は卵を搾出して乾導法による人工授精を行う。受精卵はコンクリート製の水槽もしくは木枠にビニールシートをかけた簡易水槽で孵化させ 1 か月ほど育成したあと大きめのコンクリート水槽（約 1~4 m²）や池に張った網イケスで体長約 2~3 cm まで育成して販売する。

O. niloticus には 2 種類の種苗生産の方法がある。1 つは親魚を雌雄混合で同じ養殖池に放して自然産卵させる。そして、この池で定期的に網を引いて稚魚だけを取り上げて販売する方法である。2 つ目は網イケスやコンクリート水槽に親魚を混合で飼育し、定期的に雌を捕獲して口腔内に保護している受精卵を強制的に吐き出させる。この受精卵を小型の金属トレー（約 30×30 cm）や孵化ボトルで孵化させる方法である。ラオスでは前者が一般的である。

放養までの日数

孵化した稚魚を種苗育成池に放養するまでの日数を各魚種でまとめた。ここではコイ科の主要 3 種について述べる。全体として孵化後日数は 4.0 日から 5.7 日までであった（表 2・3）。*B. gonionotus* の放養までの日令は平均 4.1 日（ ± 2.23 , 標準偏差 $n=23$ ）、*C. carpio* は 4.9 日（ ± 3.28 , $n=27$ ）、*C. cirrhosus* は 5.0 日（ ± 5.03 , $n=20$ ）であった（表 2・3）。

各魚種の平均生残率

各魚種の稚魚を育成池に放養してから 45 日後の生残率をまとめた（表 2・4）。ここではコイ科主要 3 魚種について述べる。*C. carpio* は 29.8%（ ± 21.54 , $n=46$ ）、*B. gonionotus* は 23.2%（ ± 19.51 , $n=45$ ）また *C. cirrhosus* は 35.1%（ ± 23.24 , $n=33$ ）であった（表 2・4）。

種苗生産時における問題点

種苗生産者が現場で認識している、稚魚を育成池に放養してからの問題点をまとめた（表 2・5）。これによると、水生昆虫による稚魚の捕食を問題として認識している回答者は全体の 87.9%であり、最も多く回答された。これに続き、水質の悪化（50.0%）、天然魚による捕食（41.4%）が問題として認識されていた。育成池の問題点として、水生昆虫や天然魚による食害が多い傾向にあった。

次にこれらの問題点を、種苗生産者の地域ごとに割合で示した（図 2・2）。これによると北部地域（6 県）、中央地域（5 県 1 特別市）また南部地域（5 県）の間に大きな傾向は認められなかった。さらに政府施設と民間種苗生産者の間での比較（図 2・3）や、生産高を基準とした小規模生産者、中規模生産者また大規模生産者の間での比較（図 2・4）を行った結果、いずれにしても問題点の傾向に大きな差は認められなかった。これから水生昆虫による食害はラオス国全域において共通している問題であることが判る。

さらに、どの水生昆虫が最も問題かを聞き取りした結果、マツモムシが 49 件（44.5%）と半数近くを占め、ゲンゴロウ幼虫 24 件（21.8%）、オタマジャクシ 18 件（16.4%）と続いた（表 2-6）。この結果から、稚魚を捕食する水生昆虫として、マツモムシの被害が最も大きいと認識されていることが確認できた。

2-4 考察

回答件数

本調査ではラオス国内の種苗生産者から幅広く情報収集を行った。ラオスで種苗を生産している政府施設は 34 カ所（Department of Livestock and Fisheries 2006）あり、本調査で政府施設は 25 カ所（73.5%）から聞き取りを行った。民間の種苗生産者の全数は把握できなかった。2004 年のラオスの国内総種苗生産尾数は 305,000,000 尾であり（Department of Livestock and Fisheries 2004）、全回答者の種苗生産尾数は 53,400,000 尾であることから、今回の調査で把握できたのは国内の総生産数の 17.5%に過ぎない。しかしながら、ラオスには年間約 200 万尾の種苗が隣国から輸入されていると言われ（Vientiane Times 2007）、この国内総生産尾数には輸入種苗が含まれている可能性がある。またビエンチャン市には大規模な種苗生産業者が集中しており、全回答者の種苗生産尾数の 68.7%はビエンチャン市内の 4 つの生産業者が占めていた。回答の傾向を種苗生産尾数で重みづけすると、ビエンチャン市内の民間生産者の回答が集計結果に大きく反映される。しかしながら、本章の目的は種苗生産者の実態の解明であることから、ここでは種苗生産尾数にかかわらず小規模の種苗生産農家も 1 件の回答として採用した。

取扱い魚種と種苗生産尾数

種苗生産対象魚種と生産尾数の結果からコイ科では *Barbonymus gonionotus*、*Cyprinus carpio* および *Cirrhinus cirrhosus* の 3 魚種が主要であった（表 2-2）。この結果はラオス南部サバナケット県で養殖農家を対象に実施した調査と同様の傾向を示している（Bush & Kosy 2007）。この 3 魚種の採卵方法はホルモン打注を介した自然採卵法や搾出法であるため、種苗の大量生産が計画的におこなえる。また *B. gonionotus* の採卵時期は 3 月から 7 月、*C. carpio* は 3 月から 8 月、*C. cirrhosus* は 5 月から 7 月（FAO 1998）で、これらの魚種は採卵後約 1 か月半で販売サイズに成長する。これは雨期開始直後に種苗の販売が可能となることを意味する。そのため養殖池を雨水に依存する養殖農家は、養殖池に水が溜まる時期に、タイミング良く 3 魚種を購入することができる。また在来種である *B. gonionotus*（Bush & Kosy 2007）は、養殖魚よりも天然魚種を好むラオス人の嗜好に合うこと、雑食性（Osse & Boogaart 2000）で餌の調達が容易なことが養殖農家にとって魅力である。種苗生産者にとっては雌の放卵数が kg あたり 320,000 粒（FAO 1998）と養殖対象魚種の中でも多いため、親魚の保有尾数が少なくて済むこと、さらに僅か 1 年で親魚として成熟する（加福 1984, FAO 1998）ことが人気の高い要因であろう。*C. cirrhosus* はインドからビルマに分布する外来種であるが（加福 1984）、雑食性で成長も早く 1 年で 1 kg に達することもある（加福 1984）。*C. carpio* は、我が国にも生息するいわゆるコイであり、元来東南アジアには分布していない外来種（加福 1984）であるが、環境変化に対する耐性が強く 1 年で成熟する（加福 1984, FAO 1998）などの利点をもつ。さらに種苗生産者によると上記 3 種は一般的に使用される成熟ホルモン剤（Suprefact）が効きやすく、*B. gonionotus* と *C. carpio* は親魚が十分に成熟していれば採卵にホルモン打注を必要としないということであった。このように、成長や成熟が早いこと、採卵が容易であることが取扱い件数や生産尾数の増加に関連していると考えられた。

中国ゴイ 3 種 (*Hypophthalmichthys molitrix*, *Hypophthalmichthys nobilis*, *Ctenopharyngodon idella*) の取扱い件数は全体からみて 17.2% から 31.0% (表 2-1) であるが、生産尾数は全体の 5% にも満たない (表 2-2)。これら 3 種はそれぞれ植物プランクトン食性、動物プランクトン食性および草食性 (加福 1984) のため、家畜の糞による施肥などで湧く天然餌料で育成することができる。しかしながら、この 3 種は成熟まで 2 年以上要し、聞き取り調査によると成熟ホルモン剤の効きが悪いことが指摘されている。これらが、種苗生産者に敬遠されている理由と考えられた。

インドゴイと呼ばれる 3 種 (*Catla catla*, *Labeo rohita*, *C. cirrhosus*) のうち *C. cirrhosus* を除く 2 種の取扱い件数と生産数は少ない (表 2-1、表 2-2)。この 2 種は成熟まで 2 年以上を要し、生息域が池の下層にある *C. cirrhosus* と異なり中層 (加福 1984) であることから同層に生息する *B. gonionotus* や *O. niloticus* と比較すると種苗生産の利点が少ないことが原因と考えられた。

Clarias batrachus も取扱い件数が多く生産高が多い (表 2-1、表 2-2)。この魚種の英名は Walking catfish で胸鰭を使って陸を歩くことに由来しており (Rainboth 1996)、迷宮器官を使い空気呼吸ができる。このため素掘りの池では逃亡することが多く、網イケスやセメント水槽を用いた小規模で集約的な養殖方法が一般的で、餌はタンパク質含量の高い配合餌料が用いられる。そのため農山村地域よりも市街地周辺で盛んに養殖され、種苗生産者も市街地周辺に多く、種苗生産尾数 (3,202,044 尾) のうち、ビエンチャン市内の 2 つの種苗生産者が全体の 78.1% (2,500,000 尾) を占めていた。

以上のことから、*B. gonionotus*, *C. carpio* および *C. cirrhosus* の 3 種が効率的に種苗生産できる魚種として、種苗生産者に広く好まれているものと考えられた。

放養までの日数と 45 日後の平均生残率

育成池に放養するまでの日数に関しては、20 件以上の生産者から回答を得ることができた 3 魚種 (*B. gonionotus*, *C. cirrhosus*, *C. carpio*) のみについて考察する。聞き取り調査時、ほとんどの種苗生産者は記録などを確認せずに回答していた。したがって、この平均生残率は定量的な数値ではなくおおよその推測値である。そのため、ラオスにおける従来の調査では、種苗の平均生残率は約 7-10% (Gupta *et al.* 2000) といわれるのに対し、今回種苗生産者が回答した値はやや高い値であった。

コイ科魚類は一般的に孵化してから約 7 日後に育成池へ放養する (FAO 1998) が、*C. carpio* はこれより 2.1 日早く放養しており、*C. cirrhosus* は 2.0 日また *B. gonionotus* は 2.9 日早く放養している (表 2-3)。平均生残率は放養の早い *B. gonionotus* の平均生残率が 3 種の中で最も低い。

近縁種の情報から、*B. gonionotus* の孵化直後の体長は約 2.0 mm (Ogata *et al.* 2010) で、*C. carpio* の 5.0~6.0 mm (隆島 & 村井 2005) と比べて非常に小さい。また孵化後 4 日目では卵黄吸収の直後であり (Ogata *et al.* 2010)、まだ十分な摂餌能力や捕食者から逃れるための遊泳力はない。したがって、野外の種苗育成池への放養は、もう少し成長してからおこなうことが望ましい。しかしながら、*B. gonionotus* の放卵数は雌 1 kg あたり 320,000 粒と *C. cirrhosus* の 110,000 粒/kg や *C. carpio* の 80,000 粒/kg と比べてはるかに多い (FAO 1998)。このことから、種苗生産者は *B. gonionotus* の種苗育成は多産多死型であっても 45 日目後に得られる個体数が多いことから満足していると推測される。

C. cirrhosus と *C. carpio* の放養する孵化後日数は殆ど同じであるが、平均生残率は *C. cirrhosus* の方が 6% ほど高くなっている。孵化の速度からみると、水温 27 度において *C. cirrhosus* は 15 時間かかるのに対し (Bardach *et al.* 1972)、*C. carpio* は 54 時間である (FAO 1998)。これから *C. cirrhosus* は孵

化までの時間が *C. carpio* より 1 日半早く、この間に発達が進むことで初期減耗が減少し *C. carpio* よりも平均生残率が高くなっていると考えられた。

以上から、孵化後 45 日目の平均生残率の増減要因の一つとして放養時の稚魚の発達段階が影響していることが考えられた。

種苗育成における問題点

稚魚の放養後における生残率の制限要因として食害（水生昆虫による捕食、天然魚による捕食）、天然餌料の有無（天然餌料の不足）、水質（水質の悪化、酸素不足）が挙げられた。この中で食害に対する関心が種苗生産者の間では最も高いことが判った。

従来から養殖池の魚を捕食する生物として鳥類、両生類、爬虫類または水生昆虫などが挙げられ、水生昆虫が最も危険であるといわれている（Brown & Gratzek 1980）。マツモムシは捕食性で淡水域において、ワムシから稚魚まで様々な水生生物を捕食する（*e.g.* Gorai & Chaudhuri 1962, Murdoch *et al.* 1984, Blaustein 1998, Hampton and Gilbert 2001, Saha *et al.* 2007）。また既往の実験により種苗育成池や孵化槽で稚魚を捕食することも確認されている（Gorai & Chaudhuri 1962, Brown & Gratzek 1980, Michaels 1988, Pillay 1990）。Gonzalez & Leal 1995 は、被食者としてコイの稚魚を、捕食者としてトンボ科幼虫、イトトンボ科幼虫、ガムシ幼虫、マツモムシ科、ミズムシを用い捕食の比較実験をしたところ、マツモムシ科はトンボ科幼虫と並んで捕食個体数が多いことを示し、種苗生産時期においてはこのマツモムシの制御が重要であることを示唆した（Gonzalez & Leal 1995）。ラオスにおいては、マツモムシ科コマツモムシ属が 4～10 月に出現するが（Heckman 1974）、この出現時期は種苗生産の時期と重なっている。このためコマツモムシ属が食害昆虫である可能性は極めて高い。

しかしながら、ラオスにおいてコマツモムシ属が稚魚の個体群を顕著に減少させるほど捕食している十分な証拠は示されていない。聞き取り調査結果に関しても、実際は水質管理や天然餌料を湧かす技術が不足していることを、水生昆虫の食害という問題に責任転嫁しているという指摘もある。したがって、コマツモムシ属が実際に種苗生産に大きな被害を与えているか否かを実証的に明らかにする研究が必要である。

まとめ

本章の結果からラオスにおける種苗生産の安定化のためには優先順位として *B. gonionotus*, *C. cirrhosus* および *C. carpio* を研究対象とし、種苗育成池に出現するコマツモムシ属の種苗の捕食に関する実態を明らかにすることが重要であることが示唆された。

表 2 - 1 . 種苗生産者の取扱い魚種とその割合 (多重回答)

科 名	学 名	英 名	件数	回答数に対する割合(%)	回答件数に対する割合(%)
Cyprinidae	<i>Barbonymus gonionotus</i>	Java carp	49	17.0%	84.5%
	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	Grass carp	15	5.2%	25.9%
	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Silver carp	18	6.2%	31.0%
	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	Bighead carp	10	3.5%	17.2%
	<i>Cyprinus carpio</i>	Common carp	53	18.3%	91.4%
	<i>Catla catla</i>	Catla	4	1.4%	6.9%
	<i>Labeo rohita</i>	Rohu	23	8.0%	39.7%
	<i>Cirrhinus cirrhosus</i>	Mrigala	39	13.5%	67.2%
	<i>Cirrhinus molitorella</i>		2	0.7%	3.4%
Clariidae	<i>Clarias batrachus</i>	Walking catfish	29	10.0%	50.0%
Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilapia	42	14.5%	72.4%
Pangasiidae	<i>Pangasius micronema</i>		2	0.7%	3.4%
Osphronemidae	<i>Osphronemus</i> sp.	Gourami	1	0.3%	1.7%
Other species			2	0.7%	3.4%
合 計			289	100.0%	498.3%

表 2 - 2 . 各魚種の生産尾数と割合

科 名	学 名	英 名	件数	生産尾数	生産尾数 割合(%)
Cyprinidae	<i>Barbonymus gonionotus</i>	Java carp	49	4,470,326	19.0%
	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	Grass carp	15	368,500	1.6%
	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Silver carp	18	1,052,640	4.5%
	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	Bighead carp	10	70,000	0.3%
	<i>Cyprinus carpio</i>	Common carp	53	4,638,940	19.8%
	<i>Catla catla</i>	Catla	4	50,000	0.2%
	<i>Labeo rohita</i>	Rohu	23	1,035,000	4.4%
	<i>Cirrhinus cirrhosus</i>	Mrigala	39	2,634,781	11.2%
	<i>Cirrhinus molitorella</i>		2	7,900	0.0%
Clariidae	<i>Clarias batrachus</i>	Walking catfish	29	3,202,044	13.6%
Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilapia	42	5,954,506	25.4%
Pangasiidae	<i>Pangasius micronema</i>		2	—	—
Osphronemidae	<i>Osphronemus</i> sp.	Gourami	1	—	—
Other species			2	—	—
合 計			289	23,484,637	100.0%

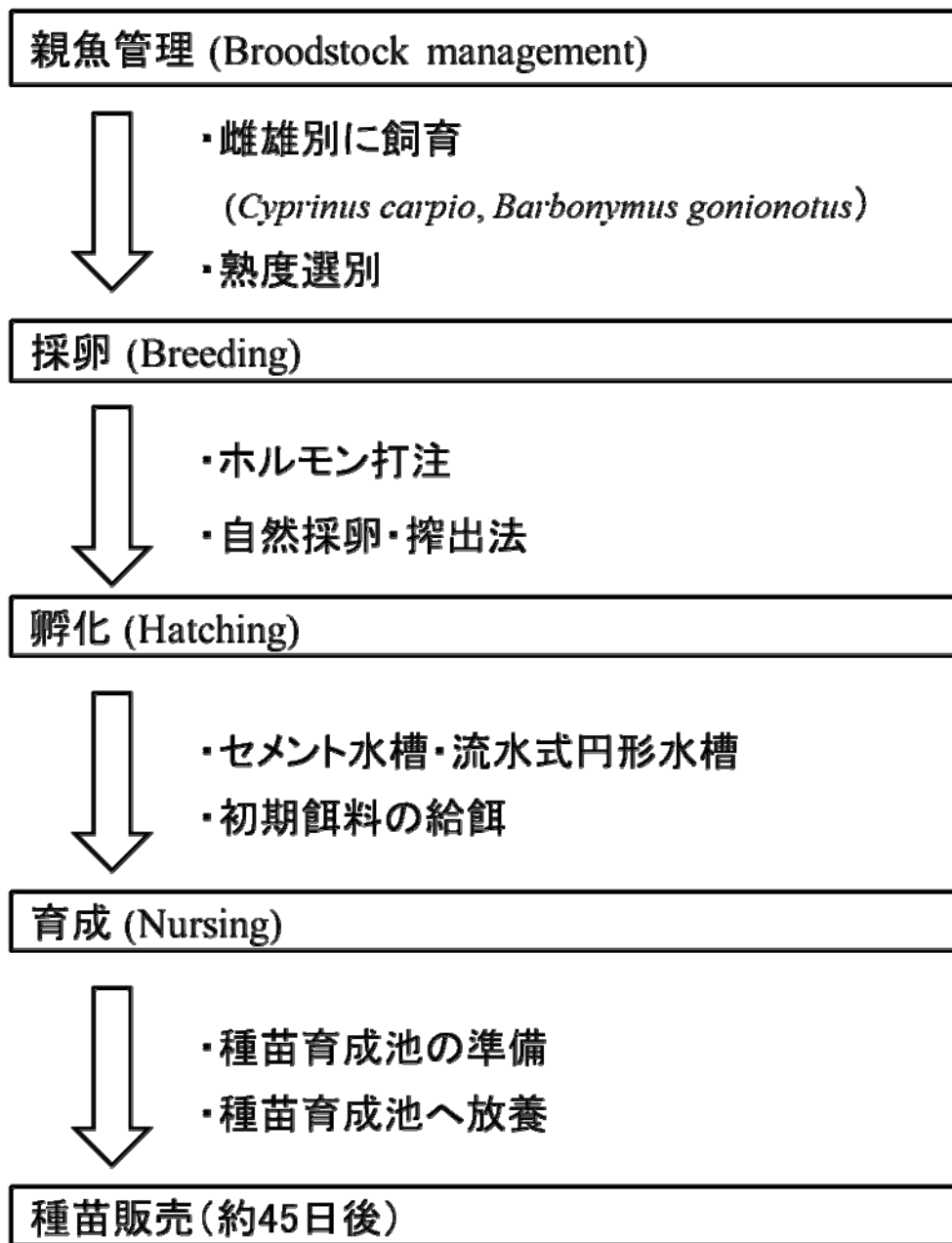


図 2 - 1 . コイ科魚類の種苗生産の工程

表 2 - 3 . 種苗生産者における各魚種を育成池に放養するまでの平均孵化後
日数

科 名	学 名	英 名	孵化後日数 (±標準偏差)		サンプル数 (n)
Cyprinidae	<i>Barbonymus gonionotus</i>	Java carp	4.1	± 2.23	23
	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	Grass carp	5.5	± 7.00	7
	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Silver carp	5.4	± 1.36	6
	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	Bighead carp	5.3	± 2.08	3
	<i>Cyprinus carpio</i>	Common carp	4.9	± 3.28	27
	<i>Catla catla</i>	Catla	5.7	± 4.37	6
	<i>Labeo rohita</i>	Rohu	4.2	± 1.41	8
	<i>Cirrhinus cirrhosus</i>	Mrigala	5.0	± 5.03	20
	<i>Cirrhinus molitorella</i>		4.0		1
Clariidae	<i>Clarias batrachus</i>	Walking catfish	5.7	± 4.37	6
Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilapia	9.5	± 7.78	2
Pangasiidae	<i>Pangasius micronema</i>		3.0		1

