

平成 28 年度
修士論文

動力学シミュレーションによる魚類眼球内部構造の理解

平成 29 年 3 月

三重大学 大学院生物資源学研究科 共生環境学専攻

環境情報システム工学講座

応用環境情報学研究室

加藤卓大

目次

第1章	緒言	1
第2章	魚類の視覚器.....	3
第1節	人と魚類の眼	3
第2節	水晶体筋の特徴.....	5
第3節	ブルーギルの生態と眼球構造.....	7
第3章	シミュレーションモデル.....	10
第1節	目的.....	10
第2節	CAE ソフトウェア	11
第3節	CAE による魚眼モデル（三角型水晶体筋）	11
第4章	硝子体と背面靭帯の影響.....	14
第1節	目的.....	14
第2節	モデル	15
硝子体.....	15	
背面靭帯	16	
第3節	結果と考察.....	17
硝子体.....	17	
背面靭帯	18	
第5章	ブルーギルの異なる形状の三角型水晶体筋によるレンズ挙動の比較	20
第1節	目的.....	20
第2節	モデルの詳細	22
第3節	結果考察.....	24
第6章	靭帯によるレンズ挙動の影響	26
第1節	目的.....	26
第3節	モデル詳細.....	27
第4節	結果と考察.....	27
第7章	結言	30
謝辞	31	
引用文献.....	32	
参考資料.....	34	
付録	35	
形状記憶合金を用いて水晶体筋アクチュエータの開発	36	
第1章	緒言	36
第2章	形状記憶合金.....	37
第1節	形状記憶合金	37
第3章	BMF, BMX の変位量実験.....	39

第1節	目的.....	39
第2節	実験器具.....	39
第3節	実験方法.....	41
第4節	結果と考察.....	43
第4章	BMX を用いてレンズ駆動モデルの作成と比較.....	45
第1節	目的.....	45
第2節	実験モデル.....	46
第3節	実験方法.....	47
第4節	結果と考察.....	48
第5章	結言.....	51
	引用文献.....	52

第1章 緒言

水中に生息する生物は、陸上で生活する生物に比べ、低光量、低酸素や高水圧などの複雑で多様な環境に適応して生活している。しかしその生態の多くは未だに解明されていない点も多く、その一つとして感覚器が挙げられる。特に魚類の視覚器は、生きていく上で必要な摂餌行動や外敵から身を守るために重要な器官であり、対象物への迅速な認知が必要とされ、生育環境への適応などを反映した進化を遂げており複雑な構造をしている。

魚の視覚器は片目での広い視野¹⁾、紫外線視細胞²⁾、素早く正確な焦点調節機能などの特徴を持つ。また網膜上には視細胞の高い部位を数か所持つことから多焦点であると考えられている³⁾。Gustafssonらは、魚類のレンズに光を当てて屈折率や反射率の違いから、うなぎなどの無顎類やさんご礁付近に見られるプランクトンを餌とする魚は多焦点レンズを有することを述べ、多くの魚は多焦点レンズを有していると考察している⁴⁾⁵⁾。ブリにおいては、網膜の視細胞密度から判断して、ある一方向の視力が特に高いという傾向は見られず、全ての方向に対してほぼ一定の視力を有する⁶⁾。上記のことからも同時に複数の物体に焦点を合わせている可能性が考えられる。このように魚の眼は多くの特徴を有している。

魚類の視覚器は人間などの動物と違い、レンズは球体であり上部から懸垂靭帯、下部から水晶体筋とで保持され、水晶体筋の収縮によりレンズを移動させることで焦点を調節する。懸垂靭帯以外にも、眼中には靭帯は多く存在し、レンズと複雑に絡み合っている。靭帯によってレンズは安定的かつ効率的に動作し、常に最適な位置にレンズを保持させ、レンズの不必要な動きを制限している⁷⁾。そして魚類の焦点調節において重要な役割を担うのは水晶体筋である。水晶体筋により視覚の遠近調節が行われ、摂餌行動や外敵から身を守る行動と関係していると言われる⁸⁾⁹⁾。水晶体筋とレンズの関係性については数多く研究されており、例えば宗宮らは39種類の硬骨魚と4種類の軟骨魚から摘出した魚眼に電気刺激を与えることにより、レンズの動きを確認した。レンズの動きが確認できた魚は水晶体筋が発達しており、レンズが全く動作しない魚は水晶体筋が棒状で細く、レンズの動きに全く関与せず機能していないと述べている。そして水晶体筋の面積が大きいほど、レンズの動作が大きくなり、その内レンズ径が大きいほどレンズ動作が大きくなり、よく発達した水晶体筋を持つ魚は視精度が高いことを明らかとした¹⁰⁾。

