様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２９ 年　 ５ 月 ３１ 日現在

機関番号：１４３０１
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2016
課題番号：１５Ｋ１４８３４

研究課題名（和文）遊泳魚の誘導を取り入れた多管型ヘルムホルツ共鳴器による体積計測

研究課題名（英文）Fish volume measurement by multi-helmholtz resonance introducing swimming fish

研究代表者
近藤　直（Kondo, Naoshi）

京都大学・農学研究科・教授

研究者番号：２０１８３３５３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,000,000円

研究成果の概要（和文）：　本研究では多管型水中ヘルムホルツ共鳴器を利用し，魚の体積を計測することにより，そのサイズに合わせた給餌を可能とする精密養魚を目標としている。そのためには，魚を共鳴器に誘導する技術も必要となることから，音刺激による誘導を試みた。その結果，音刺激と給餌の関係を学習して浮上させ，パイプを通過させることが可能であった。さらに多管型共鳴器による共鳴にも成功し，共鳴器の材質による違いも明らかにしたことより，将来的に水中で生簀の間に共鳴機能を有するパイプを設けて魚を仕分ける可能性を示せた。しかし，多管型共鳴器のネックの寸法，数と音圧レベルの関係を明らかにして，実用化のためのデータ提供には課題が残った。

研究成果の概要（英文）：Objective of this research is to proceed "Precision farming in fish culture," in which feeding amount should be calculated based on the fish size according to the growth stages. Multi-neck helmholtz resonance was developed and used for the fish volume measurement in the water. First, Ugui fish were introduced into the pipe which was assuming connect between cages by acoustic stimulation. Several times learning with feeding gave successful results introduing into the pipe. A multi-neck resonator was developed and could be used for measure the air volume in it that means that feasibility to classify fish in the pipe between cages was shown. However, relation between neck number and resonance level and between neck size and the level was not clear yet. Continuous researches are desiable to realize this measument system.

研究分野：生物センシング工学

キーワード：共鳴　体積計測　水中　魚　生簀

１．研究開始当初の背景

日本の漁業生産においては200海里排他的経済水域の国連海洋法条約の関係で，遠洋・沖合漁業を中心に漁獲の縮小が進み，沿岸漁業の比重が年々増大している。さらにクロマグロやニホンウナギのように，乱獲問題などにより絶滅の危機にさらされている種も増えつつあり、「獲る漁業」から「つくる漁業」への移行と共に，給餌型養殖の重要度が増している。しかし，給餌量の２～３割と言われる残餌や糞尿が大きな有機物負荷となり，赤潮やヘドロの発生が増加していることも事実である。水産業では生物を水中管理するため，生産物情報の収集が容易でなく，高品質，高収量を目指した計測技術や環境保全・資源保護の対策が遅れていると言わざるを得ない。そこで，魚の摂餌量，環境情報を正確に計測すると同時に生育中の魚の体積および品質をモニタリングすることで最適給餌を行い，生産コストや環境負荷の低下を計ることが急務である。本研究ではそのうち困難とされてきた遊泳中の生魚の体積（収量）計測に挑戦した。

２．研究の目的

これまで本研究グループではウォーターリード（水流）法により共鳴可能なヘルムホルツ共鳴器を作成し，検量線を用いた有鰾魚の体積測定に成功した（特許申請中））が，この技術を実用的に用いるには，遊泳魚が 1 尾ずつその共鳴器を通過する必要がある。そこで本研究では，まず魚を誘引する方法を検討し，魚が通る通路を有した多管型共鳴器の開発を行い遊泳魚の体積計測を行うこと，およびその共鳴器の理論的考察，設計手法の確立を目的とした。具体的には図１のような装置を目指すこととした。

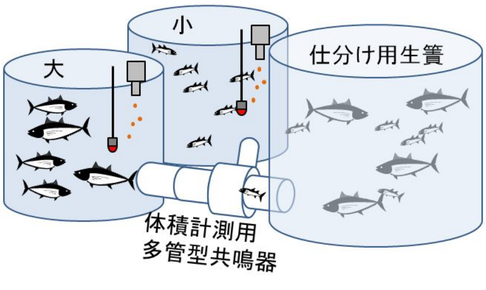

図１　体積による魚の選別

３．研究の方法

(1)　誘導実験

まず，誘導方法として魚の学習能力を用いることを考え，先行研究においてすでに行われているウグイ(*Tribolodon hakonensis*)が音刺激と給餌の関係を学習することによる給餌場への浮上の条件付けを行った。この条件付けを行ったウグイ（学習個体）と行わなかったウグイ（未学習個体）を，装置導入部を想定したパイプを通過させる条件付けを行うことが可能であるかどうか検証した。