表 2 - 4 . 種苗育成池に放養してから 45 日後の各魚種の平均生残率

科 名	学 名	英 名	45日後の生残率(%) (±標準偏差)		サンプル数 (n)
Cyprinidae	<i>Barbonymus gonionotus</i>	Java carp	23.2	± 19.51	45
	<i>Ctenopharyngodon idella</i>	Grass carp	30.6	± 25.96	10
	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Silver carp	27.0	± 20.21	12
	<i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	Bighead carp	20.1	± 10.58	6
	<i>Cyprinus carpio</i>	Common carp	29.8	± 21.54	46
	<i>Catla catla</i>	Catla	70.0		1
	<i>Labeo rohita</i>	Rohu	31.7	± 20.10	15
	<i>Cirrhinus cirrhosus</i>	Mrigala	35.1	± 23.24	33
	<i>Cirrhinus molitorella</i>		20.8	± 0.00	2
Clariidae	<i>Clarias batrachus</i>	Walking catfish	35.1	± 26.73	13
Cichlidae	<i>Oreochromis niloticus</i>	Tilapia	41.7	± 28.06	10
Pangasiidae	<i>Pangasius micronema</i>		8.0		1

表 2 - 5 . 種苗生産者が回答した種苗育成池における

問題点 (多重回答)

問 題 点	回答件数 (割合%)		回答者数に 対する割合
水生昆虫による捕食	51	(30.5%)	87.9%
水質の悪化	29	(17.4%)	50.0%
天然魚による捕食	24	(14.4%)	41.4%
酸素不足	20	(12.0%)	34.5%
天然餌料の不足	20	(12.0%)	34.5%
稚魚による共食い	16	(9.6%)	27.6%
その他*	7	(4.2%)	12.1%
合 計	167	100.0%	287.9%

*:アオミドロの発生、アヒル・ヘビ・カエルによる食害、魚病。

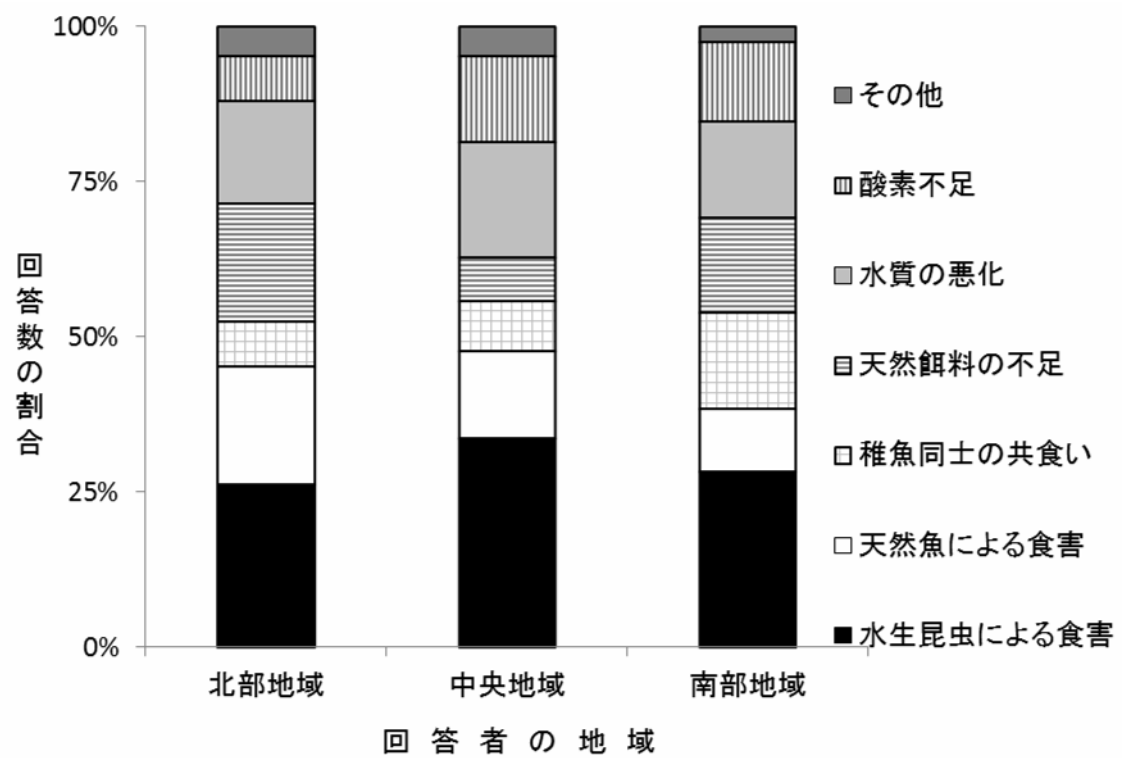


図 2-2. ラオスの各地域における各問題点の回答傾向

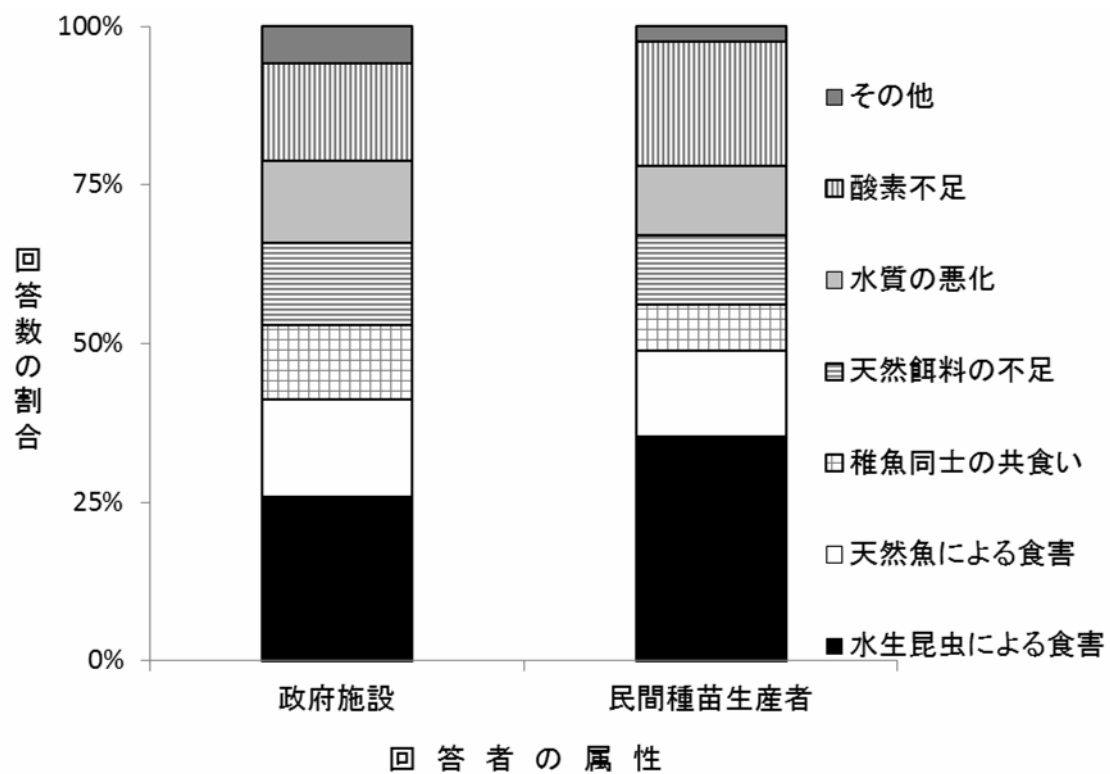


図 2 - 3 . 政府施設と民間種苗生産者における各問題点の回答傾向

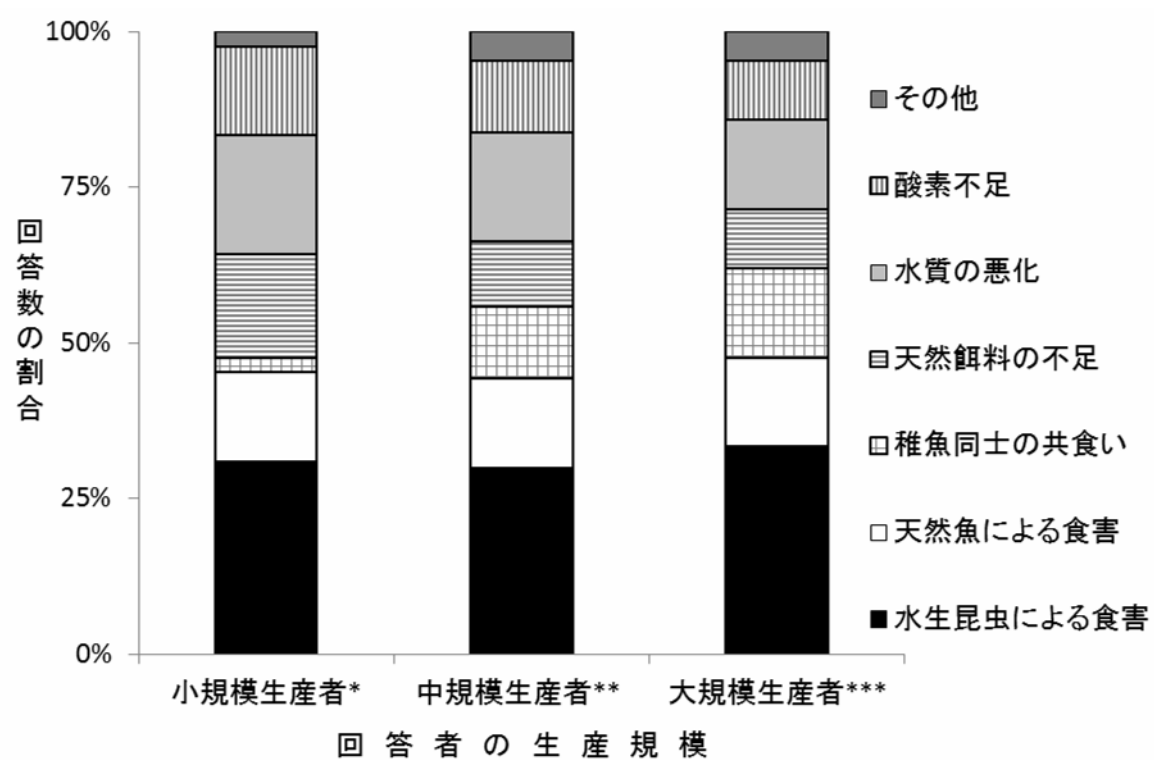


図 2 - 4 . 種苗の生産規模による各問題点の回答傾向

(* : 年間種苗生産高 100,000 尾未満、** : 年間種苗生産高 100,000

以上 1,000,000 未満、*** : 年間種苗生産高 1,000,000 尾以上)

表 2 - 6 種苗生産者が回答した最も被害の多い水生昆虫の

件数とその割合 (n=50, 多重回答)

水生昆虫の種類		回答件数 (割合%)	
マツモムシ	Backswimmer	49	(44.5%)
ゲンゴロウ幼生	Dragonfly larvae	24	(21.8%)
オタマジャクシ	Tadpole	18	(16.4%)
ヤゴ	Diving beetle larvae	13	(11.8%)
タガメ	Giant water bug	6	(5.5%)
合	計	110	100.0%

第3章 種苗育成池に出現する水生昆虫

3-1 はじめに

第2章の結果、コマツモムシ属による食害は種苗の生残率を下げる要因として、種苗生産者に強く認識されていることが明らかになった。

多様な自然環境をもつラオスの農山村地域では、水田やその周辺環境に様々な水生昆虫が出現する（Heckman 1974, Schiller *et al.* 2006, 自然環境センター 2008, 2009）。種苗生産池はこのような環境下にあるため、水生昆虫が種苗育成池へ侵入する可能性は高い。さらに種苗育成池の準備段階において、稚魚の初期餌料としてプランクトン類を湧かせるが、これは水生昆虫の餌にもなる。魚類といった大型の捕食生物がいない種苗育成池は稚魚のみならず水生昆虫にとっても好条件な生息場といえる。

この特異な生態系をもつ種苗育成池に出現する水生昆虫相に焦点を当てた知見はない。前章ではほとんどの種苗生産者は水生昆虫が養殖池内に侵入していることを示唆しているが、これは種苗生産者が受けた印象であり正確な実態を反映していない。

そこで本章ではラオス国ビエンチャン市において採集調査を実施し、種苗育成池に出現するマツモムシ科をはじめとした捕食性水生昆虫の種類と生物量を把握し、各々の水生昆虫の出現傾向と生態的特徴を検討した。

3-2 材料と方法

調査時期と対象地

採集調査は、2007年8月7日から8月13日まで、2007年9月22日から9月28日まで、2009年8月20日から8月26日までの各々7日間連続して実施した。この季節は現地で種苗育成が活発に行われている。調査対象地はラオス

のビエンチャン市中心地から北へ約 40 kmにあるナーサイトン郡に位置する Namxouang Aquaculture Development Center（以下、NADC）（図 3-1）の種苗育成池である。

調査方法

採集対象とした種苗育成池の面積は 600 m²（縦 20m、横 30m、深さ約 1m）で、ラオスの種苗生産池としては一般的なサイズである（図 3-2）。調査を行うにあたり、ラオスの種苗生産農家が通常行っている方法を用い、一度池を干した後、数日おいてから注水を開始した。注水時には捕食者を排除する一般的な方法として目合い約 1mm のモスキートネットでスクリーニングし、これによって水路から水生昆虫や天然魚の侵入を防いだ。水生昆虫の採集は池への注水 3 日後から開始した。採集は毎日正午に実施した。採集には目合い 750 μ m で一辺 50 cm のすくい網を用い池の中心部から池際に向かい 1m 曳いた（図 3-2）。採取した水生昆虫は捕食性水生昆虫のみ選抜し 90% アルコールで保存した。科や種の同定は既往の文献 (Brooks 1951, 津田 1962, William & Feltmate 1992, Nieser 1998, 西田ら 2003, 川合 & 谷田 2005) に従った。各科の出現個体数を数え、湿重量を小数点第 3 位まで秤量した。3 回の調査（7 日間）で採集した各捕食性水生昆虫の総個体数と総重量の平均値を平均出現個体数と平均湿重量として示した。またマツモムシ科については成虫と幼虫に分けてその出現個体数を数えた。

3-3 結果

出現水生昆虫と個体数

採集調査の結果、合計 1450 個体 8 科の捕食性の水生昆虫を同定した。イトトンボ科 (Coenagrionidae) は調査 1 回（7 日間）あたりの平均出現個体数は

239.0 個体 (㎡あたり 478.0 個体) で全体数の 49.4%を占めた。イトトンボ科の全ての個体は幼虫であった。トンボ科 (Libellulidae) は平均 9.0 個体 (㎡あたり 18.0 個体) で全体の 1.9%を占め、全て幼虫であった。マツモムシ科 (Notonectidae) は 91.7 個体 (㎡あたり 183.3 個体) で全体の 19.0%を占め、成虫と幼虫が混在していた。アメンボ科 (Gerridae) は 26.3 個体 (㎡あたり 52.7 個体) で 5.4%を占め、成虫と幼虫が混在していた。ゲンゴロウ科 (Dytiscidae) は 97.3 個体 (㎡あたり 194.7 個体) で 20.1%を占め、全て幼虫であった。ガムシ科 (Hydrophilidae) は 19.3 個体 (㎡あたり 38.7 個体) で 4.0%を占め、全て幼虫であった (表 3-1)。

主要 4 科の出現パターンを時系列的にみると平均個体数が最も多かったイトトンボ科は採集第 4 日目 (注水後 7 日目) から出現個体数が急激に増加し、他の科は後半にかけて徐々に個体数が増加する傾向にあった (図 3-3)。

湿重量

採集した捕食性水生昆虫の総湿重量は 13.802g であった。イトトンボ科の調査 1 回あたりの平均湿重量は 0.322 g (㎡あたり 0.644g) で全体の 14.0%を占めた。トンボ科は 0.348 g (㎡あたり 0.697g) で全体の 15.1%、マツモムシ科は 0.987 g (㎡あたり 1.975g) で最も多く、全体の 42.9%と半分近くを占めた。ゲンゴロウ科は 0.456 g (㎡あたり 0.913g) で 19.8%であった (表 3-2)。主要 4 科の出現を時系列的にみるとマツモムシ科は採集調査初日から卓越していたが、他の水生昆虫は調査後半に生物量が増加していた (図 3-4)。

マツモムシ科

採集されたマツモムシ科 274 個体のうち全てがコマツモムシ属 (*Anisops*)

であった。さらに成虫と幼虫の個体数と生物量を比較すると、個体数は成虫 194 個体 (70.5%) で幼虫は 81 個体 (29.5%)、生物量は成虫が 0.804g (95.1%) で幼虫は 0.041g (4.9%) であった。Student's *t* test の結果、コマツモムシ属の成虫と幼虫の 1 日当たり平均出現数は成虫の数が有意に多く認められた ($t(40) = 2.23, p < 0.05$)。またコマツモムシ幼虫の出現個体数のうち 84.0% ($n=81$) は採集調査後半の 5 日目から 7 日目までの 3 日間に出現していた。さらに、コマツモムシ属の成虫と幼虫の生物量および出現パターンを示した (図 3-5)。これによると成虫は前半から卓越しており、幼虫は後半から生物量が増加している。コマツモムシ属成虫の 1 日当たり平均出現個体数は m^2 あたり 18.5 個体であった。またコマツモムシ属成虫のうち 135 個体 (69.6%, $n=194$) は *Anisops bouvieri* と同定された。

3-4 考察

捕食性水生昆虫の出現状況

イトトンボ科幼虫、ガムシ科幼虫またはゲンゴロウ科幼虫の生物量は調査期間の後半に増加傾向を示した (図 3-4)。特にイトトンボ科はラオスの水田域に多く出現することが知られている (Schiller *et al.* 2006)。この科は水生植物内に産卵するため、水生植物の有無がこの科の幼虫の存在を決定する (Marco *et al.* 1999)。すなわち、イトトンボ科は種苗育成池に多数出現するものと考えられるが、養殖池を干すことや、注水前に水生植物を完全に排除することで、この科の発生を防ぐことができる。さらに飛翔能力がない上記 3 科の幼虫は、水を媒介して侵入するので、注水時のスクリーニングで防除が可能である。しかしながら、今回の採集調査では、水生植物の排除が完全に行われていなかったため、残った水生植物に産みつけられていた卵から幼虫が孵化し、調査後半にその生物量が増加したものと考えられた。コマツモムシ属以外の半翅目

(Hemiptera) のタイコウチ科 (Nepidae)、コオイムシ科 (Belostomatidae) またアメンボ科 (Gerridae) は生物量が少なく無視できる範囲であった。

採集調査期間中のコマツモムシ属の出現個体数には変動があったが、その出現生物量は採集日の 1 日目から卓越していた (図 3・4)。調査した池は採集前に水抜きをして干してあり、一旦すべてのコマツモムシ属を含む水生昆虫は排除されている。またコマツモムシ属は孵化から成虫に達するには 2 か月を要する (Brooks 1951) ため、調査池で採集したコマツモムシ属の成虫は調査前から池に生息していたものではなく、採集期間中に孵化して成長したものでもない。このため、採集されたコマツモムシ属成虫は他の水域から飛来してきたものと考えられた。また、コマツモムシ属の幼虫が後半に多く確認されたことは、イトトンボ科と同じように水生植物に付着した卵が乾燥に耐えて孵化したものと考えられた。

まとめ

本章では種苗育成池にコマツモムシ属の成虫が注水後の早い段階から卓越していることが明らかになった。この理由としてコマツモムシ属が注水後、他の生息域から飛来していることが示唆された。そこで次章では対策を講じる基礎情報としてコマツモムシ属の行動様式を観察し、稚魚の条件と環境を変化させることでコマツモムシ属の捕食状況を考察する。