多くの特徴を持つ魚の視覚器であるが、解剖学的に明らかとなっているが、実際にどのように見えているのか、また各部位の構造的役割も解明されておらず確かではない。またレンズの挙動や水晶体筋の動きなどを力学的に解明した事例が無く、靭帯の配置や数などの内部構造は未解明である。過去の研究は眼球を摘出した状態や死んだ状態での研究が多く⁵⁾¹⁰⁾、生きた状態でのレンズ挙動解析は行われていない。そこで本研究目的は、魚の視覚器をモデル化しシミュレーションを用いて力学的に解析・理解し、魚類の生息環境への適応、生存している状態での内部構造の妥当性について考察することである。中でも魚特有の球体レンズの駆動する機構の特性を理解することで、魚の摂餌行動や外敵からの防御などについて新たな知見を提供できる。またそれらの特徴をカメラとして応用すれば、漁業や養殖といっ

た産業分野への貢献が期待できる。既に魚眼レンズの名で販売されるカメラレンズがあるが、これは画角 180° の半球立体角を有限な範囲の像面におさめるレンズであり¹¹⁾、魚眼の内部構造などを模倣したものでない。魚眼内部構造を再現することができカメラなどに応用できれば、魚の特徴を最大限に生かした、新しいカメラデバイスの開発が可能となると考える。

本研究では一般的な魚類の水晶体筋である三角型水晶体筋をもつブルーギル (*Lepomis macrochirus*) の水晶体筋を一例に眼球モデルを作成した。ブルーギルは発達した三角型水晶体筋を有し、他の魚と比較して視精度が高く、体長とほぼ同じくらい離れたところから、無限遠までの遠近調節が可能であるといわれている¹⁰⁾。レンズ駆動機構を CAE (Computer Aided Engineering) ソフトウェアを用いて、眼球モデルの作成および基本的なレンズ挙動を解析し、生理学的知見との一致について考察した。硝子体や背面靭帯の有無や水晶体筋形状によるレンズ挙動の変化、焦点調節機構を解析する。

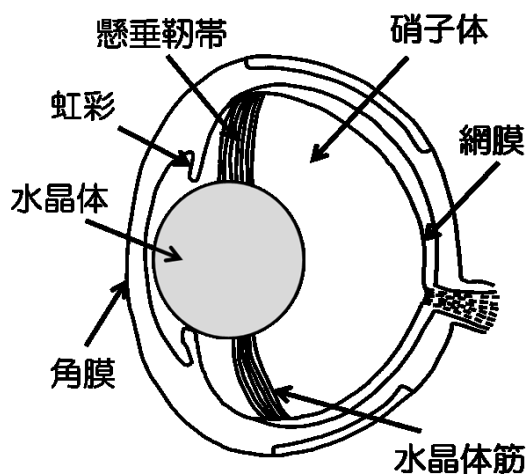


Fig. 1 魚の眼の構造

第2章 魚類の視覚器

第1節 人と魚類の眼

人間の眼の構造を Fig. 2 に示す。人間の遠近調節方法は、レンズの厚みを変化させることによって行われ、6つの筋肉を用いて眼球を動かすことで物体に注視している¹²⁾。レンズは一種の両凸レンズの形状をしている。レンズの屈折率は一様でなく、中心部が高く、周辺の皮質部が低い屈折率分散型レンズとなっている。光が入ると角膜で約60%屈折させ、水晶体で微調節を行う。角膜の絶対屈折率1.37¹³⁾であり、水の絶対屈折率1.33とほとんど等しいため、水中での角膜による屈折は期待できず、網膜上に結像することは不可能である (Fig. 3)。そのため、人間が水中でもの見る際は、水中眼鏡などをして空気の層を作らなければ、水中で物体を見ることができない。

魚類の眼は脳の突出物として発生し、感覚器官の中では複雑である。鼻から側頭骨の方向に扁平であって、付属物である6本の動眼筋とともに眼窩の中に収まっている。角膜は一般的に無色透明であるが、スズキ類、ベラ科の種類では黄色または緑色の角膜を持つものがある。トビウオでは角膜の下側1/3の表面が扁平になって角錐状を呈し、空中に出た時に下方の視覚が歪められないという。硬骨魚の水晶体は球形で硬く、非膠原性蛋白からできている。約半球が虹彩の面から突出しているので、単眼視野が非常に広い。レンズと虹彩の間に aphakic という間隔がある。特に、鼻側で少し広がっており、前方の視野を広げている。レンズは懸垂靭帯で吊り下げられている。レンズに対する懸垂靭帯、水晶体筋の付着箇所が魚種により異なり視軸の方向と関係している。魚種ごとに視軸をよく調べてみると、間代などの底棲魚では前下方、スズキのような中層性の魚は前方、餌を下からアタックするマグロ類のような魚はほぼ前方である。視軸の方向も見ると網膜部位は視細胞の密度が高くなっていて、細かいものを見る為に都合がよくなっている。網膜は眼球の底にあり、神経と感覚細胞に富む特殊な感覚上皮で、脳に発生学的な原基をもっている。情報伝達に関わる神経節細胞の網膜全体における密度分布を解析することで、視軸や視力を推定することができる。一般に、魚類の視軸方向は最も視精度の高い方向であり、水晶体中心と網膜の視細胞最高密度部位を結んだ直線状に存在するといわれる。Fig. 4 にキュウセン (*Halichoeres poecilopterus*) の網膜図を示す。視細胞の密度の高い箇所が2箇所確認されており、それぞれ方向へ焦点調節を行っていると考えられている。キュウセンは摂餌のときなどには後上部の視細胞を使い、砂中に体を埋めて片面だけ顔を出している時には、底部の視細胞を使って単眼視することから、キュウセンは他の魚と異なり部位による分化が進んでいる。網膜の厚さは魚種により、また同一魚種でも固体の大きさや網膜の部位によって異なり、およそ200~500 μ m である¹⁴⁾¹⁵⁾。