測定場所への誘導を考える本研究では，レスポンデント条件付けにおけるゴールトラッキングを用いて誘導することを考えた。レスポンデント条件付けとは，2 種類の刺激が，対象となっている動物の反応とは無関係に提示される手続きのことであり，レスポンデント反応である無条件反応を誘発しない条件刺激と，無条件反応を誘発する無条件刺激が一定の時間的関係で提示される。これを対提示と言う。この対提示により，無条件刺激を提示する前の条件刺激で無条件反応と類似する反応が誘発されるようになる。この反応を条件反応という。ゴールトラッキングとは，レスポンデント条件付けにおいて，条件刺激が与えられた時に，条件付けされている動物が条件刺激に対してではなく，無条件刺激が与えられる場所などに対して反応を示すことである。

魚類における音刺激により給餌場所へ誘導する条件付け学習は，音響馴致，Acoustic conditioning などと呼ばれ，さまざまな魚種で行われている。本研究では，音刺激(条件刺激)と給餌(無条件刺激)を対提示し，パイプを通過し給餌場まで移動する反応を音刺激のみで引き起こすことを条件付けした。

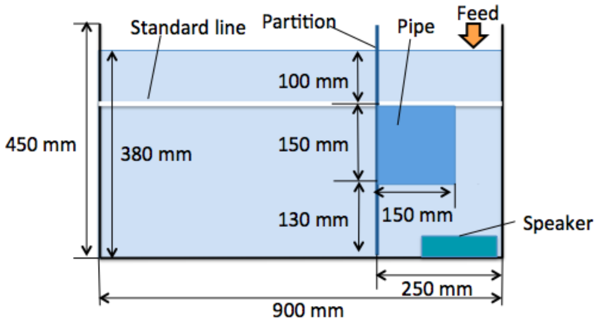

図２　誘導用実験装置

実験に供試した魚は体長 119 mm – 143 mm の 70 匹のウグイを用いた．実験水槽は Fig.1 のように水槽(450 mm×450 mm×900 mm)の水位を 380 mm として用いた。

① 浮上条件付け

本実験では，以下の手順で条件付けを行った。

1)　図２における仕切りとパイプを設置していない実験水槽にウグイを 10 匹投入した。

2)　2 日間馴致した後，水中スピーカーで音刺激(300 Hz，70 dB)を 15 秒間発生させた。

3)　音刺激終了後，浮上性の餌を 0.1 g 投入した。

4)　音刺激中に水面から 100 mm 以内に浮上した個体を，音刺激の後に給餌が行われることを学習した個体と考え，計数した。

5)　ウグイが中低層に戻るまでのこれらの操作を 1 試行とし, 10 試行を 1 セットとした。

6)　各試行の浮上個体数の平均をセット毎の浮上個体数割合として求めた。

これらの条件付けは 1 日に 2 セット行い，実験は独立して 5 回行った.

② 学習個体･未学習個体のパイプ通過条件付け

上述の実験で音刺激と給餌の関係を学習した学習個体が存在する実験水槽に，図２のように仕切りとパイプを水槽の水槽前面から見て右から 250 mm の位置に設置し，1 日馴致した。未学習個体は水槽に 2 日馴致した後，仕切り，パイプを設置し 1 日馴致した。本実験でも前実験と同様の試行を行い，音刺激中のパイプ通過個体数を計数し，パイプ通過個体数割合を求めた。実験は独立して学習個体について 3 回，未学習個体について 2 回行った。

(2)　体積計測実験

図３上に示す共鳴器を図３下の水槽内に入れ，それらと音響装置からなる実験装置を用いて，ウグイの体積計測を試みた。まず，２つのネックを有する共鳴器が実際に共鳴するか否かを調べ，ネックが１つの共鳴器との比較を行った。