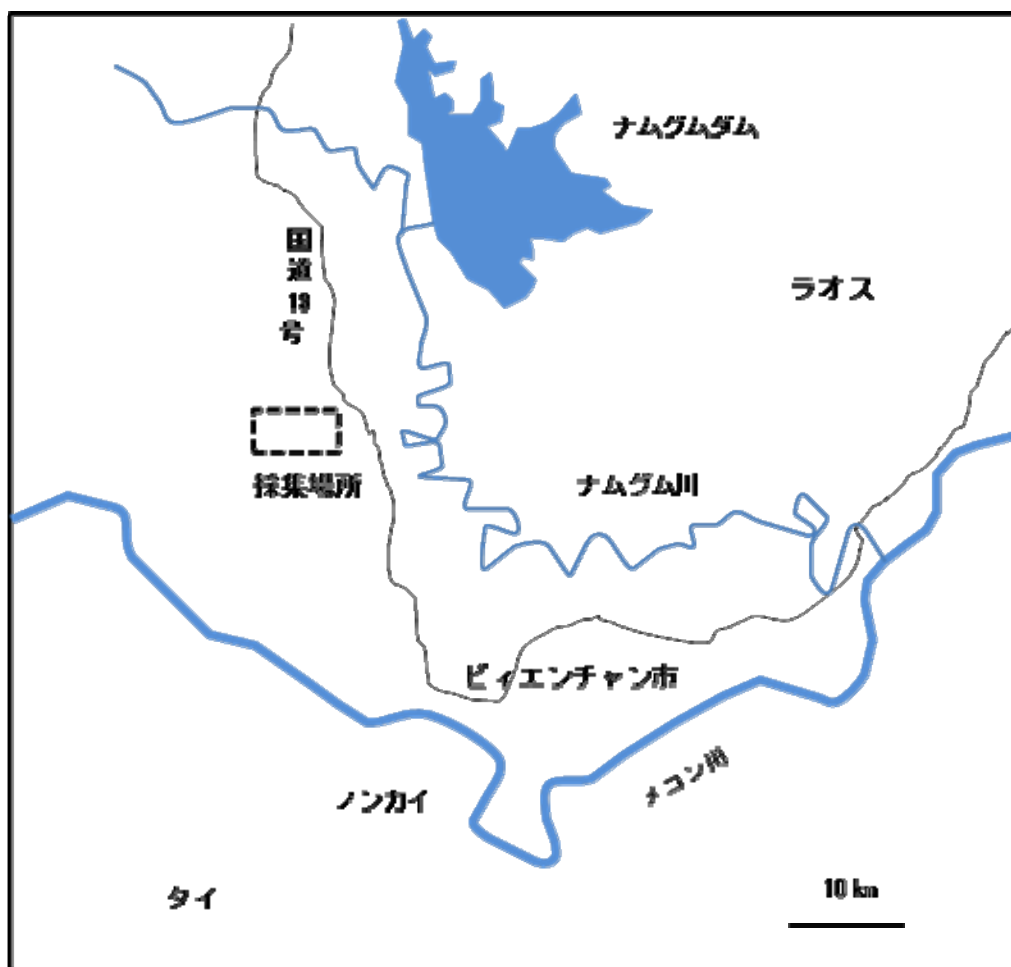
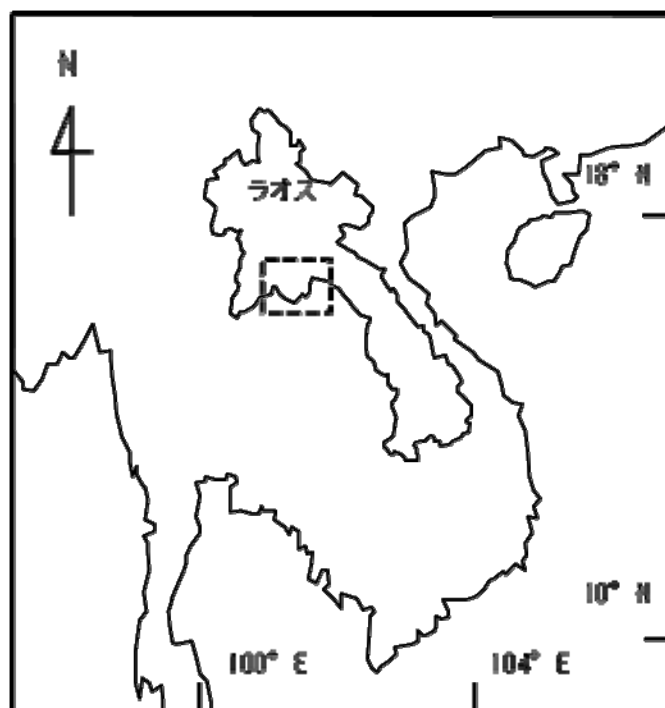


図 3 - 1 . 採集調査地点（ビエンチャン市ナムスワン）



図 3 - 2 . 採集調査の写真

上の写真:採集調査を行った種苗育成池

下の写真:すくい網で採集しているところ

表 3 - 1 . 種苗育成池に出現した捕食性水生昆虫の 1m²あたりの平均個体数(±標準偏差) と全体に占める割合 (±標準偏差) (採集期間 7 日間)

Order	Family		Individuals	
			Mean number	Ratio of individuals (%)
Odonata	Coenagrionidae (larvae)	イトトンボ科(幼虫)	478.0 ± 203.66	49.4 ± 36.99
	Libellulidae (larvae)	トンボ科(幼虫)	18.0 ± 14.73	1.9 ± 2.67
Hemiptera	Nepidae (adults)	タイコウチ科(成虫)	0.7 ± 0.58	0.1 ± 0.11
	Belostomatidae (adults)	コオイムシ科(成虫)	0.7 ± 0.58	0.1 ± 0.11
	Notonectidae (adults and larvae)	マツモムシ科(成虫と幼虫)	183.3 ± 39.80	19.0 ± 6.43
	Gerridae (adults and larvae)	アメンボ科(成虫と幼虫)	52.7 ± 36.50	5.4 ± 7.11
Coleoptera	Dytiscidae (larvae)	ゲンゴロウ科(幼虫)	194.7 ± 168.59	20.1 ± 43.56
	Hydrophilidae (larvae)	ガムシ科(幼虫)	38.7 ± 8.08	4.0 ± 2.22

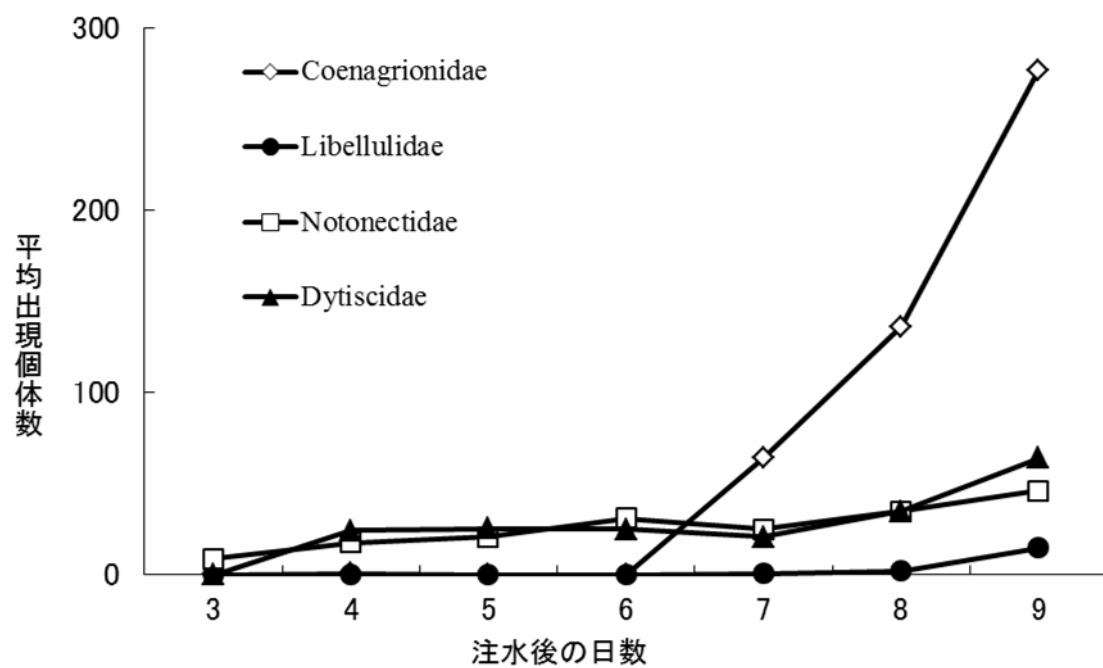


図 3 - 3 . 主要 4 科の捕食性水生昆虫における注水後の日数ごとの平均出現
個体数 (1m²あたりの出現数)

表 3 - 2 . 採集調査池に出現した捕食性水生昆虫の平均生物量 (g ± 標準偏差) と全体に占める割合 (± 標準偏差) (採集期間 7 日間)

Order	Family		Wet body weight	
			Mean weight(g)	Ratio of weights (%)
Odonata	Coenagrionidae (larvae)	イトトンボ科(幼虫)	0.644 ± 0.34	14.0 ± 0.12
	Libellulidae (larvae)	トンボ科(幼虫)	0.697 ± 0.57	15.1 ± 0.17
Hemiptera	Nepidae (adults)	タイコウチ科(成虫)	0.053 ± 0.05	1.1 ± 0.01
	Belostomatidae (adults)	コオイムシ科(成虫)	0.080 ± 0.07	1.7 ± 0.02
	Notonectidae (adults and larvae)	マツモムシ科(成虫と幼虫)	1.975 ± 0.31	42.9 ± 0.17
	Gerridae (adults and larvae)	アメンボ科(成虫と幼虫)	0.070 ± 0.03	1.5 ± 0.02
Coleoptera	Dytiscidae (larvae)	ゲンゴロウ科(幼虫)	0.913 ± 0.79	19.8 ± 0.34
	Hydrophilidae (larvae)	ガムシ科(幼虫)	0.170 ± 0.03	3.7 ± 0.03

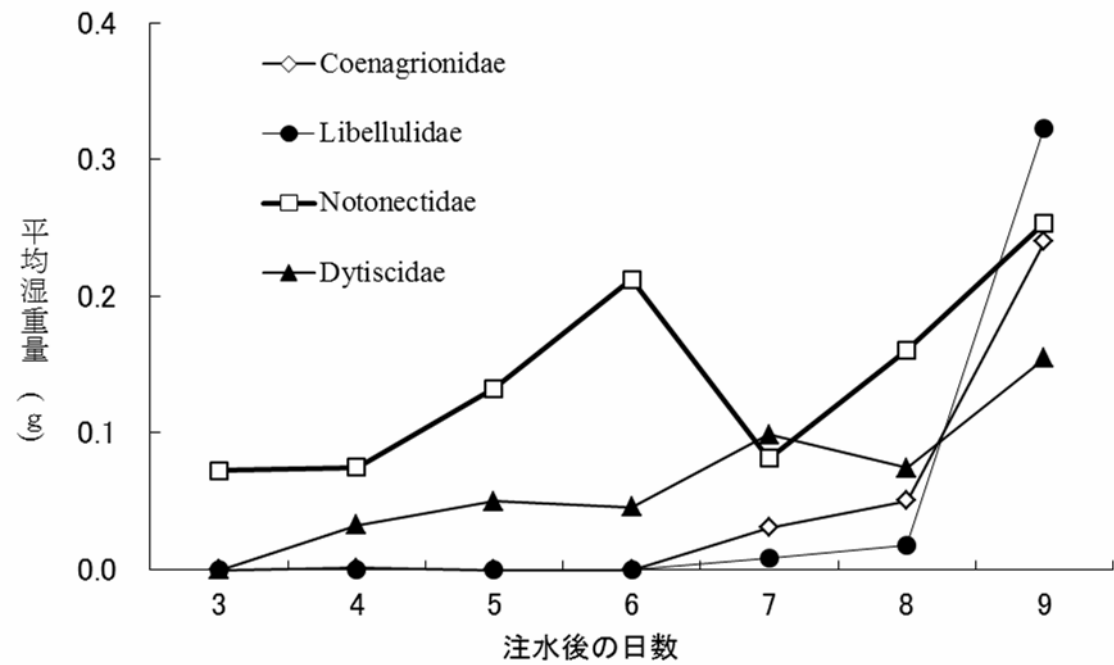


図 3 - 4 . 主要 4 科の捕食性水生昆虫における日ごとの平均生物量
(1m²あたりの出現湿重量)

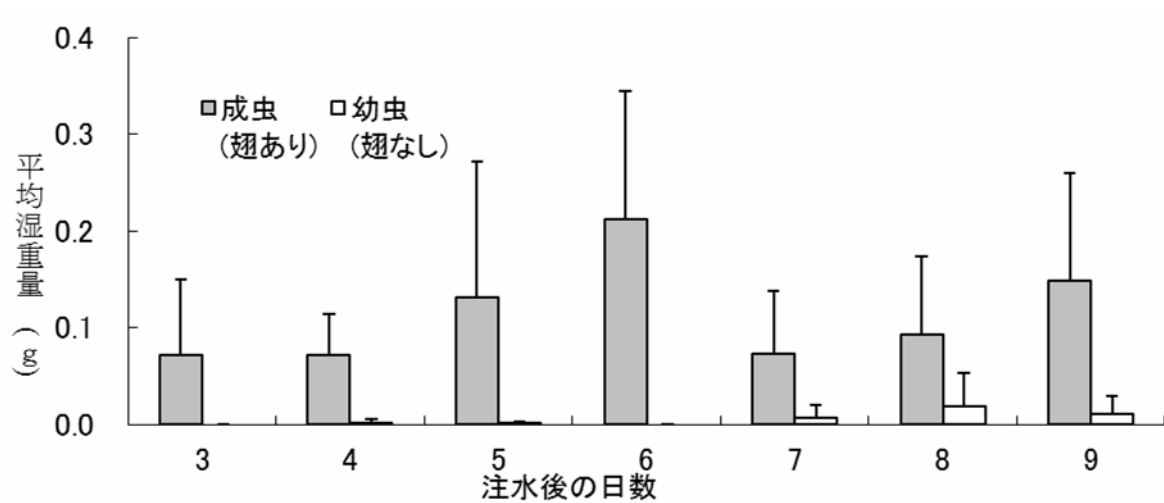


図 3 - 5 . 採集調査で出現した 1 m²あたりのマツモムシの成虫と幼虫の生物
量 (m², n=3)

第4章 コマツモムシ属による捕食実験

4-1 サイズ別捕食実験

4-1-1 はじめに

前章において、コマツモムシ属 (*Anisops*) が種苗育成池で卓越していることが明らかになった。しかしながら、このコマツモムシ属がどの程度、稚魚を捕食するのかは明らかになっていない。

既往の研究ではマツモムシ科 (*Notonectidae*) と被食者であるミジンコ類 (*Daphnia*) からコイ (*Cyprinus carpio*) の稚魚まで捕食実験が行われている (表 4-1)。稚魚サイズとの比較実験で *Notonecta glauca* のパイク稚魚 (*Esox lucius*) に対する捕食数はサイズの増加に伴い減少した (表 4-1)。逆に、ボウフラ (*Mosquito larvae*) が高密度に存在する環境下で、*Anisops bouvieri* は大きなサイズに嗜好性を示している (Saha *et al.* 2010)。

しかしながら、コマツモムシ属と稚魚サイズとの比較実験の例はなく、稚魚サイズが大きくなることで捕食リスクが減少することを示した事例もない。そこで本実験では、ラオスにおけるコマツモムシ属と養殖対象魚種において稚魚サイズと捕食の関係を比較し、捕食の限界サイズを把握するためラオスの養殖対象の3魚種 (*Barbonymus gonionotus*, *Cirrhinus cirrhosis* (Bloch, 1795), *Cyprinus carpio*) とコマツモムシ属の *Anisops bouvieri* を用いて室内実験を行った。

4-1-2 材料と方法

捕食実験は 2008 年 8 月 25 日から 9 月 13 日、2009 年 6 月 12 日から 6 月 30 日の 2 回にわたってラオスのビエンチャン市に位置する NADC で実施した。被

食者は第 2 章でラオスの主要な養殖魚種であることが明らかになった *Barbonymus gonionotus*、*Cirrhinus cirrhosus*、*Cyprinus carpio* の稚魚を用いた。この 3 魚種の稚魚は NADC で採卵および孵化し、容量 1 t のポリ塩化ビニル製円形型タンクで半流水にして育成した。捕食者には *Anisops bouveiri* の成虫（平均全長 $6.06 \text{ mm} \pm 0.84$ 標準偏差）を用いた。*A. bouvieri* は NADC 施設内の種苗生産池から採集し、室内に設置した 30L ポリカーボネート製円形タンクに放しボウフラ (*Armigeres* sp.) を給餌して 3 日間馴致した。試験容器は $25 \times 40 \times 25 \text{ cm}$ のガラス水槽に砂フィルターで濾過した河川水 15L を満たした (図 4・1)。水槽内にエアーポンプで空気を供給し、水槽の上にはプラスチック板をのせ *A. bouveiri* の逃亡を防いだ。実験時間は 24 時間とし、この間水温は平均 28.9°C (± 0.8)、pH は平均 7.5 (± 0.3)、溶存酸素は平均 8.47 mg/L (± 0.47) であった。室内照明は明暗を 12 時間ごとに切り替えた。

各試験容器に 1 魚種の稚魚 10 尾と *A. bouvieri* 1 尾を放養し、コントロール区には試験区と同様の条件下に稚魚のみ放養した。繰り返しは各 4 回行い、実験ごとに *A. bouvieri* と稚魚は新しい個体に交換した。実験前夜 8 時に、稚魚はピペットを用いて飼育水と一緒に試験容器へ移した。実験開始時に、試供魚と同じ孵化グループから 10 尾を無作為に選出して全長を計測した。実験は試供魚の孵化後 3 日目、6 日目、9 日目、12 日目、15 日目、18 日目、21 日目の計 7 回実施した。実験開始 12 時間後と実験終了後に試験区とコントロール区で斃死した稚魚を数えた。実験終了後、全ての斃死個体を回収して顕微鏡下で斃死個体の傷から捕食を判定した。

2 元配置分散分析 (Two-way ANOVA) で稚魚の日数と魚種間の相互作用を SPSS12.0J を用いて検定した。相互作用が検出された場合、一元配置分散分析 (One-way ANOVA) で有意差を検定し、有意差があった場合、多重比較法 (Tukey's HSD) で検定した。また斃死数は等分散性を得るために対数変換

($\text{Log}_{10}(x+1)$)を行った。

4-1-3 結果

捕食実験の結果から、*A. bouvieri*は3魚種全ての稚魚を捕食することを確認した(図4-2)。*B. gonionotus*は孵化後3日目で全長4.0 mm (± 0.74 標準偏差)、12日目5.6 mm (± 0.56)、21日目9.4 mm (± 1.03)に成長し、*C. cirrhosus*は3日目7.6 mm (± 0.43)、12日目12.5 mm (± 0.00)、21日目15.7 mm (± 0.41)、*C. carpio*は3日目7.9 mm (± 0.41)、12日目10.1 mm (± 0.25)、21日目14.6 mm (± 0.00)で*B. gonionotus*よりも成育が良かった(図4-3)。*B. gonionotus*が1日に捕食された個体数が最も少ないのは18日目の2.5尾、最も多いのは6日目の7.8尾であった。また*C. cirrhosus*は最小が12日目の0尾で最大は3日目の5.5尾であった。*C. carpio*は最大が15日目と21日目の0尾で最小は6日目の5.0尾であった。コントロール区の平均斃死率は0.2尾 (± 0.06 , $n=28$)であった。

2元配置分散分析の結果、コマツモムシによる捕食は種間($F_{2,63} = 35.75$, $p < 0.01$)と孵化後日数($F_{6,63} = 18.38$, $p < 0.01$)に有意差が認められ、魚種と孵化後日数の間には交互作用が認められた($F_{12,63} = 5.44$, $p < 0.01$)。平均捕食数は魚種と孵化後日数によって異なることが示された。このため一元配置分散分析によって、魚種ごとに孵化後日数と斃死個体数の検定を行ったところ、*B. gonionotus*の稚魚の平均斃死数には孵化後日数間($F_{6,21} = 5.47$, $p < 0.01$)において有意差が認められた。しかしながら、多重比較法では孵化後日数と斃死個体数に一定の傾向は見られなかった(図4-4)。*C. cirrhosus*の平均斃死個体数は孵化後日数間において有意差が認められ($F_{6,21} = 16.24$, $p < 0.01$)。*B. gonionotus*とは対照的に孵化後3日と6日目の斃死数は9日目以降より多かった(図4-5)。*C. carpio*の平均斃死個体数

にも孵化後日数間に有意差が認められた ($F_{6, 21} = 25.27, p < 0.01$)。 *C. carpio* も孵化後 3 日と 6 日目の斃死数は 9 日目以降より多かった(図 4・6)。従って *C. carpio* と *C. cirrhosus* は成長に従い斃死数が減少した。