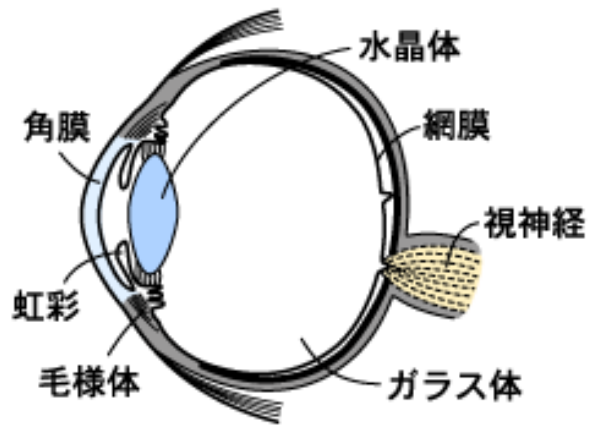


Fig. 2 人間の眼の構造

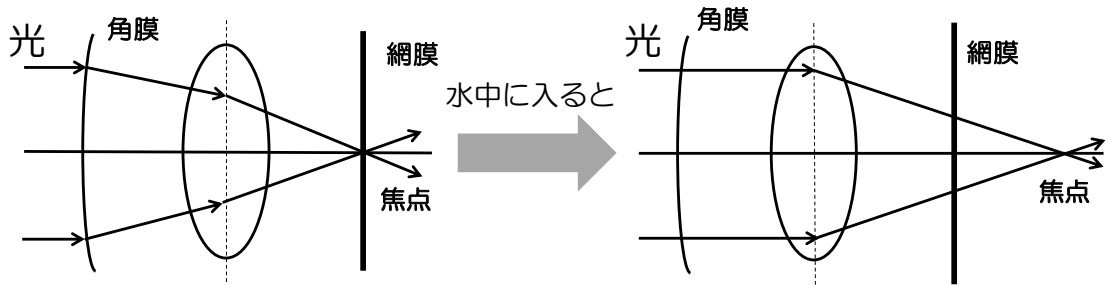


Fig. 3 水中での人間の焦点調節

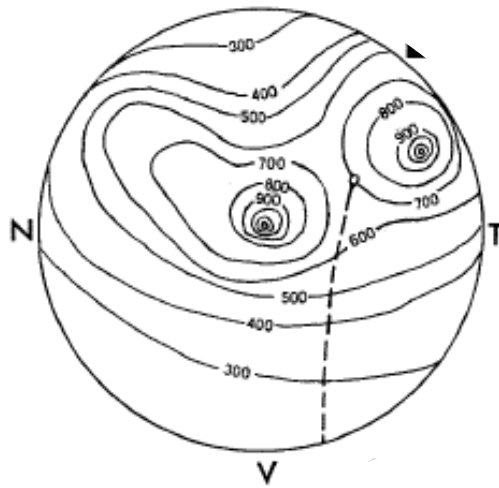


Fig. 4 キュウセンの網膜図³⁾

第2節 水晶体筋の特徴

魚の眼は、陸上生活に適応した人間の眼には見えない物を見ることができる素晴らしい機能をもっている。広い視野、網膜の特性から紫外線を見ることができ、人が感じない偏光の振動面の変化を魚は知覚できる¹⁵⁾。魚類の視覚器の場合、人間と異なり、レンズを動かすことによって焦点調節を行っている。一般的にレンズの上部から懸垂靭帯によってレンズが吊り下げられ、下部に接続している水晶体筋の収縮により、レンズを移動し、光を網膜上に結像することで物体に焦点を合わせている (Fig. 5)。通常状態では魚の眼は近視であり、遠い物体を見るときに水晶体筋を収縮させる事によって適応している。水晶体筋は収縮のみで引張は行われぬ。Fig. 6 に田村らによって調査された魚種による様々な水晶体筋の形状を示す。主に4つに分けられ、レンズの変位が大きいもの、少し動くもの、わずかに動くもの、全く動かないものに分類された。AとBは発達した水晶体筋を持ち、レンズの変位は大きい。C,Dのように水晶体筋が小さいものは、レンズの変位は小さく、レンズの移動に全く影響していないといえる。水晶体筋が大きいほどレンズの移動が大きくなり、またレンズの半径が大きいほどレンズの移動も大きくなる。よく発達した水晶体筋を持つ魚は遠近調整能力が高いとみなされ、中でも三角型の水晶体筋を持つ魚は能力が高い¹⁶⁾。例えば、ブラックバス (*Micropterus salmoides*)、ブルーギル (*Lepomis macrochirus*)、アユ (*Plecoglossus altivelis*) 等は三角形状の水晶体筋を持つ¹⁰⁾。シイラの場合は特徴的な三角型水晶体筋で主水晶体筋と副水晶体筋の2種類を持ち、遠近調節能力が高い。