次に共鳴器の材料としてアクリルとステンレスを比較することにより，共鳴器の壁のたわみに与える影響を考察した。さらに，実際のウグイを用いて体積計測が可能か否かを調べた。

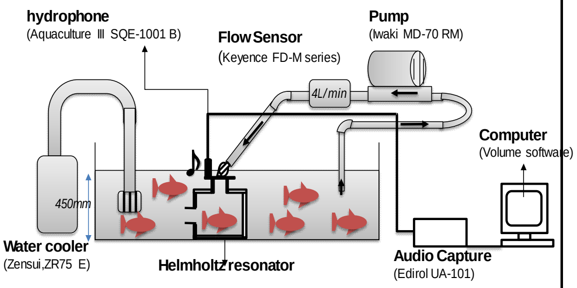

図３　体積計測用実験装置

４．研究成果

(1)　誘導実験

①　浮上条件付け

図４に浮上個体数割合を示す．浮上個体数割合が 100%になるまでのセット数は 5 回の平均で 10.4 セットであった．セット数が増加するにつれて，浮上個体数割合も増加する傾向が見られ，それぞれセット 9，セット 10，セット 8，セット 13，セット 12 で浮上個体数割合は 100%となった。この結果はウグイが音と給餌の関係性を学習したことを示している。同様の学習実験は他の魚種でも行われており，ニジマス，タイセイヨウサケを用いたリングにより給餌場所を固定した実験では，音刺激により給餌リングの近くに集まった。この実験から，魚は給餌場に誘導されることが示唆されたが，これはサイントラッキングであり、本実験の結果と同様であると考えられた。また実験Ⅳでは，セット 1 からセット 5 まで，給餌してからウグイが摂餌するまで時間がかかった。馴致期間では摂餌していたので，実験開始後，環境音や給餌の際に暗幕に触れてしまうなどの外部刺激によりウグイに影響を与えた可能性があるとかんがえられた。

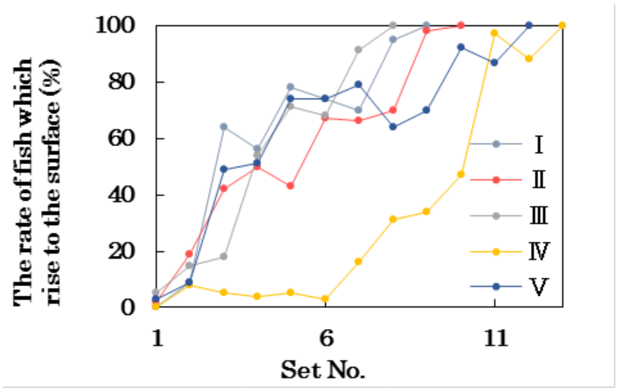

図４　浮上個体数割合

②学習個体・未学習個体のパイプ通過条件付け

図５に学習個体と未学習個体のパイプ通過個体数割合を示す。学習個体を用いた場合では，実験Ⅰではセット 6，実験Ⅱではセット 4 で 100%，また非給餌区画に全個体が戻らず，実験を中止した実験Ⅲでは，10 回のセット中，8 回のセットでパイプ通過個体数割合が 75%以上となった。学習個体，未学習個体でパイプ通過個体数割合が 100%になるまでのセット数は 2 回の平均でそれぞれ 5 セット，10 セットかかったことより，パイプ通過条件付けにおける事前の条件付けの有用性が示唆される。