4-1-4 考察

結果から *C. cirrhosus* と *C. carpio* の斃死個体数は稚魚の成長とともに減少することが示された。対照的に *B. gonionotus* は実験期間を通して不安定であった。この理由として *C. cirrhosus* と *C. carpio* の成長は孵化後 21 日目には約 15 mm と順調に成長していたのに対し、 *B. gonionotus* は 9.4 mm と成長が遅かったことが挙げられる。 *C. cirrhosus* と *C. carpio* の全長が孵化後 6 日目の 8.8 mm と 7.8 mm から孵化後 9 日目の 12.0 mm と 9.4 mm に成長した時、 *A. bouvieri* による捕食圧は低くなった。これらの現象は 9.0 mm より小さい稚魚が *A. bouvieri* によって選択的に捕食されていることを示している (図 4・5、図 4・6)。これは稚魚の成長に伴い、視覚や側線鱗といった感覚器が発達し、捕食者を認識する能力が高くなったことや遊泳力を獲得し *A. bouvieri* の捕食に対する回避成功率が高まったためと推測される。今回の実験ではコントロール区において僅かに自然斃死個体が確認された。試験区ではすべて捕食による斃死であったことから、 *A. bouvieri* は衰弱した個体も選択的に捕食していた可能性が示唆された。

Louarn & Cloarec 1997 はパイク (*E. lucius*) と *A. bouvieri* と同科の *N. glauca* において室内実験を行い、パイクの孵化後日数とともに捕食数が減少することを報告している ()。筆者はこの捕食を左右する要因として、卵黄吸収後に獲得したパイク稚魚の遊泳能力を挙げている。本実験の試供魚は完全に卵黄を吸収し終わった遊泳能力のある稚魚を用いたが、 *A. bouvieri* は稚魚を捕食していた (図 4・4、図 4・5、図 4・6)。魚種によって発達状況は異なるが、遊

泳能力を得た後の発達状況も捕食リスクに大きく関わることが示唆された。

Gonzalez & Leal 1995 の実験においても、サイズの大きいマツモムシ属

(*Notonecta*) の捕食可能な稚魚サイズは捕食者のサイズに比例することを示している。しかし、この実験において捕食の限界サイズは明らかにしていない。

本実験においては *A. bouvieri* と稚魚サイズと捕食の関係性が明らかになった。この捕食を回避するには種苗を全長 9.0 mm から 12.0 mm までコマツモムシの侵入しない状態で育成する必要がある。このために孵化後数日で野外の種苗育成池に放養せずに、さらに池の中に目合いの細かいナイロンネットなどで上面も覆った網イケスを張るか、陸上にネットで覆った小型水槽を設置して集約的に育成して、全長 9.0 mm から 12.0 mm まで成長させる方法がある。しかしながら、このような手法を実証する前に、コストの試算を行う必要があるだろう。

表 4・1．マツモムシ科を捕食者とした既往の捕食実験の結果

Authors	Predators (size of predator)	Prey (size of prey)	Number of predations	Remarks
Gilbert & Burns 1999	<i>Anisops wakefieldi</i> (7mm)	<i>Anisops wakefieldi</i> (3mm)	0.1/day	コマツモムシ属の共食い
		<i>Ceriodaphnia dubia</i> (0.5 – 0.9mm)	55/day	コマツモムシ属1個体が 捕食するミジンコの個体数
		<i>Ceriodaphnia dubia</i> (<0.5mm)	107/day	コマツモムシ属1個体が 捕食するミジンコの個体数
	<i>Anisops wakefieldi</i> (3mm)	<i>Ceriodaphnia dubia</i> (<0.5mm)	53/day	コマツモムシ属1個体が 捕食するミジンコの個体数
		<i>Ceriodaphnia dubia</i> (0.5 – 0.9mm)	28/day	コマツモムシ属1個体が 捕食するミジンコの個体数
Gonzalez & Leal 1995	<i>Notonecta</i> sp. (4–12mm)	<i>Cyprinus carpio</i> (7.0mm)	1.5 fry/day	マツモムシ属1個体が捕食する コイ稚魚の尾数
Scott & Murdoch 1983	<i>Notonecta hoffmani</i> (1to 5th instar)	Daphnia (0.6–0.8mm)	5–89 head/2h	マツモムシ属1個体が捕食する ミジンコの個体数
	<i>Notonecta hoffmani</i> (1to 6th instar)	<i>Ceriodaphnia</i> (0.6–0.8mm)	4–56 head/2h	
Louarn & Cloarec 1997	<i>Notonecta glauca</i>	<i>Esox lucius</i> (8.0mm)	9.1 fry/24h	マツモムシ属1個体が捕食する バイク稚魚の尾数
		<i>Esox lucius</i> (12mm)	4.0 fry/24h	
		<i>Esox lucius</i> (21mm)	0.8 fry/24h	
		<i>Esox lucius</i> (36mm)	0.4 fry/24h	
Nishi & Venkatesan 1989	<i>Anisops bouvieri</i>	larvae of <i>Culex</i>	21.7 /24h 51.0 /24h	コマツモムシ属1個体が 捕食するボウフラの個体数

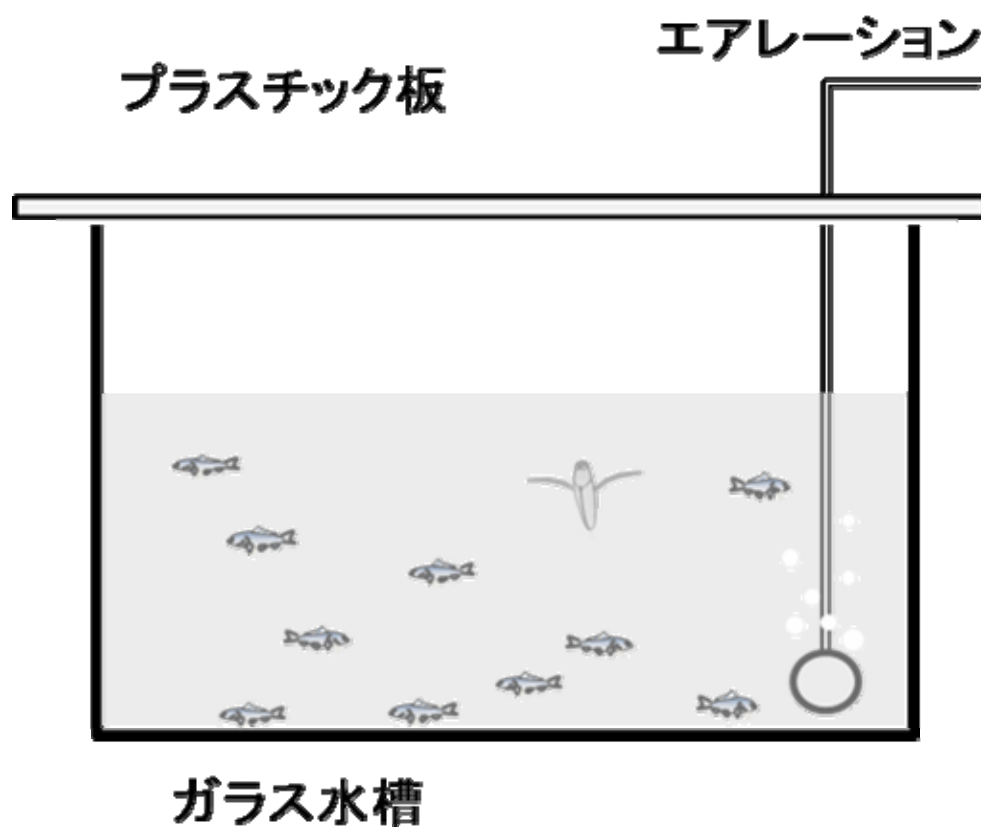


図 4 - 1 . サイズ別捕食実験の図



図 4・2 . *Anisops bouvieri* に捕食されている稚魚（上）と捕食された稚魚の死骸（下）の写真

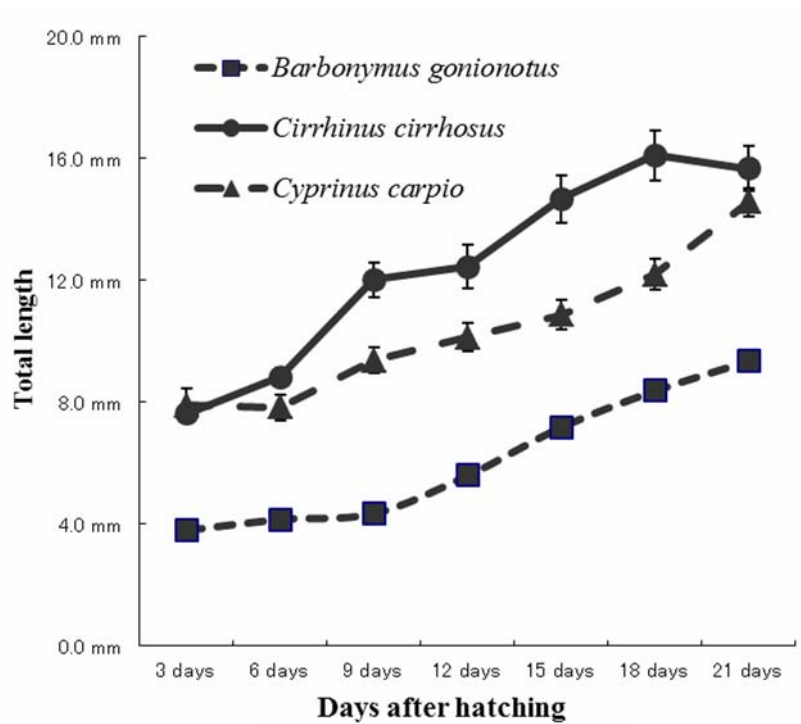


図 4 - 3 . 試供した 3 魚種の稚魚の成長曲線 (n=10)

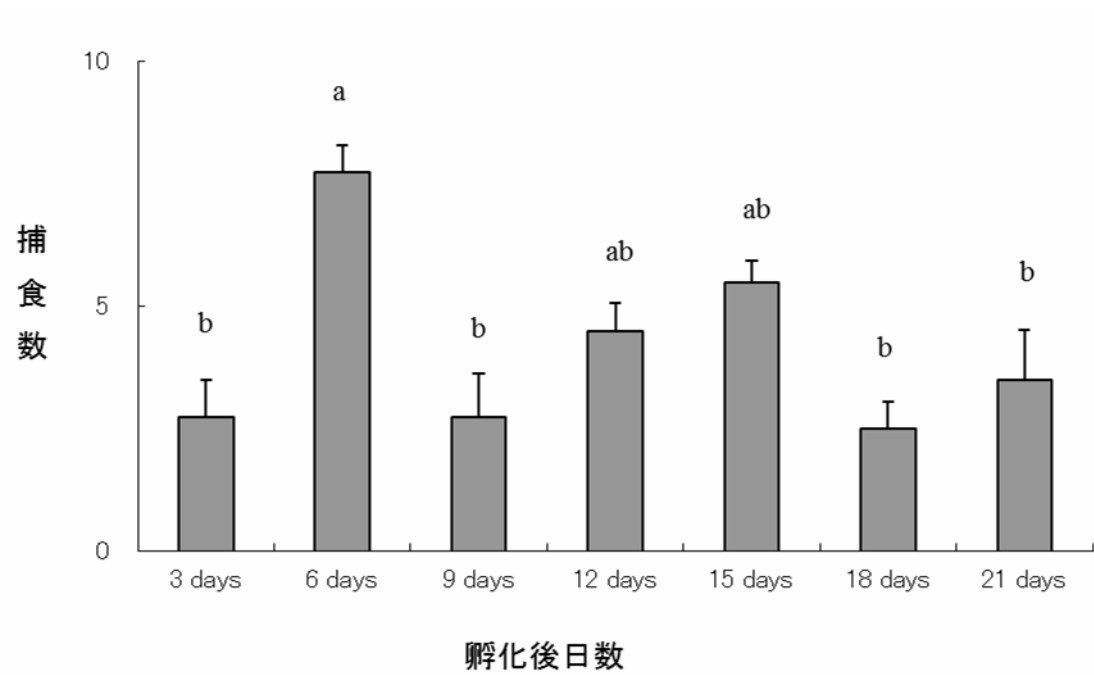


図 4 - 4 . *Barbonymus gonionotus* の孵化後日数ごとの *Anisops bouvieri* による捕食数の変化（英小字間に有意差あり $p < 0.05$ ）

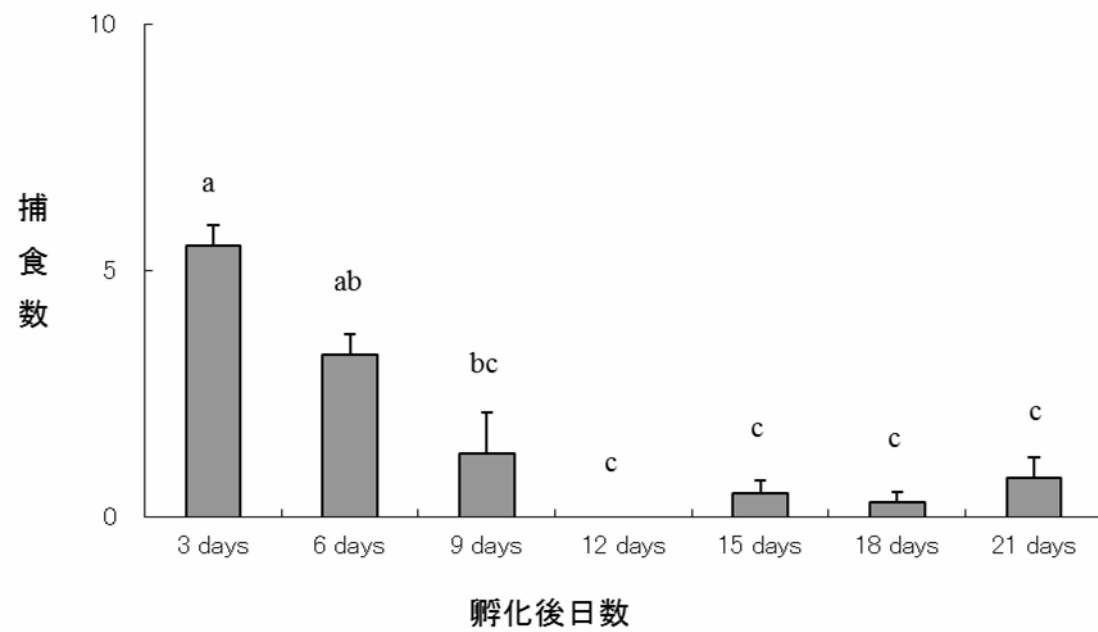


図 4 - 5 . *Cirrhhinus cirrhosus* の孵化後日数ごとの *Anisops bouvieri* による捕食数の変化（英小字間に有意差あり $p < 0.05$ ）

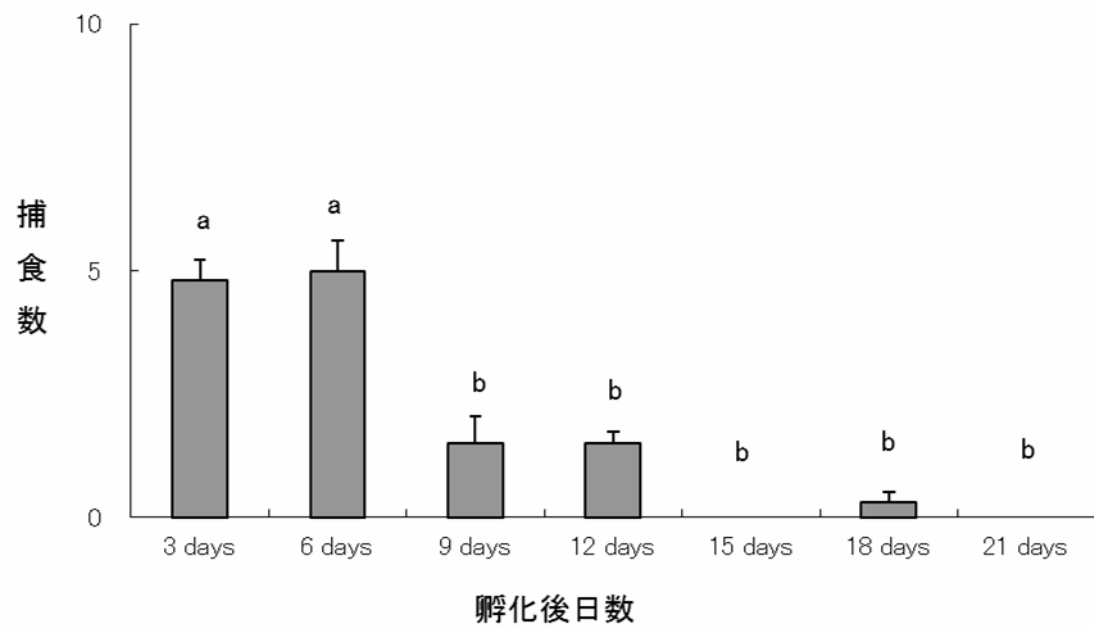


図 4 - 6 . *Cyprinus carpio* の孵化後日数ごとの *Anisops bouvieri* による捕食数の変化 (英小字間に有意差あり $p < 0.05$)

4-2 行動観察実験

4-2-1 はじめに

前節の結果、コマツモムシ属 (*Anisops*) が種苗育成池において相当量の稚魚を捕食することが明らかになり、そのひとつの対策として稚魚のサイズを大きくすることを論じた。一方で捕食者の行動から生態的な特徴を把握し、そこから捕食対策を講じることでもある。本節では、その様な方法確立のために、その捕食行動、特にそれぞれが持つ感覚器官をどのように利用して捕食行動が行われているかを明らかにした。

マツモムシ科は待ち伏せ型 (Ambush) の捕食行動を取り、ワムシから稚魚まで様々な水生生物を捕食する (Gorai & Chaudhuri 1962, Gilbert & Burn 1999, Dieguez & Gilbert 2003)。その捕食行動様式において、マツモムシ属は水面に浮遊して餌生物を捕獲するのに対し、コマツモムシ属はヘモグロビンを使った浮力調整機能を用いて中層で餌生物を捕獲するといわれる (Ward 1992, 川合 & 谷田 2005, Matthews & Seymour 2006)。昆虫類には感覚器官として味覚や嗅覚といった化学感覚器官、視覚による光感覚器官および聴覚や振動を感知する機械感覚器官の 3 つを持つ (田付 & 河野 2009)。マツモムシ科 (Notonectiade) は複眼による視覚と機械感覚受容器で水の振動を感知して被食者を感知することが明らかになっている (Murphey & Mendenhall 1973, Lang 1980, Scott & Murdoch 1983, Freund & Olmstead 2000, Dieguez & Gilbert 2003, Saha *et al.* 2008)。これに対して魚類の感覚器官には嗅覚器官、光感覚器官、味覚器官、皮膚感覚器官および聴覚器官が存在し (Brown & Cowan 1999, 松原ら 1979)、捕食者を回避するために、嗅覚器官 (化学刺激) と光感覚器官 (視覚) で感知しているといわれる (Brown & Magnavacca 2003)。

しかしながら、コマツモムシ属の稚魚に対する捕食行動の情報は限定されて

いる。そこで本章ではコマツモムシ属による稚魚に対する捕食行動の情報を集めるため、捕食者としてコマツモムシ (*Anisops ogasawarensis*) また被食者としてメダカ (*Oryzias latipes*) 稚魚を用いコマツモムシの稚魚への追尾や攻撃の方法、また両者の鉛直分布を把握するために行動観察実験を実施した。

4-2-2 材料と方法

行動観察実験を 2010 年 9 月 22 日から 10 月 26 日までの 12 日間、東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻国際水産開発学の実験室において実施した。捕食者としてコマツモムシ (*Anisops ogasawarensis*) の成虫、被食者としてメダカ (*Oryzias latipes*) の稚魚を試供した。コマツモムシは淡水魚研 (千葉県) より購入し、中和した水道水を満たした飼育水槽 (30×30×60 cm) 内で 1 週間馴致した。また、馴致期間中は冷凍赤虫 (こだわりあかむし、株式会社阿蘇熱帯魚) とアルテミア (ブラインシュリンプ卵、日本動物薬品株式会社) を給餌した。*O. latipes* はメダカ園 (栃木県) より発眼卵を購入し、水槽内 (30×30×60 cm) で孵化させ、開口後は市販の配合飼料を適量与え、約 1 週間後の稚魚を試供した。用いたコマツモムシの平均体長は 7.52 mm (± 0.43 , 標準偏差)、メダカ稚魚の平均全長は 5.82 mm (± 0.79) であった。観察時間は朝 8 時から夜 8 時までの 12 時間とし、水温は 24.6°C (± 0.90)、pH 7.71 (± 0.32)、溶存酸素 7.70 mg/L (± 0.32) であった。試験容器は 5×40×60 cm のアクリル水槽を用いた (図 4-7)。試験区は水深 50 cm と 30 cm の 2 つを設け各 3 回繰り返した。50 cm 試験区にはコマツモムシ 1 尾とメダカ稚魚 20 尾を、30 cm 試験区にはコマツモムシ 1 尾とメダカ稚魚 12 尾を放養した。各試験区のコントロールとしてコマツモムシのみ放養し、同様に観察をおこなった。観察実験開始まで 20 時間絶食し、実験前日の夜 8 時に試験容器へ移した。メダカ稚魚はストレスを与えないよう実験開始時にピペットで飼育水とともに試験容器へ