通常の水晶体筋はレンズを前後方向に移動する役割を持つが、シイラの場合は、主水晶体筋は通常の三角型であったが、副水晶体筋は混棒状であることで、主水晶体筋が収縮した際に、副水晶体筋は主水晶体筋を強く虹彩に固定するベルトまたはイカリの役割をはたす¹⁷⁾。上記のように魚種によって異なる特性を持ち生活環境や摂餌行動によって異なる¹⁸⁾。

またイカ・タコの眼の構造は魚の眼とはかなり異なり、他の動物では2種類ある視細胞が感桿という細胞の一種だけになっている。網膜細胞の種類構成は単純であるが、コウイカの網膜の感桿の分布は非常に特殊で体軸方向に帯状に密な部分を形成している。この網膜構造は餌動物の鉛直方向の動きより水平方向の動きを正確に捉えるために有利となっている。網膜赤道における感桿の密度とレンズの焦点距離から求められる視力は0.89で、魚類に比べると遥かに高い¹⁵⁾。

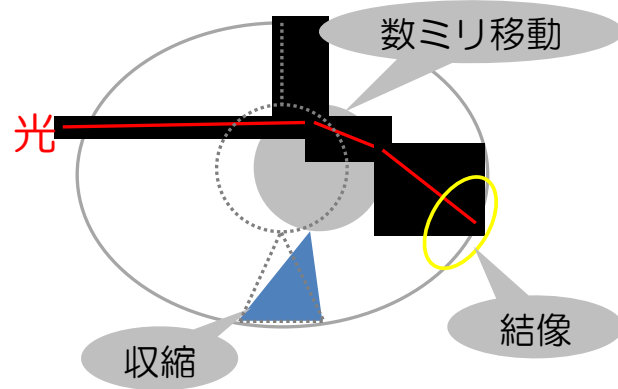


Fig. 5 魚類の遠近調節

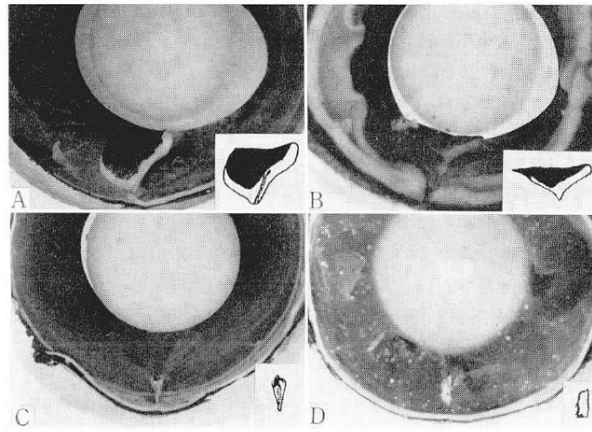


Fig. 6 水晶体筋の形状¹⁰⁾

第3節 ブルーギルの生態と眼球構造

ブルーギル (*Lepomis macrochirus*) (Fig. 7) は、スズキ目、サンフィッシュ科に属する北アメリカ原産の淡水魚である。全長 25 cm で生後約 1 年目までの幼魚では体系がやや細く、体側には 7~10 本の暗色横帯がある。成長するにつれ体高が高くなり体色は濃灰褐色から暗褐色に黒ずむ。湖沼やため池、堀、公園の池などに生息し、湖では主に沿岸帯の水生植物帯に、河川では主に流れの穏やかな水草帯に生息する。現在では 47 都道府県全てに生息している。河川の護岸や人口漁礁にもよく集まり、小型魚は小さな隙間のある構造物を、大型魚は大きな隙間のある構造物を好む。雑食性であり、昆虫類、植物、魚類、貝類、動物プランクトンなどを餌とする¹⁹⁾。動物プランクトンを選択的に摂餌し、その様式はサイズ依存的である。したがって、ブルーギルは、動物プランクトンに対するサイズ依存的な摂餌様式を通して在来魚やその仔稚魚と餌をめぐる潜在的な競争関係である²⁰⁾。