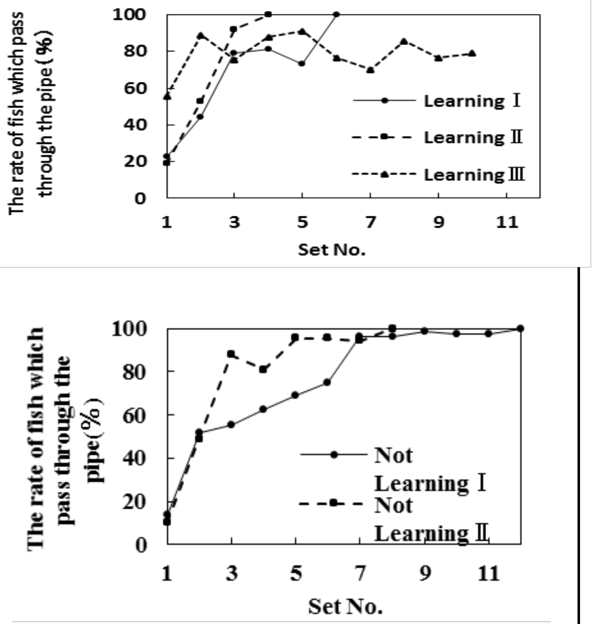

図５　学習個体と未学習個体のパイプ通過個体数割合

学習個体のパイプ通過条件付け学習は，完了した２回の実験の平均では５セット，未学習個体のパイプ通過条件付け学習は，完了した２回の実験の平均では 10 セット行った。しかし 95%以上となったセットを見ると，学習個体の実験では５セット，未学習個体の実験では６セットとなる。本研究では，魚の死亡や実験中止などにより十分なサンプル数がないため統計処理は行ってないが，得られた結果は事前学習によりパイプ通過条件付けの完了が早まることを示唆するものであった。音刺激に対する反応は，学習個体では最初から遊泳速度の変化，浮上などが見られたが，未学習個体では見られなかった．実験初期の音刺激への反応性の違いからも事前学習が有用であることを示している。

本実験では水槽が狭く，仕切り，パイプの設置後も，パイプの先にある給餌場を認識することは比較的容易であったと考えられる。生簀などの広い飼育場の場合では，給餌場を認識することが難しくなり，条件付けが完了するまでに必要なセット数が増加する可能性があるがこの場合，遊泳行動が活発になる学習個体の方が通過しやすい可能性がある。

パイプを鉛直方向に設置することや，沈下性の餌を用いるなどして給餌場の位置を水面ではなく，水中にすることにより水平方向への遊泳の条件付けを行うことで，より容易にパイプを通過させることが可能になると考えられた。

(2)　体積計測実験

図６および図７にシングルネックおよびダブルネックで種々のウグイの体積計測を行った結果をそれぞれ示す。これらの結果より，周波数や音圧レベルに差が出るものの，いずれも計測可能であることがわかった。また，理論的な体積計測の式も式(1)および(2)のように求められた。

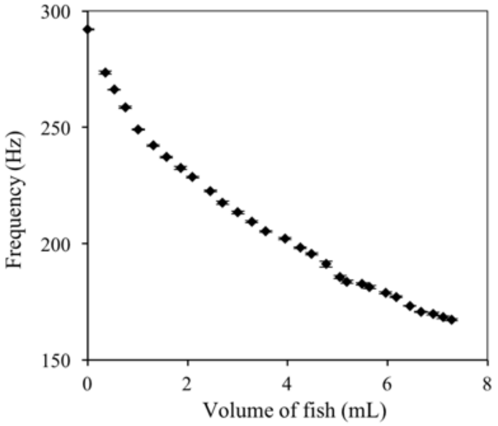

図６　単管式共鳴器の結果

$$V_o = \frac{K_o}{K_o - K_w}\left\{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2\right\}W \qquad (1)$$

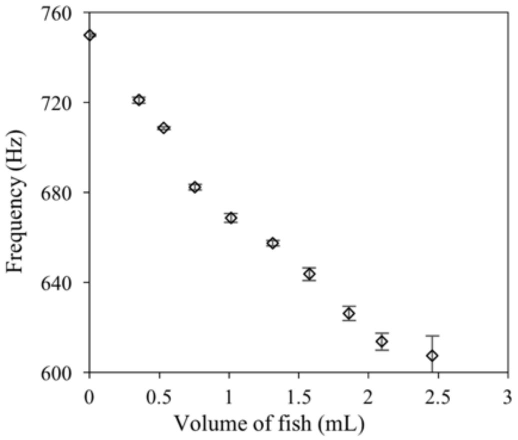

図７　ダブルネック共鳴器の結果

$$V_o = \frac{K_w K_o + E_R K_o W}{W(K_o - K_w)}\left\{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2\right\}W \qquad (12)$$

図８および図９には，ガラス玉と空気を対象にしたときのアクリル製共鳴器とステンレス製共鳴器との比較結果を示す。これらのことより，材質の違いにより，壁面が振動することもわかり，それらが誤差要因となることが知れた。今後は，誘導した魚を１尾ずつ計測する方法，集団で計測したものの数を類推方法，音圧レベルの増幅方法等が課題となった。