移した。

捕食行動は追尾と攻撃に分けて、時間や位置および方向を記録した。追尾と攻撃とはコマツモムシが被食者に頭部を向けて積極的に遊泳速度を速めて向かう行動を追尾とし、追尾よりさらに速度を増して被食者へ襲い掛かる行動を攻撃とした。観察中、捕食された個体は取り除き、新しい稚魚を追加した。

観察実験中、10分に1回、全ての稚魚とコマツモムシの鉛直位置を記録した。コマツモムシは空気呼吸をおこなうため2〜3分に一度水面に浮上する。位置の記録を記入する際にコマツモムシが呼吸中であった場合、コマツモムシが再び潜り水中で落ち着いた位置を記録した。

4-2-3 結果

追尾から捕獲

コマツモムシは広範囲に獲物を探すような積極的な探索行動は全く行わず、ゆっくりと水槽内を上下に遊泳するか、一カ所に静止していることが多かった。しかしながら、稚魚が約5.0 cm圏内に接近すると、頭部を稚魚に向けて直線に伸びのある遊泳で追尾を開始した。この間、稚魚が遊泳方向を変えると、コマツモムシはこれに素早く反応して追従した。稚魚がこの5 cm圏内から離れると、コマツモムシは追尾を中止した。稚魚がこの5 cm圏内に留まった場合は、さらに遊泳速度を上げて接近して攻撃に移る(図4-8)。しかし、多くの場合稚魚はコマツモムシに追尾される前に、素早く5 cmの圏外へ逃亡し追尾は始まらなかった。また追尾を受けた稚魚は静止してコマツモムシをやり過ごすか、一挙に圏外へ逃亡するという忌避行動が多く観察された。

攻撃は稚魚から誤って急接近しない限り、稚魚への距離約1~2cmで一旦動きを止めてから突撃をする。コマツモムシは身体を少し傾けて、腹部を獲物へ向けるように突進し、後脚を素早く連続的にキックする。また、稚魚の動きに

合わせ、素早く進行方向を 1～2 回左右や上下に角度を変えた。

捕獲が成功した場合、抱えた稚魚のためコマツモムシは水中で静止することができずに、後脚を頻繁に漕いで位置を保った。獲物を抱えると遊泳はせずに一カ所に静止した。さらに数回獲物を持ち換えて、吸液する部位を換えた。稚魚を捕獲したほとんどのコマツモムシは、捕獲から約 10 分後に黒い液体を排泄した。

追尾と攻撃の角度

50 cm 試験区において 3 回の観察実験中にコマツモムシによる追尾は平均 15.0 回 (± 6.93 , 標準偏差) 観察した。追尾の方向は上方向に平均 9.3 回 (± 6.43)、水平方向に 4.0 回 (± 1.00)、下方向へは 1.7 回 (± 0.58) おこなった (表 4-2)。攻撃は平均 11.3 回 (± 4.04) 行った。攻撃の方向は上方向に 5.7 回 (± 1.53)、水平方向に 3.7 回 (± 2.89)、下方向に 2.3 回 (± 1.53) であった (表 4-2)。稚魚の捕食数は 12 時間で平均 4.3 尾 (± 2.08) であった。全体を通したコマツモムシの攻撃成功率は 37.1% (捕食 13 回、攻撃 35 回) であった。攻撃の全 35 回のうち 31 回 (88.6%) は水深 15 cm 以内で観察された。

30 cm 試験区において、追尾は平均 11.7 回 (± 12.90) 観察した。上方向に平均 6.3 回 (± 7.77) 追尾を行い、水平方向に 1.0 回 (± 1.73)、下方向へは 0 回であった (表 4-2)。攻撃は平均 2.3 回 (± 4.04) で上方向のみで 2.3 回 (± 2.08) であった。稚魚の捕食数は 12 時間で平均 2.0 尾 (± 1.73) であった。全体を通じた攻撃成功率は 85.7% (捕食 6 回、攻撃 7 回、) であった。また攻撃は全 7 回のうち 3 回 (42.9%) は水深 15 cm 以内で観察された。

鉛直分布

50 cm 試験区と 30 cm 試験区ともにメダカの稚魚は水槽の底部に多く分布し、

それとは対照的にコマツモムシは水面付近に多く分布した（図 4・9、図 4・11）。コントロール区と試験区のコマツモムシの分布を比較したところ、どちらも同じような分布傾向を示した（図 4・10、図 4・12）。

4-2-4 考察

これまでコマツモムシは中層を浮遊して摂餌していると考えられていた。少なくとも同属の *Anisops wakefieldi* は、天然水域において深い層（50～100 cm）より浅い層（10～50cm）に多く観察されているのが報告されている（Gilbert *et al.* 1999）。しかしながら、本実験ではコマツモムシは稚魚の存在にかかわらず水面付近に多く分布し（図 4・9、図 4・10、図 4・11、図 4・12）、攻撃回数も浅い層で多く観察された。従って、コマツモムシは種苗生産池や天然水域においても水面付近に生息し、ここで待ち伏せ型の捕食行動を取っていることが推測された。

コマツモムシは水平より上方向に存在する稚魚を感知することはできるが、下方向（背側）にいる稚魚はほとんど感知できなかった。しかし追尾開始後に稚魚がコマツモムシより下方向へ逃亡しても、追尾を継続していることから、コマツモムシは意識的に下方向の振動を捉えることができる。この場合、コマツモムシは腹部を獲物へ向けるようにして下方向にいる稚魚を感知していた。既往の報告からコマツモムシは獲物の水の振動を中脚、後脚および腹部にある機械受容器で感知すること（Dieguez & Gilbert 2003）、またこの機械受容器は部位ごとに感知する周波が異なること（Lang 1980）が知られている。本実験結果で下方向への追尾と攻撃の回数が少なかったことから考察すると、受容器の背側（下方面）の感受性は限定されているようであった。従って、コマツモムシが上方向に限定して追尾や攻撃をおこなうのは、この機械受容器の形態的特徴にあると考えられた（図 4・13）。

観察中、コマツモムシは稚魚を捕獲する直前に一旦動きを止める行動や振動を発しない空気泡や浮遊しているゴミを誤認攻撃するのが観察された。また実験前の馴致の期間中、冷凍アカムシを給餌すると、最初コマツモムシは水面から落ちてくる冷凍アカムシを捉えていたが、数日すると水面に浮いている冷凍アカムシに近寄って一旦止まってから捕食するようになった。この動きは視覚で獲物を確認しているようであった。これからコマツモムシは稚魚の捕獲の最終段階は視覚で獲物を捕捉していることが考えられた。従って、コマツモムシは水平や上方で起きる稚魚の振動を約 5 cm の距離から機械受容器で捉え、至近距離では視覚を使い稚魚を捕獲するものと考えられた。

被食者は捕食者のいる環境下に晒されることで様々な反応を起こす。例えば、ミジンコ類 (*Daphnia*) は *Anisops calcaratus* が同じ環境下に存在するとミジンコの分布、再生産や形態に変化が現れることが知られている (Grant & Bayly 1981, Stibor 1992)。今回の実験でも被食者であるメダカ稚魚に忌避行動が観察された。実験時では開始時には一部のメダカ稚魚は水面付近に分布していたが徐々にコマツモムシのいない深い層に分布を下げていた。通常、*O. latipes* は水面付近を遊泳している (Yamamoto 1975) ことから、警戒物質や視覚および振動といった刺激を感知することでコマツモムシの存在を認識して忌避行動をとったものと考えられる。さらに攻撃圏付近にいる稚魚は明らかに逃亡や静止といったコマツモムシの存在を認識した行動を示していた。本実験では稚魚が攻撃回避をした定量的なデータはないが、このような稚魚の回避行動が成功した現場を度々観察したことから、稚魚による攻撃回避の成功率は比較的高いものと考えられた。

まとめ

行動観察実験の結果、コマツモムシは水面付近で約 5 cm 圏内に近づく稚魚を

積極的に捕食することが示唆された。一連の結果から稚魚の振動を機械受容器で捉え、最終的な捕獲は視覚を用いて行うことが考えられた。一方、稚魚も早い成長段階からコマツモムシを感知し忌避行動をとることが観察された。この行動は警戒物質や視覚で捕食者を認識しているものと考えられた。

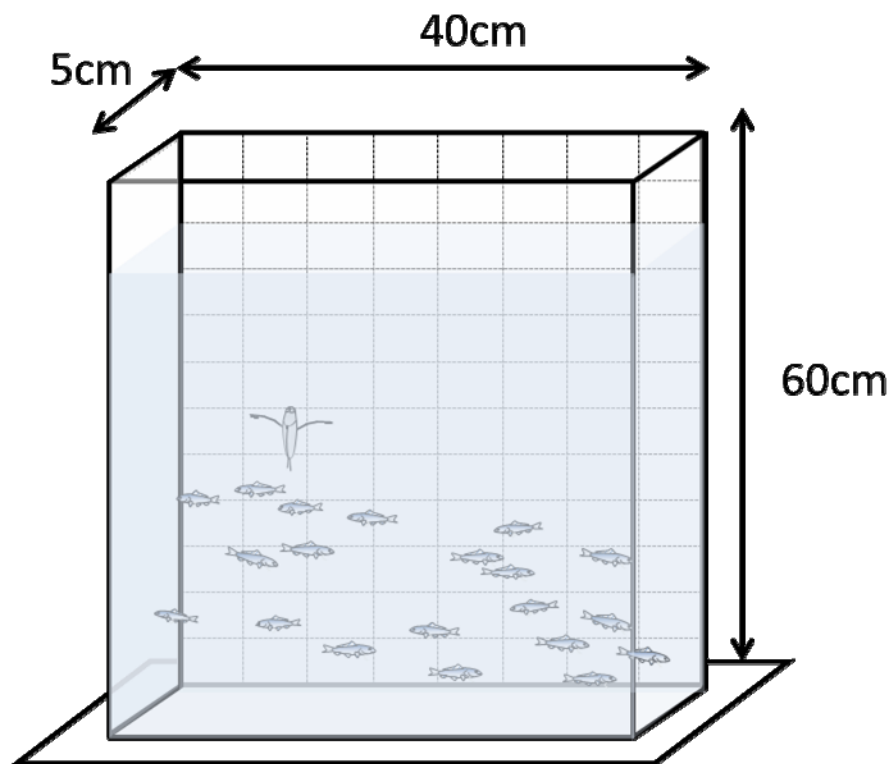


図 4 - 7 . 行動様式の試験容器

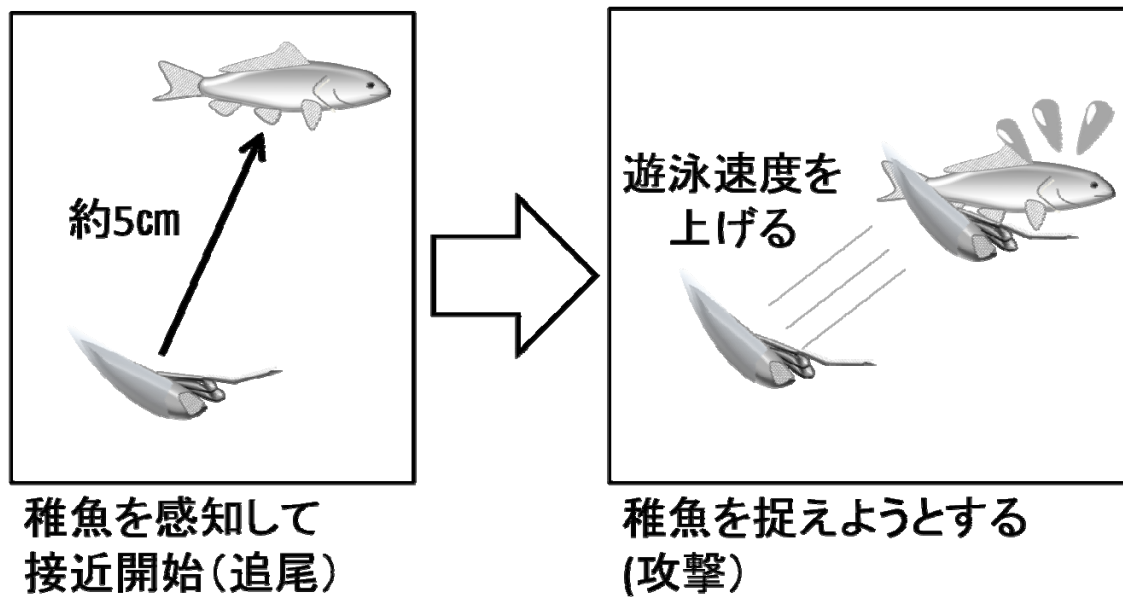


図 4 - 8 . 追尾から攻撃までの行動

表 4 - 2 . *Anisops ogasawarensis* が *Oryzias latipes* に対しておこなった追尾 (Chase) と攻撃 (Attack) の回数と行った方向 (標準偏差)

a. 50cm 水槽の結果

	Upper	Side	Down	Total
Chase	9.3 (6.43)	4.0 (1.00)	1.7 (0.58)	15.0 (6.93)
Attack	5.7 (1.53)	3.7 (2.89)	2.3 (1.53)	11.7 (3.79)

b. 30cm 水槽の結果

	Upper	Side	Down	Total
Chase	6.3 (7.77)	1.0 (1.73)	0.0 (0.00)	11.7 (12.90)
Attack	2.3 (2.08)	0.0 (0.00)	0.0 (0.00)	2.3 (4.04)

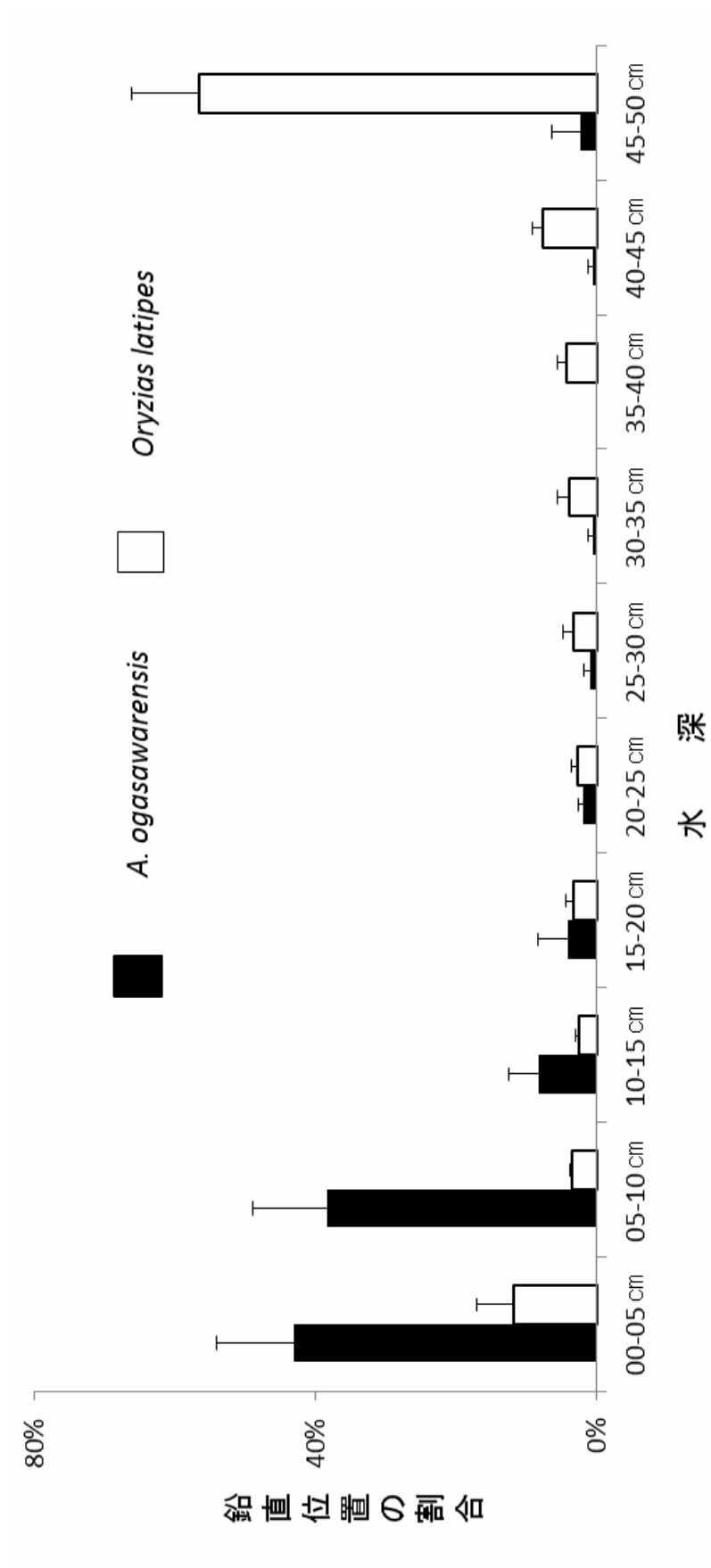


図 4 - 9 . 水深 50cm における *Anisops ogasawarensis* と *Oryzias latipes* の鉛直分布 (12 h, n=3)

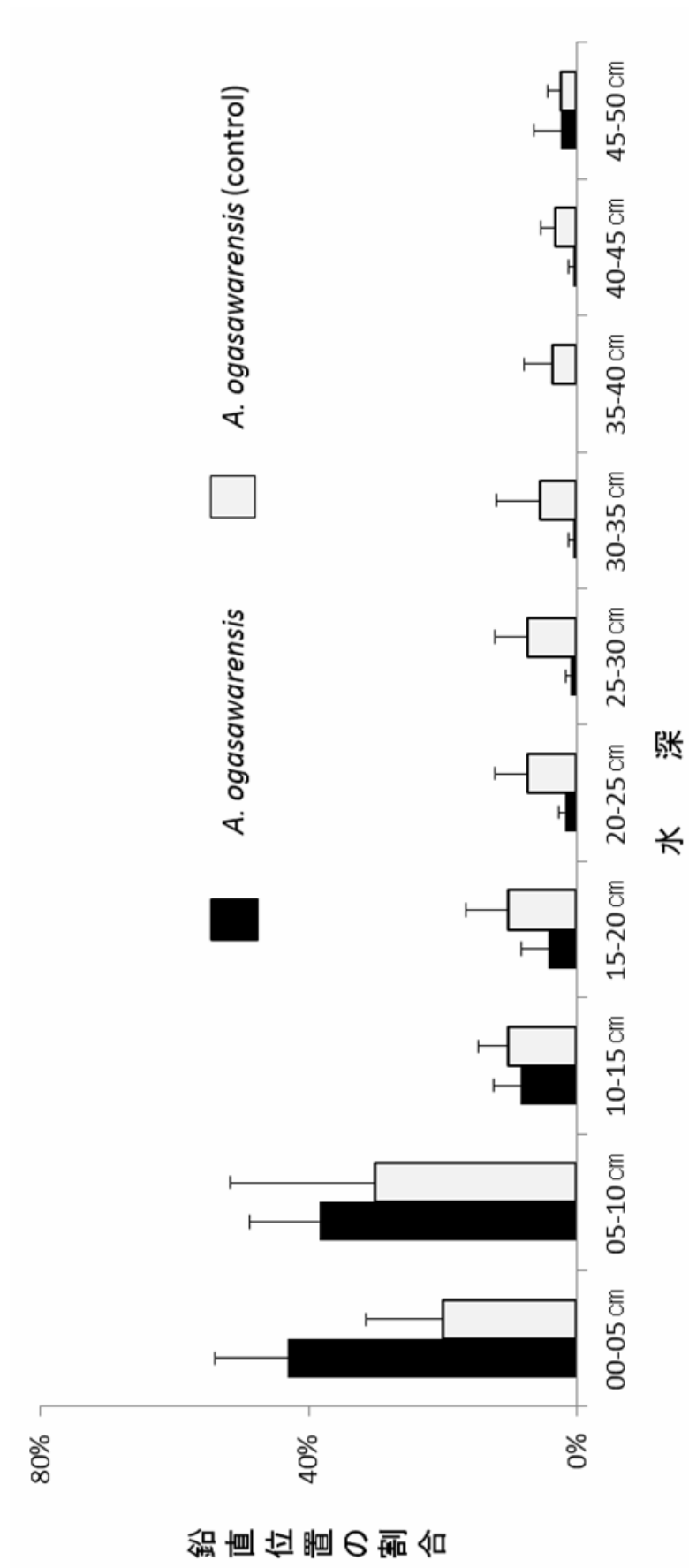


図 4・1 0 . 水深 50 cm における試験区の *Anisops ogasawarensis* とコントロール区の *A. ogasawarensis* の