ブルーギルの眼球構造は、他の魚種と似たように上から懸垂靱帯によってレンズが保持され、下からの水晶体筋によってレンズを動かしている。Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 にブルーギルの眼球と水晶体筋を示す。レンズはほぼ球体で水晶体筋の形は三角型水晶体筋であり、水晶体筋の収縮によってレンズを尾方へ動かし、網膜との距離を縮めることで遠近調節を行っている²¹⁾。

宗宮らによって硬骨魚類の眼球について研究され中に、3 個体のブルーギルが含まれていた。体長 15~16 cm, レンズ直径 4.8 mm, レンズの移動距離 0.55~0.75 mm である。宗宮らの研究対象の中でも、ブルーギルは他と比較して眼の適応能力は高く、体長とほぼ同じくらい離れたところから、無限遠までの遠近調節が可能であり、広い視野を持つ¹⁰⁾。

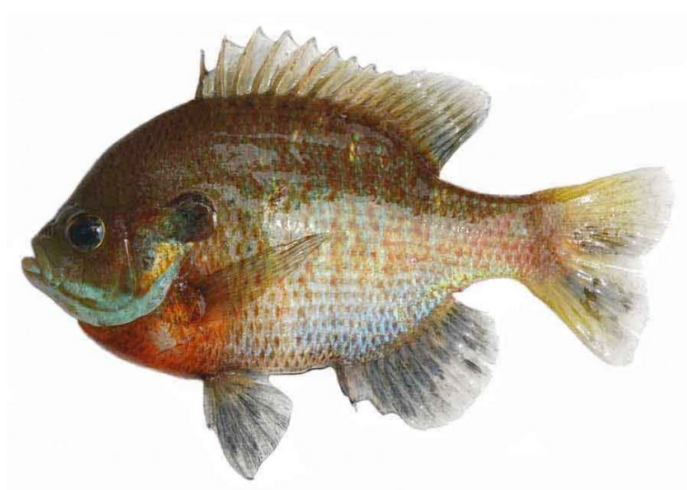


Fig. 7 ブルーギル²²⁾



Fig. 8 ブルーギル

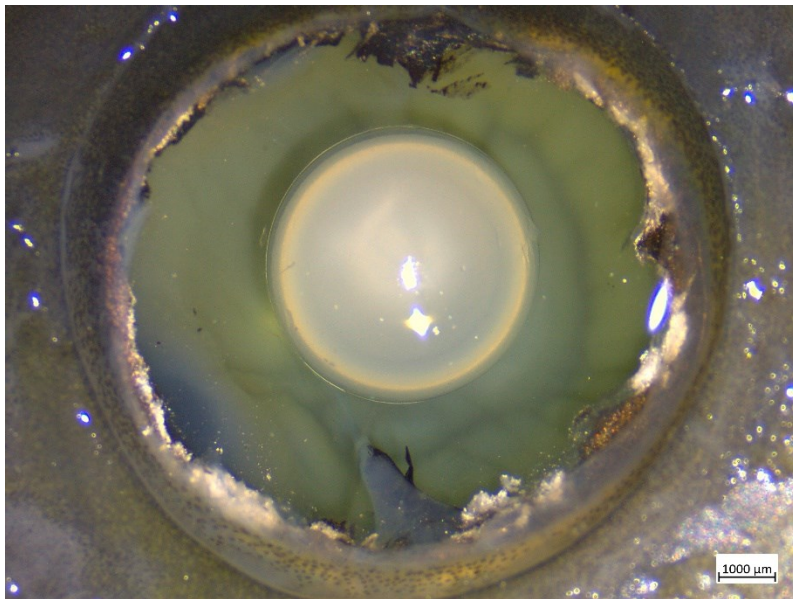


Fig. 9 ブルーギルの眼球

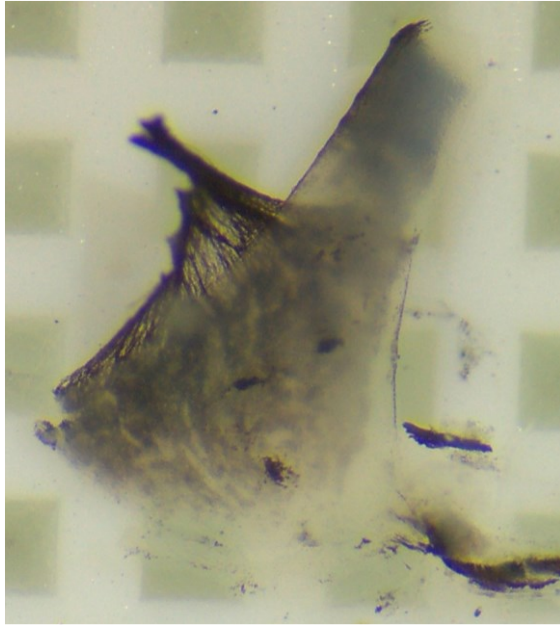


Fig. 10 ブルーギルの水晶体筋

第3章 シミュレーションモデル

第1節 目的

魚類の視覚器は第2章で述べたように多くの特徴を有する。それらの特徴を再現できれば、従来の進化学や生態学に新たな知見を与えることができ、研究が進めば今まで無いカメラデバイスの提供ができると考える。しかし解剖学的に視覚器のメカニズムは解明されているが、それぞれの部位が小さいが故に力学的には解明されていない点多々あり、各部位の構造的役割も明確でなく理論的な説明ができていない。そこでシミュレーションを行うことで、眼球内部構造の妥当性について検討することができる。また簡易的に表現することで、魚種や形状の違いなどを力学的数値計算で行うことができる。従前の研究として内田らによって、 Λ 型水晶体筋をもつマハゼの眼球や三角型水晶体筋によるレンズ駆動機構を簡易な運動解析モデル (Fig. 11, Fig. 12) を作成し、動的シミュレーションを行った。水晶体筋形状の違いによってレンズ挙動に差が生まれることが解明され、眼球内の靭帯の分布については理解されていないことが多いが、シミュレーションによって位置予測ができる可能性があることがわかった。また生物学的知見で推測されていた水晶体の体軸に平行な動きを工学的に表現できた。そこで本論文では、内部構造を理解する為に、シミュレーションモデルを作成し、水晶体筋の形状や靭帯配置などの検討を行う。