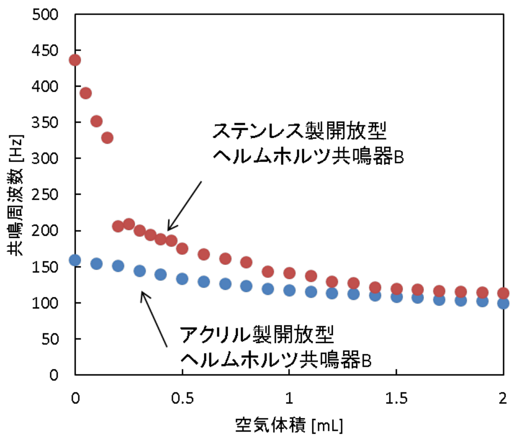

図８　ガラス玉を試料とした時の比較

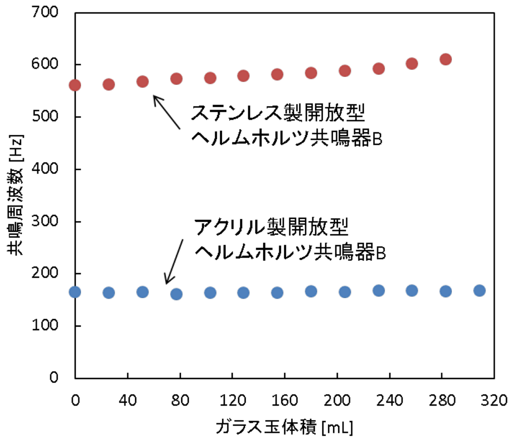

図９　空気を試料とした時の比較

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計　０件）
現在投稿中

〔学会発表〕（計４件）

1. Stephen Njane et al.,: "Underwater Fish Volume Estimation Using an Open Cavity Helmholtz Resonator", World Aquaculture 2017: Sustainable Aquaculture New Frontiers for Economic Growth Spotlight in Africa
2. Stephen Njane, Naoshi Kondo, Yuichi Ogawa, Tetsuhito Suzuki, Shusaku Nakajima: "Underwater Fish Volume Estimation Using an Open Helmholtz Resonator"農業食料工学会第 75 回年次大会 2016
3. 今井康貴，Stephen Njane,白瀧優莉，中島周作, 藤浦建史, 鈴木哲仁, 小川雄一，近藤　直："パイプの通過を目的とした条件付け学習によるウグイ (Tribolodon hakonensis)の誘導"農業食料工学会関西支部第 135 回例会，2016
4. Njane Stephen, Kondo Naoshi, Ogawa Yuichi, Imai Kouki, Suzuki Tetsuhito: "Underwater helmholtz resonance variation with temperature, salinity and flow speed"食料工学会関西支部第 134 回例会，2015

〔図書〕（計１件）

1. 近藤　直，小川雄一，鈴木哲仁，西津貴久，椎木友朗：生物センシング工学－光と音による生物計測－，近藤　直，小川雄一，鈴木哲仁編，コロナ社，東京（2016.9.）ISBN:987-4-339-06752-1：全193 頁

〔産業財産権〕

○出願状況（計２件）
名称：体積計測用ヘルムホルツ共鳴容器，体積計測装置及び体積計測方法
発明者：近藤　直，小川雄一，西津貴久
権利者：京都大学，岐阜大学
種類：
番号：特願２０１１－２８０９０６
出願年月日：2011 年 12 月 22 日
国内外の別：　国内

名称：体積計測用ヘルムホルツ共鳴容器，体積計測装置，及び体積計測方法
発明者：近藤　直，小川雄一，篠原　義昭，西津貴久
権利者：京都大学，岐阜大学
種類：PCT
番号：PCT/JP2012/083866
出願年月日：2012 年 12 月 21 日
国内外の別：国外

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究代表者
近藤　直（KONDO, Naoshi）
京都大学・農学研究科・教授
研究者番号：20183353

(2)研究分担者
西津貴久(NISHIZU Takahisa)
岐阜大学・応用生物科学部・教授
研究者番号：40228193

(3)連携研究者
(　　　)

研究者番号：

(4)研究協力者
(　　　)