鉛直分布 (12 h, n=3)

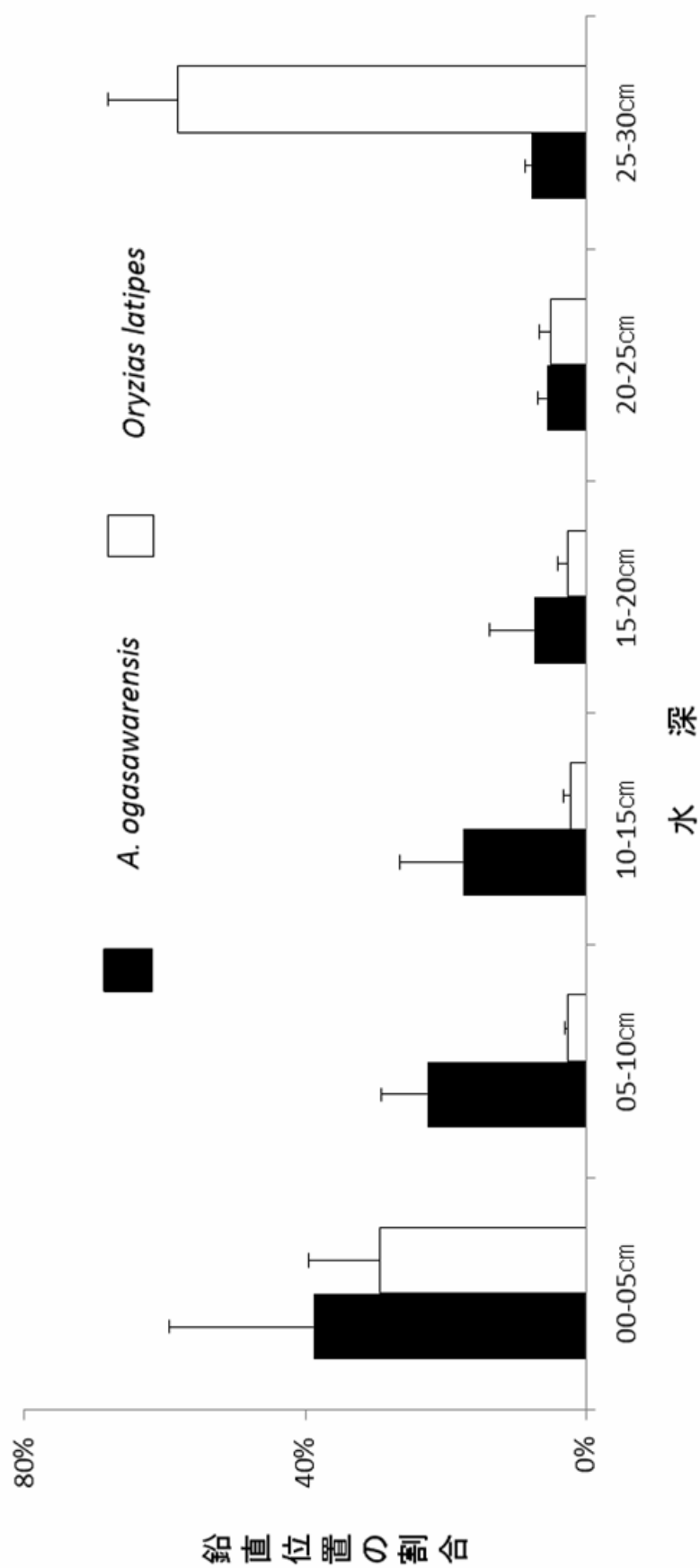


図 4 - 1 1 . 水深 30cm における *Anisops ogasawarensis* と *Orizyas latipes* の鉛直分布 (12 h, n=3)

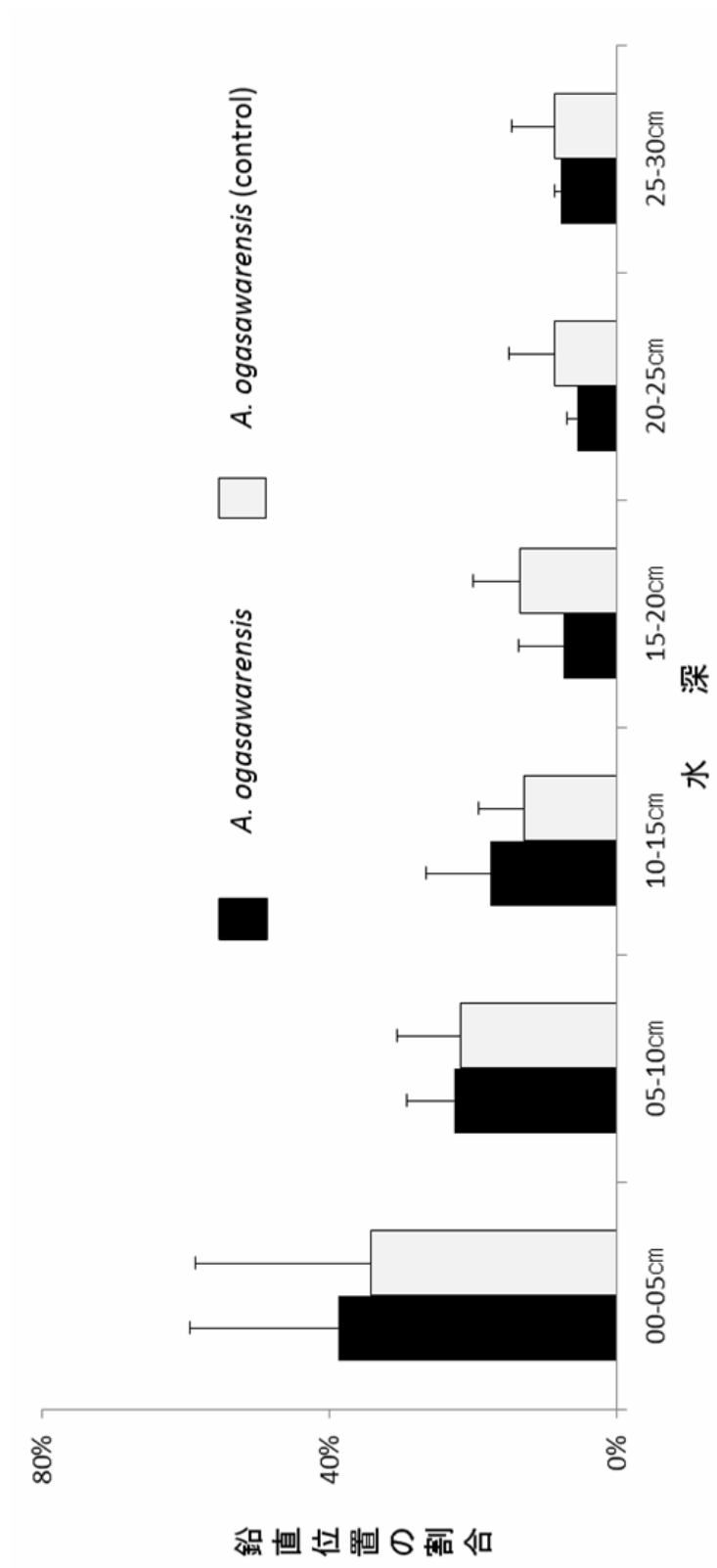


図 4・1 2. 水深 30 cm における試験区の *Anisops ogasawarensis* とコントロール区の *A. ogasawarensis* の鉛直分布 (12 h, n=3)

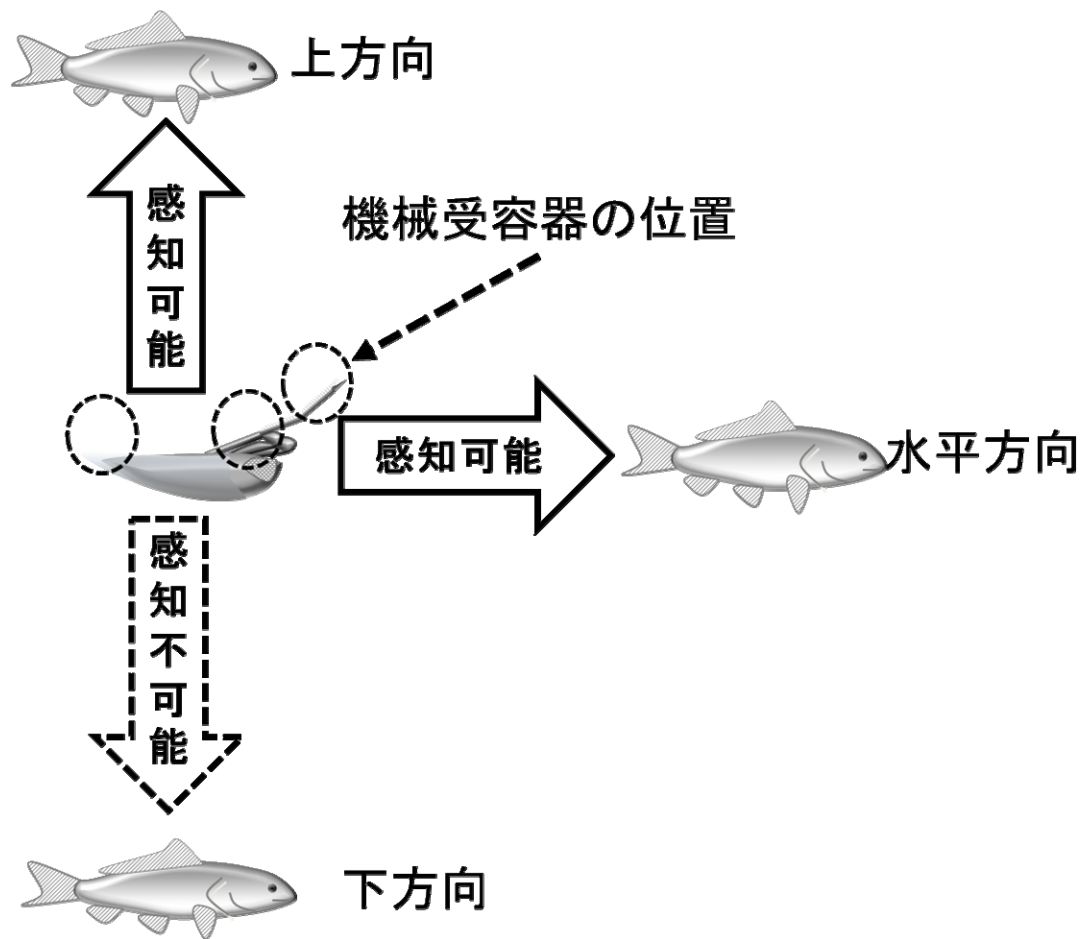


図 4 - 1 3 . コマツモムシの機械受容器の位置と感知可能な方向

4-3 捕食に及ぼす照度に関する実験

4-3-1 はじめに

行動観察実験の結果、コマツモムシ (*Anisops ogasawarensis*) は *Oryzias latipes* を捕獲する直前、至近距離で獲物を視覚で捕捉していると考えられた。マツモムシ科 (Notonectidae) は視覚受容器の単眼を欠き複眼のみを持つ (川合 & 谷田 2005)。この複眼は明暗、運動視、パターン視および色覚を検出することが知られている (花里 2003)。照度条件 (lx) を用いた明暗の差による捕食の比較試験の結果、マツモムシ科の捕食は照度によって変化することが知られている (Scott & Murdoch 1983, Saha *et al.* 2008)。Murdoch & Scott 1983 は *Notonecta hoffmani* とボウフラ (Mosquito larvae) の捕食実験で、明所において捕食数は有意に多かったが、その差は 14% と僅差であり、明所と暗所における捕食数の差は明確ではないと述べている。*A. bouvieri* とボウフラ (*Culex quinquefasciatus*) を用いて明暗と障害物を利用した捕食実験では、障害物による影響が大きいものの明所は暗所よりも捕食が多いことが報告されている (Saha *et al.* 2008)。さらにマツモムシ科は 0.5 mm 以下の微小プランクトンを視覚で感知して捕獲することから、暗所においては捕食が減少することも報告されている (Dieguez & Gilbert 2003)。

既往実験は被食者としてボウフラやミジンコといった遊泳力の低いプランクトン類を用いており、照度条件も明所と暗所という極端に異なる照明条件で実験が行われている。すなわち、コマツモムシが遊泳力の高い稚魚を、どのような照度条件で最も多く捕食するのかは明らかにされていない。そこで本実験では条件の異なる照度下におけるコマツモムシとメダカ稚魚の捕食変化を室内の捕食実験において検証した。

4-3-2 材料と方法

照度による捕食の比較実験を 2010 年 10 月 6 日から 10 月 21 日にかけて東京大学大学院農学生命科学研究科農学国際専攻の国際水産開発学研究室で実施した。捕食者としてコマツモムシ (*Anisops ogasawarensis*)、被食者としてメダカ稚魚 (*Oryzias latipes*) を試供した。各試験区にはメダカ稚魚を 10 尾とコマツモムシを 1 尾、コントロール区にはメダカ稚魚 10 尾のみ放養した。各試験区とコントロール区は 10 回の繰り返しを行った。実験時間は 12 時間とした。コマツモムシは淡水魚研 (千葉県) より購入し、水道水を中和した飼育水槽内 (30×30×60 cm) で 1 週間馴致した。馴致期間中は、冷凍赤虫 (こだわりあかむし、株式会社阿蘇熱帯魚) とアルテミア (ブラインシュリンプ卵、日本動物薬品株式会社) を給餌した。メダカ稚魚はメダカ園 (栃木県) より発眼卵を購入し、実験室内の 30×30×60 cm 水槽内で孵化させ約 1 週間後のものを試供した。コマツモムシの平均体長は 7.22 mm (±0.29, 標準偏差)、メダカ稚魚の平均全長は 5.54 mm (±0.62) であった。試験容器は 2L のポリ塩化ビニル製円柱型容器で、ここに中和した水道水を満たした。実験中、水温は 24.8℃ (±0.56)、pH7.43 (±0.15)、溶存酸素 7.75 mg/L (±0.32) であった。試験容器は段ボール箱に入れて密閉して暗室状態にし、白色蛍光灯を入れ、光量を照度計 (Light meter LM-331, アズワン) で測定し 0, 3, 30, 300, 3000lx に設定した (図 4-14)。明るさの目安として 0lx は暗闇に、3000lx は日中の照度に等しい。*A. ogasawarensis* は実験開始まで約 20 時間絶食とした。コマツモムシは実験前夜に試験容器へ移し、メダカ稚魚は実験開始前に試験容器へ移した。実験後、顕微鏡下で斃死個体の捕食の確認を行い、捕食数を記録した。

各試験区の斃死率の平均を SPSS12.0J を用い一元配置分散分析 (One-way ANOVA) で有意差を検定し、有意差のあった場合は多重比較法 (Tukey's HSD) を行った。また検定前に斃死率は等分散性を得るために対数変換 ($\text{Log}_{10}(x+1)$)

を行った。

4-3-3 結果

全ての試験区においてコマツモムシによるメダカ稚魚の捕食を確認し、メダカ稚魚のみのコントロール区の生残率は 100%であった。照度 0lx 区の平均捕食率は 6.0% (±7.0%, 標準偏差)、照度 3lx 区は 37.0% (±30.6%)、照度 30lx 区は 38.0% (±31.6%)、照度 300Lx 区は 53.0% (±25.8%)、照度 3000lx は 16.0% (±10.7%) であった (図 4-15)。一元配置分散分析の結果、照明度と捕食率の間には有意差が認められた ($F_{4,45}=6.17$, $p < 0.001$)。多重比較法の結果、0lx から照度が上がるにつれて平均捕食率が増加し、300lx で捕食率が最高になり 3000lx では減少に転じた (図 4-15)。

4-3-4 考察

捕食の結果から暗闇 (0lx) や強い照度下 (3000lx) より薄明りの照明下 (3-300lx) で捕食率が有意に増加した (図 4-15)。これは照度 3000lx 区の光条件下でメダカ稚魚はコマツモムシを認識し、コマツモムシの攻撃圏から効率よく忌避することができるためと考えられる。すなわち照度 3000lx 区はメダカ稚魚によって有利な環境であるといえる。対照的に照度 0lx 区の完全な暗闇下ではコマツモムシとメダカ稚魚の両者とも認識が難しく、コマツモムシは機械受容器でメダカ稚魚が発する振動を感知して、その位置を特定することができる。しかし、コマツモムシは攻撃時にメダカ稚魚との距離を正確に把握できないため、捕食率が最も低くなったと考えられる。照度 3lx 区から 300lx 区ではコマツモムシがより早くメダカ稚魚を捕捉する、すなわちこの環境下ではコマツモムシがより鮮明にメダカ稚魚を認識できる。従ってこの照度領域は捕食者にとって有利な環境下であると考えられた。

魚類間で照度を用いた実験では 3lx と 50lx で捕食者としてシクリッド科魚類 (Cichlid)、被食者としてカラシン科魚類 (Chalacin) との忌避行動を観察し、この結果、忌避反応は警戒物質による反応が視覚による捕食者の認識よりも強く作用していた (Brown & Magnavacca 2003)。しかしながら、視覚によるリスクの認識は警戒物質による認識よりも速い (Brown & Cowan 1999)。本実験においては照度の変化により捕食率が平均 6.0~53.0% と 9 倍近い差が現れた (図 4-15)。2L という小型容器は、実際の種苗育成池と異なる点は考慮すべきであるが、稚魚の視覚による明暗感覚は、捕食リスクを回避する重要な機能を持つことが確認された。しかし、その感知機能は照度の少ない場所においては *A. ogasawarensis* より低いと考えられた。

他の研究では、*Buenoa macrotibialis* と大小のサイズを用いたプランクトンとの明暗所における比較実験で、大型 (1.8 mm 以上) のミジンコ (*Daphnia pulex*) は明暗所 (0lx と 350lx) の捕食数は、どちらも全く同じであるという結果が報告されている (Dieguez & Gilbert 2003)。しかしながら、この試験容器は 200cc と小さく、この中に 20 個体の大型ミジンコを放養した捕食実験であった。このため被食者との遭遇率が極度に高くなり、明暗時で同じ捕食率になったと考えられた。本実験の結果では、振動のみで捕食する照度 0lx において捕食は起きたが、捕食率は他の照度よりも有意に低くなった。

また視覚捕食者のヤゴ (*Anax* sp.) と視覚・化学刺激・機械感覚機能で捕食者を感知するオタマジャクシ (*Pseudacris regilla*) との実験において、明所 (400lx) では攻撃の回数は多いが成功率は低く、暗所 (0.2lx) では攻撃回数が少ないが成功率が高いため、総合的な捕食リスクは明暗間で変化がないことを示した。被食者のオタマジャクシは暗所において至近距離でしか捕食者を認識できないため、捕食者の攻撃成功率が上がったと推測している (Luttbeg *et al.* 2008)。この捕食者であるヤゴは移動能力が低く、完全な待ち伏せ型の視覚捕

食者である。このような場合の捕食リスクは、被食者 (*P. regilla*) の感覚機能が大きく左右することを示している。本実験で用いたコマツモムシは待ち伏せ型としては高い移動能力を持つことから、機械感覚器で視覚より遠くにいる獲物の位置を捕捉して追尾を行った。一方、稚魚は薄明かりの照明下 (3-300lx) では捕食者の発見が明所よりも遅れる。このため稚魚より捕食者が条件的に優位になり照度 3000lx より、薄明りの照明下 (3-300lx) で捕食率が向上するが、完全な暗所では、双方ともに視覚による相手の感知が遅れるために捕食数が低下すると考えられた。

本実験の結果は明所において捕食が多くなるという既往実験を支持するものであったが、照度によって捕食率が変化した。照度 0lx と 3000lx より 3, 30, 300lx において捕食率が高いことは、朝夕の薄暗い時間帯においてはコマツモムシによる捕食のリスクが高くなると推測された。これから、種苗育成池の近くに外灯などを設置することは、夜間、反射光を感知するコマツモムシを池に誘引させるだけでなく、池内のコマツモムシの捕食も増加させてしまう。また、3000lx は日中の明るさに匹敵することから、食害が最も多く起きる稚魚の放養は早朝や夕方を避けて、日中に行うことで捕食が減少するものと考えられる。