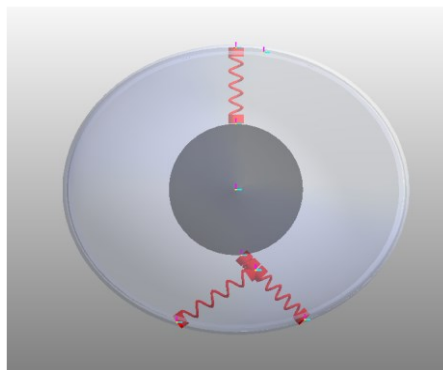


Fig. 11 λ 型水晶体筋モデル

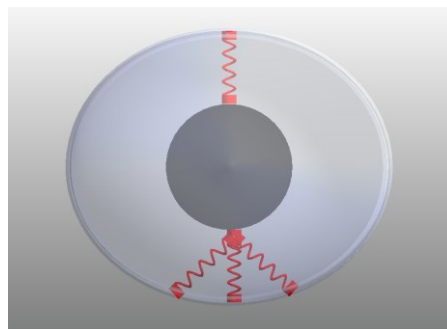


Fig. 12 三角型水晶体筋モデル (内田)

第2節 CAE ソフトウェア

本研究ではシミュレーション解析を行う際に CAE(Computer Aided Engineering)ソフトウェアを用いる。CAE とはコンピュータを活用して試作段階で運動性能や耐久性能を評価することが可能となるシステムやそれを行うツールの事を示す。機械工学，建築工学などに活用され設計・製図作業の省力化，効率化，経済化を図る術である。CAE ソフトウェアはファンクション・ベイ株式会社の機構解析ソフトウェア RecurDyn(V8R1 x64)を用いる。RecurDyn では，運動学解析，静的解析，動力学解析を行うことが可能である。作成された物体はマルチボディダイナミクス（多剛体動力学）理論における相対基準枠によって座標を決定し，再帰的定式化によって運動方程式がコンピュータ内で立式される。運動方程式は数値計算によって解かれ，積分手法には Implicit G-Alpha 法，Track G-Alpha 法，DASSL 法が用いられる。数値計算においてもコンピュータ内で自動的に行われる。RecurDyn では運動方程式の定式化や数値積分のプログラムを構築する必要がないため作業効率が高い CAE ソフトウェアである²³⁾²⁴⁾。

第3節 CAE による魚眼モデル（三角型水晶体筋）

Fig. 13 に RecurDyn によって作成した魚眼の三角型水晶体筋のモデルを示す。このモデルは先行研究である内田によって作成された三角型水晶体筋モデルを模倣して作成した。レンズは球体で作成し，筋肉，靭帯は粘弾性ジョイントで表現した。粘弾性ジョイントは Fig. 14 の構成で用いる。ソフトウェア内では Fig. 14 の構成は Fig. 15 の形で表現される。粘弾性ジョイントでは，式（1）を用いる。

$$F = -k(x - l)^a - cv^b \quad (1)$$

k :ばね定数 [N/mm]， c :減衰係数 [N s/mm]， x :バネの長さ [mm]， v :伸収縮速度 [mm/s]， l :バネの自由長 [mm]， a :剛性指数， b :減衰指数

粘弾性パラメータは，実際の魚類の報告がないため，身体組織物性値データベース（理化学研究所）²⁵⁾より人間の筋肉，靭帯のヤング率を用いた。得られたヤング率と実際の水晶体筋，懸垂靭帯の寸法から算出したばね定数を用いた（式（2））。

$$Y = \frac{k}{A} \cdot l$$
$$k = \frac{Y}{l} \cdot A \quad (2)$$

Y :ヤング率 [MPa]， k :ばね定数 [N/mm]， A :断面積 [mm²]， l :変形前長さ [mm]

ここで，水晶体筋，懸垂靭帯の弾性項を求めるために用いた数値表を Table 1 に示す。減衰係数は式（2）で得られたばね定数の 100 分の 1 の値を用いた。分岐方向に沿って，それぞれの水晶体筋に収縮力を与えたときのレンズ挙動について解析した。

Table 1

	水晶体筋	懸垂靱帯	単位
用いたヤング率	鎖乳突筋	靱帯	
ヤング率	1.11×10^{-1}	1.38×10^2	MPa
断面積	6.61×10^{-2}	3.14×10^{-2}	mm ²
変形前の長さ	1.10	3.00×10^{-5}	mm

人間の焦点調節であるレンズのピントを合わせるために起こる時間遅れが 0.24 秒であることから²⁶⁾、本モデルにおいても開始後 0.24 秒にかけて滑らかな収縮力を与えた。

Fig. 13 に示したモデルのレンズ寸法、粘弾性パラメータを Table2 に示す。三角型水晶体筋を表現する為に 4 本の粘弾性ジョイントを使用し、分岐点に水晶体筋結合に影響を与えない質量の無視できるボディを作成した。懸垂靱帯はレンズの上部に鉛直に設置し、懸垂靱帯、水晶体筋はレンズの中心を通る平面状に作成した。収縮力は、結合部分より腹側の吻側、腹側、尾側の三つに分けて二点間フォースとして与えた。粘弾性ジョイントは全て自然長としている。初期状態は、作成したモデルの水晶体筋に収縮力を与えず解析し、安定した位置を初期状態（安静状態）とした。水晶体筋は引張せず圧縮のみであるため、粘弾性ジョイントは圧縮のみ収縮力がかかる。

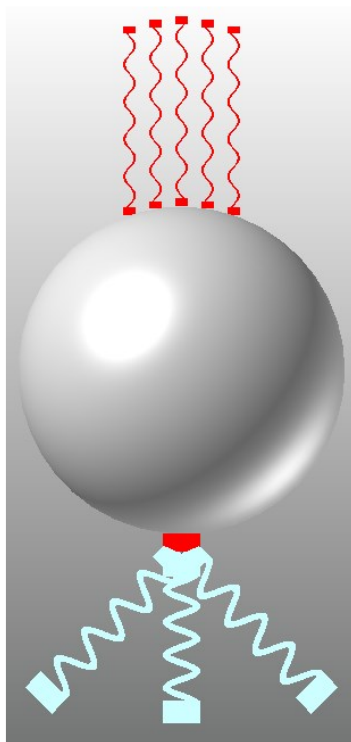


Fig. 13 シミュレーションモデル

Table 2 モデル諸言

部位	項目	数値	単位
懸垂靱帯	バネ定数	14.5	N/mm
	粘性係数	0.145	N · s/mm
水晶体筋	バネ定数	6.67×10^{-3}	N/mm
	粘性係数	6.67×10^{-5}	N · s/mm
レンズ	半径	1.26	mm