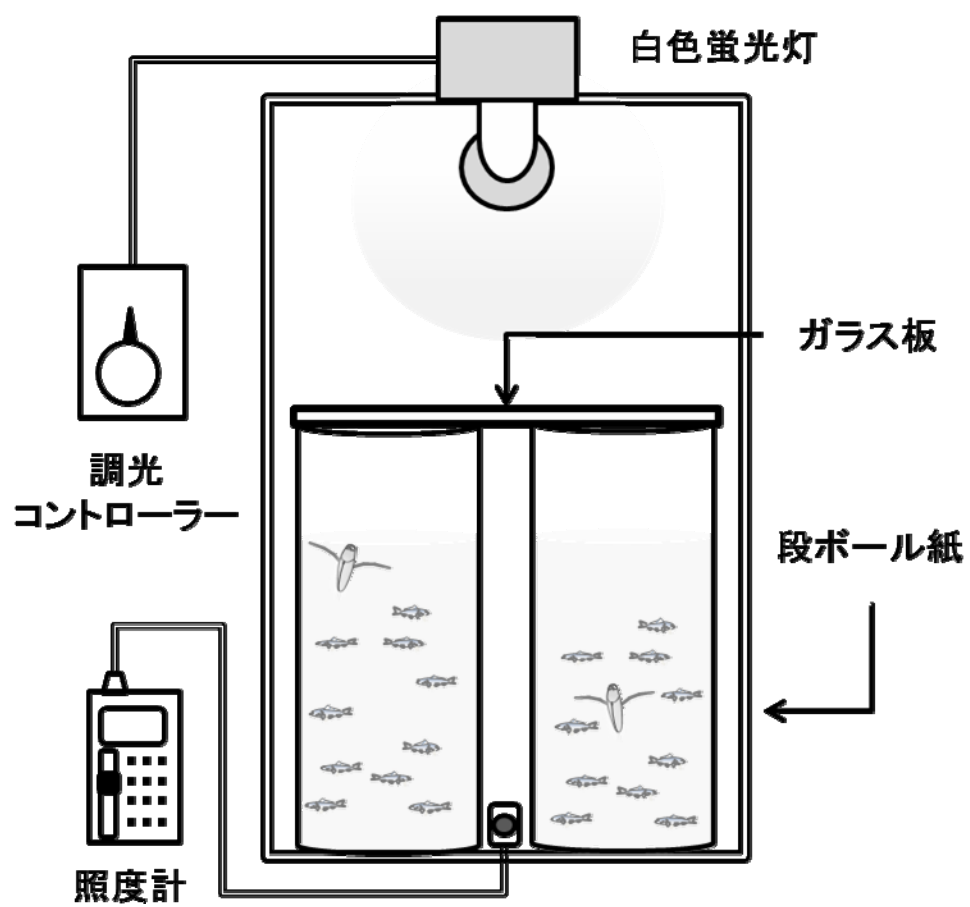


図 4 - 1 4 . 照度実験の図

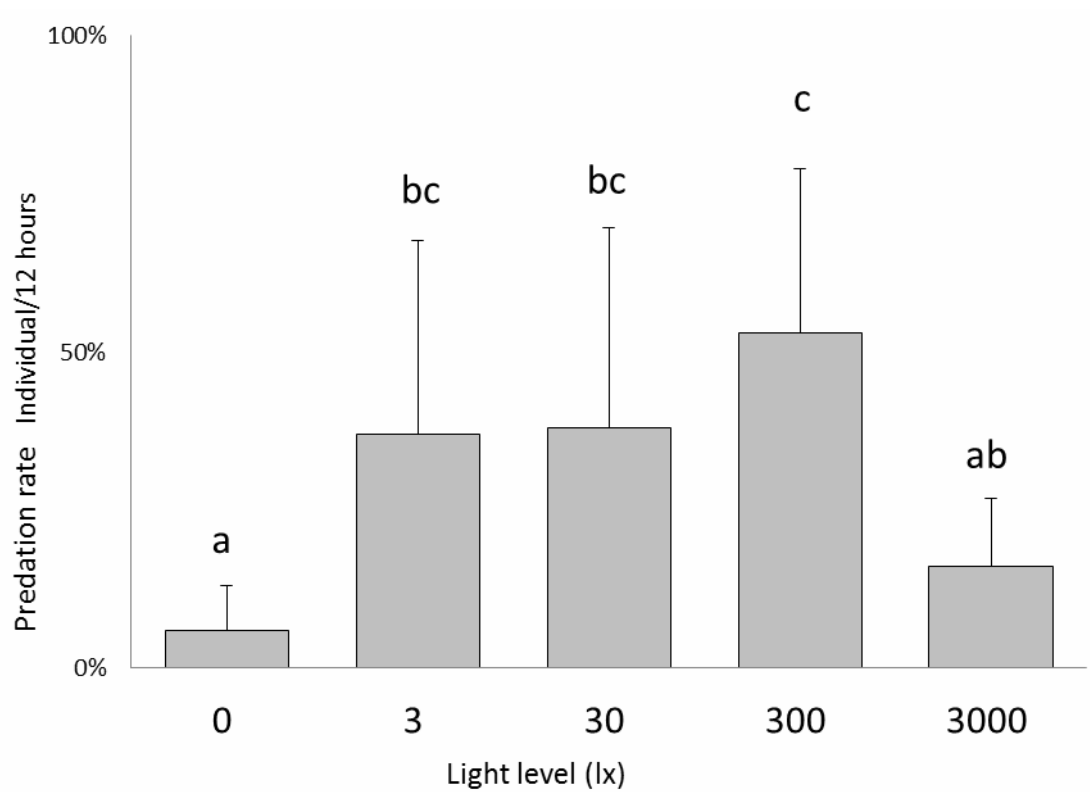


図 4 - 1 5 . 照度と捕食率（英小字間に有意差あり $p < 0.05$ ）

第5章 総合考察

本研究は、ラオスにおいてコマツモムシ属 (*Anisops*) が食害する養殖種苗の実態を把握することを目的として、ラオスの種苗生産者に対する水生昆虫による食害の意識調査、実際に種苗育成池に出現する食害水生昆虫の把握、それらによって主要な食害水生昆虫であると推測された、コマツモムシ属の捕食行動と稚魚の食害の実態を観察した。

本章では、これらの結果を元にコマツモムシ属による種苗食害の被害規模について推測し、次いで、コマツモムシ属による食害防除の方法を既往研究の成果も踏まえて評価する。最後に、これらの知見に基づき、ラオスの種苗生産のための改善案を提案する。

5-1 コマツモムシ属による食害

第4章の結果から、孵化後3日目の稚魚を注水3日後の育成池に放養した場合、*Anisops bouvieri* 1尾による24時間の稚魚の食害尾数は、*Barbonymus gonionotus* は2.8尾、*Cirrhinus cirrhosus* 5.5尾、*Cyprinus carpio* 4.8尾と推定した。第3章の結果から、コマツモムシ属成虫の平均出現個体数は18.5尾/m²であったことから、24時間における放養した稚魚の捕食尾数は、*B. gonionotus* 51.8尾/m²、*C. cirrhosus* 101.8尾/m²および*C. carpio* 88.8尾/m²と推定された。ラオスにおける稚魚の適正放養尾数は、*B. gonionotus* 500尾/m²、*C. cirrhosus* 250尾/m²および*C. carpio* は190尾/m²である (FAO 1998, 表5-1)。このことから、適正放養尾数に対しての捕食率は、*B. gonionotus* 10.4%、*C. cirrhosus* 40.7%および*C. carpio* 88.8%である (表5-1)。

しかしながら、この推定値は水槽における捕食数と観察された捕食者の密度を単純に掛け合わせた推定値である。実際の種苗育成池には陸生植物、小

石、側壁や池底の凹凸、枯枝や枯草など多様な物理的環境が存在する。既往の研究において、池内の障害物が *A. bouvieri* による捕食量を増加させることが報告されている (Saha *et al.* 2008)。また植物・動物プランクトンやボウフラといった他の餌生物が、コマツモムシ属の嗜好性に与える影響も大きいものと考えられる。さらには降水量、水温、水質および土質といった自然環境による影響、農薬の散布による影響 (Hurlbert *et al.* 1971) および夜間に外灯や民家から漏れる照度による影響等、様々な周辺環境の影響を受ける。通常の養殖において、隣り合った同じ面積の養殖池でも、その池の水質が異なることで、養殖魚の生産高は往々にして異なる。この水質の違いはコマツモムシ属の出現量にも大きく関係していることが推測される。そのようなことを考慮すると、本研究の結果はそのまま、ラオスにおけるコマツモムシ属による食害の実態を定量的に表していると言い切れない。しかしながら、本推定値はラオスの種苗生産現場において、コマツモムシ属による食害規模が潜在的に大きく、種苗の生残率を大きく低下させる要因と成り得ることを示している。

第 2 章の聞き取り調査結果での種苗生産者は、水生昆虫の被害を認識しており、採集調査と捕食実験の結果は、彼らの認識を裏付けている。加えて、聞き取り調査の結果、孵化 45 日後の種苗の生残率は 20~30% 前後、すなわち 45 日間で 70~80% が何らかの原因で斃死している。既往の知見によると *Anisops bouvieri* の成虫は 2 時間に 1 尾の *C. cirrhosus* 稚魚を捕食し (Gorai & Chaudhuri 1962)、ボウフラ (*Culex quinquefasciatus*) を被食者に用いた実験では 6 日間安定して捕食し続けたことが報告されている (Saha *et al.* 2007)。すなわち、コマツモムシ属は持続的に捕食を行い、短期的に過剰な捕食を行い飽食することはあまりないと考えられる。今回得られた捕食量の推定値は種苗生産者の回答した値を遥かに超えていた。捕食実験の結果から、コマツ

モムシ属による捕食が、種苗育成時の稚魚減耗の主要因になっていることは十分に推測可能である。従って種苗生産者は稚魚の生残率を改善するために、食害に対して何らかの対策を講じる必要がある。

5-2 既往の水生昆虫対策とコマツモムシ

水生昆虫による種苗の捕食は古くから養殖の問題点として認識されている（津田 1962）。これに対し、既往の水生昆虫の対策は駆除がその主体になっている。例えば、ディーゼルオイルや植物油を散布して池の水面に薄膜を張り、水生昆虫の空気呼吸を阻害して窒息死させる方法（Bardach *et al.* 1972, Pillay 1990, Bright *et al.* 2002）、またマラチオン等の殺虫剤で駆除する方法などである（Hurlbert *et al.* 1971, Bardach *et al.* 1972, Brown & Gratzek 1980, Kumar *et al.* 1993）。

ラオスの農山村地域の養殖池で利用した水は、近隣の生活水、畑作、家畜および水田等に再利用される。このため、油や農薬の散布は川下の住民や水田等を汚染する。また第3章の結果から、コマツモムシ属は他の生息水域から飛来することが示唆された。このため、仮に種苗育成池に生息する水生昆虫を全て駆除しても、油の被膜を取り除いた後、もしくは注水して農薬を薄めた時点でコマツモムシ属は再び飛来する。このように、既往の対策があるにもかかわらず、種苗生産者がコマツモムシ属を問題として認識し続けていることは、これらの対策が必ずしも効果的ではないことを示している。その背景には、周辺からの飛来による侵入があるものと推測される。さらに、殺虫剤の使用に関しては他の水生生物への悪影響が懸念され、Cook *et al.* 2005 は水生昆虫の駆除に使われるマラチオンは 2.0ppm でゼブラフィッシュ（*Danio rerio*）の生残率と孵化率を減少させることを報告している。

コマツモムシ属は種苗の食害を起こす害虫である（松田 1962）というのが、

本研究の立場であるが、一方でマツモムシ科はマラリア、フィラリア症およびデング熱等の多くの感染症の媒介者である蚊の幼虫（ボウフラ）を捕食する益虫として古くから研究されている（Pnicker *et al.* 1977, Saha *et al.* 2008）。さらにタガメ、ヤゴ、ゲンゴロウといった大型の水生昆虫は、ラオス人が好む食材でもある（自然環境センター 2008, 2009）。このような観点からも周辺の水環境を汚染する油や薬物の散布といったこれまでの水生昆虫の駆除方法は、ラオスの農山村地域において受け入れ難い技術である。

以上のことから、既往の駆除方法は、ラオスにおいてコマツモムシ属の対策としては不十分かつ不適切であると言える。

第4章のサイズ別捕食実験で示した結果、稚魚の全長 9.0 mm から 12.0 mm 以上になるとコマツモムシ属による捕食数が大きく減少した。この安全な稚魚サイズに達するまで、水生昆虫をコントロールできる環境下で集約的に稚魚を育成すれば、食害を大きく減らせることを意味する。その後には十分な大きさに育成した稚魚を種苗生産池に放養すれば、水生昆虫による捕食リスクを避けるだけでなく、コマツモムシ属の侵入を気にせず、種苗育成池に十分な時間をかけて施肥を行い、餌生物を湧かすこともできるため、放養後の稚魚の成長も期待できる。

第4章の行動観察実験では、コマツモムシは主に水面付近で浮遊し、メダカ稚魚はコマツモムシと対極の深い層へ移動した。この両者の分布域の距離を広げることで捕食機会を減少させることも対策として考えられた。具体的な対策としては、一般的に種苗を育成池に放養する瞬間において、食害の被害が大きいことから、種苗育成池の深い部分において稚魚を放養することで放養直後の食害が減少することが考えられる。また、種苗育成池を深くすることでコマツモムシと稚魚の遭遇機会が減少して食害が減ると思われる。特に、途上国の素掘り池は池際が崩れて水深が浅くなることが多く、このよう

な池際部分に注意を払って補修すべきである。

第4章の照度の実験では、薄明かりにおいてコマツモムシの捕食数が増加した。このことは、稚魚放養時において照度を配慮する必要性を示した。そのような観点からは、稚魚を種苗育成池に放養する時間帯は明るい日中が推奨される。しかしながら、マツモムシ科は水温の上昇によって捕食行動が活性化することが報告されているため (Murdoch *et al.* 1984)、午前中の明るく、しかも水温が低い時間帯、およそ8時から10時を目途に放養すべきである。さらに照度による捕食リスクの増加として考えられるのは、養殖池に設置した誘蛾灯の明かりが種苗生産池に影響することや、民家の明かりが種苗育成池に届くことである。このような場合、夜間の微弱な照度が、コマツモムシ属による捕食を増長する恐れがある。加えて、マツモムシは飛行する際、水面から反射する偏光に誘引されることが知られている (Schwind 1983)。このことは、種苗育成池周辺の照明の光が水面に反射して、新たな捕食者を引き寄せる可能性も孕んでいる。従って、種苗育成池付近の誘蛾灯や外灯を撤去するなどの対策が必要で、撤去できない場合は付近の池を種苗育成池にしないといった対策が必要である。

5-3 種苗生産方法の改善

前節において、調査実験から得られた知見をもとにいくつかの対策を提言した。この中で本節では、集約的な育成方法についてさらに詳しく検討した。

集約的な育成方法とは、陸上にセメント水槽を設置して、稚魚をここで短期間、高密度で育成する方法である。ここでは、このセメント水槽の上に防虫ネットを張り、用水の落差を利用した揚水ポンプを使わない半流水式として、9日間中間育成をした場合の費用対効果を試算した。種苗生産者は種苗育成池 500 m² 1 池、種苗育成や販売用の資機材一式（例えば、曳き網や酸

素ポンベ)を既に所有していると仮定する。セメント水槽の面積は、3.00 m²で高さ約 1.0m とすると、材料費はラオス通貨で 1,800,000kip (日本円約 18,000 円) (FAO 1998) である。これにエアーポンプ等備品費と配合飼料費として約 405,000kip (4,050 円)を加えた合計額は 2,205,000kip (約 22,050 円)となる。通常、45 日目の種苗は 1 尾 100kip (約 1 円)で販売される。例えば生残率が 10%向上すると、500 m²の種苗生産池で増産する種苗尾数(売上額)は *B. gonionotus* で 25,000 尾 (2,500,000kip、約 25,000 円)、*C. cirrhosus* で 11,500 尾 (1,150,000kip、約 11,500 円)、*C. carpio* で 9,500 尾 (950,000kip、約 9500 円)と算出される。この種苗育成 1 回分の増収は原材料費に対して 113.7%、52.2%および 43.3%となる。種苗育成は年間に数回繰り返すことから、この方法は投入額に見合う採算性は十分にある。

B. gonionotus の近縁種の孵化直後の仔魚は体長 3.0 mm前後と小さいことから、他の魚種よりも収容可能密度が高く、集約的な育成に向いている。しかしながら、この集約的な育成方法には幾つかの問題点がある。*B. gonionotus* の初期餌料はミジンコ類やコペポダ類では大きすぎて口径に合わないため、ワムシ類が適している (Ogata *et al.* 2010)。近年、ラオスの小型ワムシの培養方法が確立したが (Ogata *et al.* 2010)、これは種苗生産者が利用できるような培養技術にまで開発されていない。餌料生物が十分に供給できるようになれば、稚魚の成長速度や健苗性も増すことから、育成期間を短縮でき、効率的な中間育成が可能になる。また今回の試算のセメント水槽は 3.00 m²としたが、水槽容積に対して収容可能な仔魚の密度の検討も行わなくてはならない。加えて集約的な育成の成功による利益率は高いが、その実施には、高い労働投入や繊細な管理が必要である。例えば、種苗の飼育管理者が焼畑や家畜の放牧などの農作業に束縛されている農民である場合、日々の種苗の管理に時間を多く割くことは不可能である。むしろ、養殖池周りの作業のみに従事しているような女性や

重労働ができない高齢者などが飼育管理者として適している。飼育管理者の活動が制限されるというデメリットがある一方、集約的な種苗育成には、余剰分の放養種苗を販売できるという利点もある。

ラオスやその周辺国では、種苗としての稚魚は、ポリエチレン袋に詰められて販売される。通常、長距離を輸送して販売されるのは全長 2~3 cmに達した稚魚である。このサイズに達した稚魚を袋詰めにして、長距離移動する場合、一袋に入れる稚魚数を大きく減らさなければならず、一度に大量の種苗を長距離移動することは困難であった。しかしながら、全長 9.0 mmから 12.0 mmの種苗はまだサイズが小さいことから、袋の収容密度を上げることが可能なため、一度に大量の稚魚を農山村地域の養殖農家に配布することも可能であろう。

表 5 - 1 . 各養殖対象魚種を各孵化後日数で放養した時のコマツモムシ属による推定捕食尾数（24 時間）（放養尾数に対する割合）

魚種	適正放養 尾数* (/m ²)	孵化後日数			
		3	6	9	12
<i>Barbonymus gonionotus</i>	500	51.8 (10.4%)	144.3 (28.9%)	51.8 (10.4%)	83.3 (16.7%)
<i>Cirrhinus mrigala</i>	250	101.8 (40.7%)	61.1 (24.4%)	24.1 (9.6%)	0.0 (0.0%)
<i>Cyprinus carpio</i>	190	88.8 (46.7%)	92.5 (48.7%)	27.8 (14.6%)	27.8 (14.6%)

*Smith & Meenakarn 1998

要約

人口の 77%が農山村地域に暮らすラオスにおいて、小規模養殖は地域の貧困削減や食糧安全保障に大きく寄与する生産活動である。この小規模養殖を普及するには種苗の安定的な供給が必要不可欠である。現在、ラオスの農山村地域の養殖農家への種苗の供給経路は、1. 隣国からの輸入、2. 政府機関による生産と供給、3. 国内の種苗生産業者による生産と販売の3つがある。ラオス政府はこのうち3の国内の種苗生産者による種苗生産の増産を政策的に推進している。

しかしながら、いまだラオス国内の種苗生産量は不安定で、需要を満たす安定的な供給は実現していない。その原因の一つとして種苗育成池における水生昆虫による種苗の食害が指摘されている。

本研究では、ラオスの農山村地域における、種苗の主要な食害水生昆虫を明らかにするための種苗生産者に対する聞き取り調査、実際の種苗育成池に出現する捕食性水生昆虫の採集調査、コマツモムシ属による養殖種苗の捕食実験を行い、水生昆虫による捕食の被害量を推定するとともに、捕食行動の観察を行い、コマツモムシ属による種苗の捕食対策を提言した。

種苗生産の実態調査

ラオスの種苗生産における問題点を明らかにし、その中で水生昆虫による養殖種苗の食害の重要性を把握するために、種苗生産者に対して聞き取り調査を実施した。この結果、主要な養殖対象魚種は *Barbonymus gonionotus*, *Cirrhinus cirrhosus*, *Cyprinus carpio* の3種であり、これらの魚種の種苗育成時の問題点として、水生昆虫、特にマツモムシ科による食害が最も深刻であると認識されていることなどが確認された。そこで、種苗生産の対象種

としては *B. gonionotus*, *C. cirrhosus* および *C. carpio* を選び、これらに対するマツモムシ科による捕食の実態を明らかにし、それに対する対策を提言することを、本研究の具体的な課題とした。

種苗育成池での水生昆虫採集調査

種苗育成池に出現する一般的な捕食性水生昆虫であるコマツモムシ属 (*Anisops*) の出現個体数と生物量を推定するために採集調査を行った。採集調査の結果、合計 1450 個体 8 科の捕食性の水生昆虫を同定した。出現した主な捕食性水生昆虫はイトトンボ科 (*Coenagrionidae*)、トンボ科 (*Libellulidae*)、マツモムシ科 (*Notonectidae*)、アメンボ科 (*Gerridae*)、ゲンゴロウ科 (*Dytiscidae*)、ガムシ科 (*Hydrophilidae*) であった。この中でマツモムシ科の生物量は全体の 42.9% と最も多く占めた。主要 4 科の出現状況を時系列的にみるとマツモムシ科は採集調査初日から卓越していた。その原因としてコマツモムシ属の成虫が注水後、他の生息域から飛来していることが示唆された。この結果は、コマツモムシ属による食害が最も深刻であるという、前章の結果を裏付けるものであった。

コマツモムシ属による捕食実験

コマツモムシ属と養殖対象魚種において稚魚サイズと捕食の関係を比較し、捕食の限界サイズを把握するため、養殖対象の 3 魚種 (*B. gonionotus*, *C. cirrhosus*, *C. carpio*) とコマツモムシ (*Anisops bouvieri*) を用いて室内実験を行った。この結果、*C. cirrhosus* と *C. carpio* の斃死個体数は稚魚の成長とともに減少することが示された。対照的に *B. gonionotus* は実験期間を通して不安定であった。原因として試供魚の成長が遅かったことが考えられた。結果から、稚魚の全長が 9.0 mm から 12.0 mm (*B. gonionotus* 孵化後

21 日目、*C. cirrhosus* 孵化後 9 日目、*C. carpio* 孵化後 9 日目）まで成長すると、それ以上の大きさの稚魚はほとんど捕食されないことが示された。

次にコマツモムシ属による捕食対策を立てるための基礎的情報を得る目的で、コマツモムシ (*Anisops ogasawarensis*) によるメダカ (*Oryzias latipes*) 稚魚の捕食行動を室内の環境下で観察した。コマツモムシは水面付近に最も多く分布した。また待ち伏せ型の捕食行動を示し、メダカ稚魚が追尾圏内 (約 5 cm) に入ると追尾を開始し攻撃を仕掛けた。この追尾の方向は上向きが最も多く記録された。以上の結果は、稚魚が比較的離れている場合には、コマツモムシは腹面にある機械的振動の受容器を使って稚魚を認識し、至近距離においては、視覚的に被食者を認識していると考えられた。

また捕食において視覚がどのように影響しているかを評価するために明暗所 (0, 3, 30, 300, 3000Lx) で捕食実験を実施した。明暗所の実験結果から、捕食率は暗所に近い 0Lx と曇りの日中時に近い 3000Lx の時に低く、薄暗い (3~300Lx) 環境で多くなった。これはコマツモムシ属の捕食が日中の明るい時間帯に少なく、朝夕の薄暗がり時に多いことを示し、また、夜間の誘蛾灯や民家の明かりが種苗育成池に届くことで捕食リスクが増加することが考えられた。

種苗生産方法の改善

最終章では、コマツモムシによる種苗食害の被害規模について推定し、次いで、コマツモムシ属の対策方法を既往研究から検討した。最後に、これらの知見に基づき、ラオスの種苗生産の改善案を提言した。

第 4 章の結果から、孵化後 3 日目の稚魚を注水 3 日後の育成池に放養した場合、稚魚の適正放養尾数に対して、コマツモムシ属の平均出現個体数から、24 時間における放養した稚魚の捕食率は *B. gonionotus* 4.5%、*C.*

cirrhusus 17.6%および *C. carpio* 20.2%と推定した。この推定値はコマツモムシ属が種苗育成池で無視できない被害を種苗に与えていることを推測させるに十分な値である。従って種苗生産者は稚魚の生残率を上げるために、食害に対して何らかの対策を講じる必要がある。

過去の既往の水生昆虫の対策を検討した結果、既往の食用油や殺虫剤を使った駆除方法はコマツモムシ属の対策としては効果が得られていないこと、また、環境への影響や他の水生昆虫を食料とする食文化を持つラオスにおいては、不適切であることが明らかになった。

コマツモムシ属の対策として、稚魚サイズの捕食実験の結果から稚魚を集約的に 9.0 mmから 12.0 mmまで育成させてから種苗育成池に放養する方法、行動様式実験の結果から水面で浮遊するコマツモムシと稚魚を遭遇させないよう養殖池の水深を深くとる方法が考えられた。また、照度実験の結果から配慮すべき点として、夜間の照明がある近くの池を種苗育成池としない、また稚魚の放養は午前中の明るいうちに行うことなどが提案された。

さらに放養する稚魚のサイズを 9.0 mm以上にするために、小型の水槽で集約的な種苗育成を行う費用の試算をした。その結果、投入額に見合う採算性があることが示された。この方法には種苗の餌料生物培養技術の普及や適性放養密度など幾つかの課題が残されているが、これらの課題が克服されれば、インフラ未整備の地域に対しての新しい種苗生産の方法となると思われた。

謝辞

本研究を行うにあたって、研究の機会を与えて頂くとともに、終始温かい御指導と御鞭撻を賜った東京大学大学院農学生命科学研究科の黒倉壽教授に謹んで御礼申し上げます。また、本研究に対して適切なご指導を賜り、本論文の御校閲をして頂きました、佐野光彦准教授（現農学生命科学研究科教
授）に厚く御礼申し上げます。

本論文を御校閲して頂きました、東京大学総合研究博物館の遠藤秀紀教授、農学生命科学研究科の松本安喜准教授および八木信行特任准教授には、厚く御礼申し上げます。

研究全般について有益な御指導および激励を賜りました、東海大学海洋学部の石川智士准教授には、ここに深く感謝いたします。

ラオスにおける現地調査では、ラオス農林省畜水産局水産課 Nouhack 氏、Akhane 氏、Douangtavan 氏、Seangmani 氏始めスタッフの皆様には、研究のみならず様々な便宜やサポートを頂きましたことを深く御礼申し上げます。ラオスにおける実験では、現地で多大なご協力を頂いた、東海大学海洋学部の吉川尚助教、三好晃治氏、渡辺貴光氏、佐々木直人氏に厚く御礼申し上げます。

日頃より多くの御助言や励ましを頂いた、国際農林水産業研究センターの森岡伸介博士、NPO アジア農山漁村ネットワーク代表の池ノ上宏氏に御礼申し上げます。

国際水産開発学研究室の高木映博士には、投稿論文や多くの御指導を頂きました。また、進士淳平氏、緒方悠香氏、阪井裕太郎氏を始め同研究室に在籍している皆様からは、多くの助言と支援を頂きましたことを心より感謝いたします。

株式会社国際水産技術開発の代表取締役大橋元裕氏、同取締役赤津澄人氏、同社社員の方々には、社会人博士課程として就学の機会を与えて頂いたことを深く感謝いたします。

最後に、長年にわたる研究生生活は家族の支えなしでは成しえなかった。常に応援してくれた両親、妻そして娘と息子に心より感謝します。

引用文献

- Adeyemo, A. A. *et al.* (1997) Predation by aquatic insects on African catfish fry. *Aquaculture International*, **5**, 101-103.
- Ahmed, M. & Lorica, M. H. (2002) Improving developing country food security through aquaculture development-lessons from Asia. *Food policy*, **27**, 125-141.
- Bardach, J. E., Ryther, J. H. & Mclarney, W. O. (1972) Aquaculture The farming and husbandry of freshwater and marine organisms. Wiley-Interscience, New York, pp. 127, 136.
- Blaustein, L. (1998) Influence of the predatory backswimmer, *Notonecta maculate*, on invertebrate community structure. *Ecological Entomology*, **23**, 246-252.
- Bright, L. A. *et al.* (2002) Laboratory evaluation of the relative effectiveness of plant and animal source oils for control of Notonectidae in fish ponds. *North American Journal of Aquaculture*, **64**, 210-211.
- Brooks, G. T. (1951) A revision of the Genus *Anisops* (Notonetidae, Hemiptera) , *The University of Kansas Science Bulletin*, **8**, 301-519.
- Brown, E. E. & Gratzek, J. B. (1980) Fish farming handbook. AVI Publishing Company, ING, Connecticut, USA, pp. 185.
- Brown, G. E. & Magnavacca, G. (2003) Predator inspection behavior in a Characin fish: an interaction between chemical and visual information? *Ethology*, **109**, 739-750.
- Brown, G. T. & Cowan, J. (1999) Foraging trade-offs and predator

- inspection in an Ostariophysan fish: switching from chemical to visual cues. *Behaviour*, **137**, 181-195.
- Bush, S. R. & Kosy, S. (2007) Geographical distribution of investment in small-scale rural fish ponds. *Aquaculture economics & Management*, **11**, 285-311.
- Bush, S. R. (2003) Comparing what matters with what is done: Fisheries and aquaculture in the Lao PDR.
<http://www.ibcperu.org/doc/isis/2940.pdf>.
- Choulamany, X. (2005) The importance of upland fisheries in the Lao PDR: A case study. *NAFRI workshop proceeding*, pp. 341-352.
- Cook, L. W. *et al.* (2005) The pesticide Malathion reduces survival and growth in developing Zebrafish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **24** (7) , pp. 1745-1750.
- Department of Livestock and Fisheries, Ministry of Agriculture and Forestry Lao PDR. (2004) Results of activities from September 2003 to August 2004. [In Lao language].
- Department of Livestock and Fisheries, Ministry of Agriculture and Forestry Lao PDR. (2006) National and provincial aquaculture stations 2006, Department of Livestock and Fisheries, Vientiane.
- Department of Livestock and Fisheries, Ministry of Agriculture and Forestry Lao PDR. (2006) The National Strategy for Fisheries from the present to 2020. Action plan for 2006 to 2010. Ministry of Agriculture and Forestry in Lao PDR, Vientiane, pp. 14.
- Dieguez, M. C. & Gilbert, J. (2003) Predation by *Buenoa macrotibialis* (Insect, Hemiptera) on zooplankton: effect of light on selection and

- consumption of prey. *Journal of Plankton Research*, **25** (7) , 759-769.
- Edwards, P. (2000) Aquaculture, poverty impacts and livelihoods. *Natural resource perspectives*, **56**, 1-4.
- Edwards, P., Little, D & Yakupitiyage, A. (1997) A comparison of traditional and modified inland artisanal aquaculture systems. *Aquaculture Research*, **28**, 777-788.
- Edwards, P., Little, D. C. & Demaine, H. (2002) Rural aquaculture. CABI publishing, New York, pp. 155-156.
- FAO (1988): Field manual on common aquaculture practices in Lao PDR.
<http://www.fao.org/docrep/field/003/AC490E/AC490E00.htm>
- FAO (1998) Small-scale fish hatcheries for Lao PDR.
<http://www.fao.org/docrep/007/ae378e/ae378e00.htm>
- FAO (1999) Support for technical services Guideline for broodstock and hatchery management. FAO, Bangkok, pp. IV.
- FAO (2000) Small ponds make a big difference.
<http://www.fao.org/docrep/003/x7156e/x7156e00.htm>
- FAO (2002) Aquatic animal health management issues in rural aquaculture development in Lao PDR.
<http://www.fao.org/docrep/005/y3610e/y3610e00.htm>
- FAO (2003) Review of the state of world aquaculture.
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/005/y4490e/y4490e00.pdf>
- FAO (2006) State of world aquaculture 2006.
<http://www.fao.org/docrep/009/a0874e/a0874e00.htm>
- FAO (2007): Role of freshwater fish seed supply in rural aquaculture.
<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1495e/a1495e28.pdf>

- Frankic, A & Hershner, C. (2003) Sustainable aquaculture: developing the promise of aquaculture. *Aquaculture International*, **11**, 517-530.
- Freund, R. L. & Olmstead, K. L. (2000) The roles of vision and antennal olfaction in enemy avoidance by three predatory Heteropterans. *Population Ecology*, doi: 0046-225X/00/0733-0742\$02.00/0.
- Gilbert, J. J. & Burns, C. W. (1999) Some observations on the diet of the backswimmer, *Anisops wakefieldi* (Hemiptera: Notonectidae) . *Hydrobiologia*, **412**, 111-118.
- Gilbert, J. J., Burns, C. W. & Gilbert, C. C. (1999) Summer distribution patterns of the backswimmer, *Anisops wakefieldi* (Hemiptera: Notonectidae), in a New Zealand pond. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **33**, 661-672.
- Gonzalez, A. V. & Leal, J. M. (1995) Predation potential of some aquatic insects (*Pantala*, *Coenagrion*, *Tropisternus*, *Notonecta* and *Sigara*) . *Journal of Applied Aquaculture*, **5** (1) , 77-82.
- Gorai, A. K. & Chaudhuri, D. N. (1962) Food and feeding habits of *Anisops bouvieri* Kirk. (Heteroptera: Notonectidae) . *Journal of the Asiatic Society*, **4** (3-4) , 135-139.
- Grant, J. W. & Bayly, I. A. E. (1981) Predation induction of crests in morphs of the *Daphnia carinata* King complex. *Limnology & Oceanography*, **26** (2) , pp. 201-218.
- Gupta, M. V., Spaphakdy, B. & Khamsivilay, L. (2000) Review of aquaculture support to Lao PDR during 1975-2000. *LARReC Technical Report No. 0004*, Vientiane.
- Hampton, S. E. & Gilbert, J. J. (2001) Observations of insect predation

- on rotifers. *Hydrobiologia*, **446/447**, 115-121.
- Heckman, C. W. (1974) The seasonal succession of species in a rice paddy in Vientiane, Laos. *Int. Revue ges. Hydrobiol*, **59** (4) , pp. 489-507.
- Hurlbert, S. H. *et al.* (1971) Effects of an organophosphorus insecticide on the phytoplankton, zooplankton, and insect populations of fresh-water ponds. *Ecological Monographs*, **42** (3) , 269-297.
- IRRI (2001) The role of small-scale aquaculture in rural development. <http://www.seafdec.org.ph/pew/pub/iirr00.pdf>.
- Kumar, K., Ayyappan, S. & Murjani, G. (1993) Eradication of the predatory insect *Anisops* sp. (Notonectidae) in freshwater fish ponds using Malathion. *J. Aqua. Trop.*, **8**, 245-248.
- Lang, H. H. (1980) Surface wave sensitivity of the back swimmer *Notonecta glauca*. *Naturwissenschaften*, **67**, 204-205.
- Louarn, H. L. & Cloarec, A. (1997) Insect predation on pike fry. *Journal of Fish Biology*, **50**, 366-370.
- Luttbeg, B., Hammond, J. I. & Sih, A. (2008) Dragonfly larvae and tadpole frog space use games in varied light conditions. *Behavioral Ecology*, doi: 10.1093/beheco/arn107.
- Marco, P. D., Latini, A. O. & Reis, A. P. (1999) Environmental determination of dragonfly assemblage in aquaculture ponds. *Aquaculture Research*, **30**, pp. 357-364.
- Matthews, P. G. D. & Seymour, R. S. (2006) Diving insects boost their buoyancy bubbles. *Nature*, **441**, 171.
- Michaels, V. K. (1988) Carp farming. Fishing News Books Ltd, Surrey,

- England, pp. 125.
- MRC (2002) Freshwater aquaculture in the lower Mekong Basin.
http://www.mrcmekong.org/free_download/research.htm.
- Murdoch, W. W., Scott, M. A. & Edsworth, P. (1984) Effects of the general predator, *Notonecta* (Hemipetra) upon a freshwater community. *The Journal of Animal Ecology*, **53** (3) , pp. 791-808.
- Murphey, R. K. & Mendenhall, B. (1973) Localization of receptors controlling orientation to prey by the back swimmer *Notonecta undulate*. *J. comp. Physiol.*, **84**, 19-30.
- Nieser, N. (1998) Introduction to the Notonectidae (Nepomorpha) of Thailand. *Amemboa*, **2**, 10-14.
- Ogata, Y. *et al.* (2010) Growth and morphological development of laboratory-reared larvae and juveniles of the Laotian indigenous cyprinid *Hypsibarbus malcolmi*. doi: 10.1007/s10228-010-0173-3.
- Osse, J. W. M. & Boogaart, J. G. M. V. D. (2000) Body size and swimming types in carp larvae effects of being small. *Netherlands Journal of Zoology*, **50** (2) , 233-244.
- Panicker, K. N. & Rajagopalan, P. K. (1977) Biological control potential of *Anisops bouvieri* Kirkaldy (Hemiptera: Notonectidae) . *Indian J Med Res*, **66** (5) , 772-776.
- Pillay, T. V. R. (1990) Aquaculture Principles and practices. Fishing News Books Ltd, Oxford, England, pp. 223-224.
- Rainboth, W. (1996) Fishes of the Cambodian Mekong. FAO, Rome, pp. 162.
- Saha, N. *et al.* (2007) A comparative study of predation of three aquatic

- hateropteran bugs on *Culex quinquefasciatus* larvae. *Limnology*, **8**:73-80.
- Saha, N. *et al.* (2007) Comparative study of functional response of common Hemipteran bugs of East Calcutta wetlands, India. *Internat. Rev. Hydrobiol.*, **92**, 242-257.
- Saha, N. *et al.* (2008) Influence of light and habit on predation of *Culex quinquefasciatus* (Diptera: Culicidae) larvae by the waterbugs (Hemiptera: Heteroptera) . *Insect Science*, **15**, 461-469.
- Saha, N. *et al.* (2010) Opportunistic foraging by hateropteran mosquito predators. *Aquat. Ecol.*, **44**, 167-176.
- Schiller, J. M. *et al.* (2006) Rice in Laos.
<http://dspace.irri.org:8080/dspace/handle/10269/249>
- Schwind, R. (1983) A polarization-sensitive response of the flying water bug *Notonecta glauca* to UV light. *J. Comp. Physiol.*, **150**, pp. 87-91.
- Scott, M. A. & Murdoch, W. W. (1983) Selective predation by the backswimmer, *Notonecta*. *Limnol. Oceanogr.*, **28** (2) , 352-366.
- Stibor, H. (1992) Predator induced life-history shifts in a freshwater cladoceran. *Oecologia*, **92**, 162-165.
- United Nation. (2010) Least developed countries - countries profiles. United Nation, <http://www.unohrlls.org/en/ldc/related/62/>.
- Vientiane Times (2007) Laos needs more juvenile fish. Vientiane Times August 10 2007, Vientiane.
- Ward, J. V. (1992) Aquatic insect ecology. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 51.

- William, D. D. & Feltmate, B. W. (1992) Aquatic insects. CAB International, Wallingford, UK, pp. 110-114.
- World Bank (2006) LAO PDR: Rural and agriculture sector issues paper No. 37566. World Bank, Washington, pp. 2.
- Yamamoto, T. (1975) Medaka (Killifish) biology and strains. Keigaku publishing Co., Ltd., Tokyo, pp. 14.
- 加福竹一郎 (1984) 熱帯アジアの淡水養殖. 社団法人 国際農林業協力協会, 東京, pp. 28-47.
- 花里孝幸 (2003) 捕食者はカイロモンを介してミジンコの個体群動態を制御する: 捕食者の間接影響. 淡水と海洋のプランクトン研究の比較: 捕食者-被捕食者関係に注目して, pp. 123-127.
- 財団法人 自然環境研究センター (2008) 平成 19 年度 インドシナ半島 (ラオス、カンボジア) における「水辺の幸」調査報告書. 財団法人 自然環境研究センター, 東京, pp. 17.
- 財団法人 自然環境研究センター (2009) 平成 20 年度 インドシナ半島 (ラオス、カンボジア) における「水辺の幸」調査報告書. 財団法人 自然環境研究センター, 東京, pp. 65.
- 西田睦・鹿谷法一・諸喜田茂充 (編) (2003) 琉球列島の陸水生物. 東海大学出版会, 東京, pp.293-466.
- 川合禎次・谷田一三 (編) (2005) 日本産水生昆虫. 東海大学出版会, 東京, pp. 27-657.
- 増尾致和 (1980) ラオスにおける淡水養殖開発の経験. 海外養殖魚研究会会報, 10, 1-3.
- 松原喜代松・落合明・岩井保 (1979) 魚類学(上), 恒星社厚生閣, 東京, pp. 105-118.

津田松苗（1962）水生昆虫．北隆館，東京 pp. 25-253.

田付貞洋・河野義明（編）（2009）最新応用昆虫学．朝倉書店，東京, pp.
111-114.

隆島史夫・村井衛（編）（2005）淡水魚．恒星社厚生閣，東京, pp. 121.