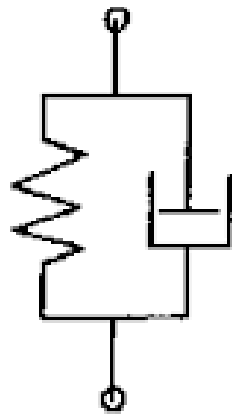


Fig. 14 粘弾性ジョイント構成



Fig. 15 モデル内粘弾性ジョイント

第4章 硝子体と背面靭帯の影響

第1節 目的

魚類の内部構造を Fig. 16 に示す。眼球内はレンズと網膜の間を硝子体と呼ばれるゲル状の透明組織が満たしている。成人硝子体の容積は約 4 ml で、眼球組織の約 4/5 を占めている²⁷⁾。その 99 % が水分で、約 1 % が固形成分である。その 1 % のうち、9 割が低分子成分で残りの 1 割が高分子成分コラーゲン、ヒアルロナン、わずかな可溶性タンパクである。硝子体は光学的に透明性を維持しており、可視光線の 90 % 以上が透過している。屈折率も水に近く、網膜に明瞭な外界の像を結ぶ目的に適している。硝子体の役割として、眼球の形態保持、眼球組織のための衝撃防止、眼圧の維持というような働きを持つ^{28),29)}。硝子体の粘性による眼球内におけるレンズの位置固定およびレンズ挙動への影響が考えられる。第3章で作成した水晶体筋モデルにおいて、レンズに硝子体の粘性を抗力として与えるモデルを作成し、粘性の有無によるレンズ挙動の比較を行った。硝子体の粘性による水晶体挙動への影響を考察することを目的とした。レンズの水平方向の変位とレンズの水平方向の移動速度を解析した。

主に靭帯はレンズを効果的に動かすためや不必要な動きを抑制し、最適な位置にレンズを保持する為に存在している。背面靭帯についてはカワスズメ (*Aequidens pulcher* and *Astatotilapia burtoni*) 科の解剖で発見された。背面靭帯を Fig. 16 に示す。背面靭帯は糸状で網膜からレンズの後方に向かって伸びている。背面靭帯によってレンズの前方への動きを防いでいる³⁰⁾といわれているが、背面靭帯についての資料は少なく、明確な役割や構造は明らかとなっていない。そこで懸垂靭帯の次に背面靭帯がレンズ挙動に影響を及ぼしていると考え、作成した水晶体筋モデルに背面靭帯を模倣して、レンズの後方から粘弾性ジョイントを配置し、背面靭帯の有無によるレンズ挙動の比較を行った。

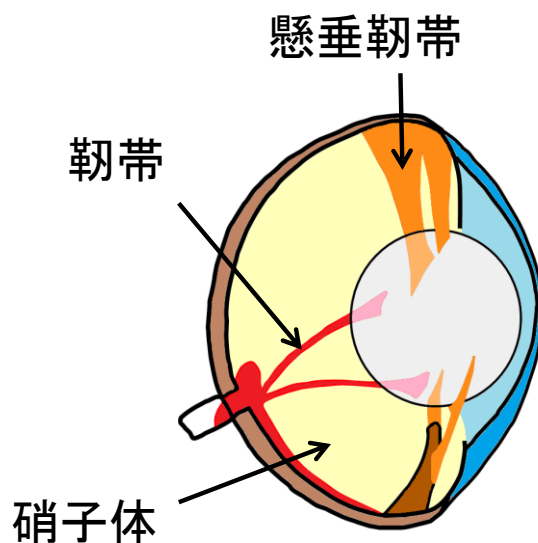


Fig. 16 魚の眼の構造

第2節 モデル

硝子体

作成した眼球モデルに硝子体の粘性抗力として式(3)と式 (4) を用いて与えた.

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot Cd \cdot A \cdot \rho \cdot v_x^2 \cdot \frac{v_x}{|v_x|} \quad (3)$$

$$F_y = \frac{1}{2} \cdot Cd \cdot A \cdot \rho \cdot v_y^2 \cdot \frac{v_y}{|v_y|} \quad (4)$$

F_x : 水平方向の硝子体抗力 [N], F_y 鉛直方向の硝子体粘性抗力 [N], Cd : レンズの抗力係数, A : レンズの断面積 [mm^2], v_x レンズの硝子体の流れに対する水平方向の相対速度 [mm/s], v_y : レンズの硝子体の流れに対する鉛直方向の相対速度 [mm/s].

硝子体成分において, 99%が水分であり, ブルーギルの生息域が 20°C から 30°C であることから, 23°C における水の密度 $9.98 \times 10^2 \text{kg/m}^3$ を用いた. またレンズを球体と仮定し, 球体の抗力係数 0.47 を用いた. 抗力は, レンズの中心に鉛直方向, 水平方向の 2 方向に分けて与えた (Fig. 17) レンズの変位量は, 尾側への移動を正, 吻側への移動を負とする. 尾側の水晶体筋に $7.0 \times 10^{-4} \text{N}$ を与えている.

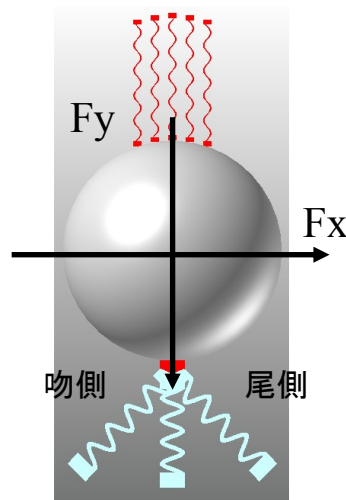


Fig. 17 粘性抗力

背面靱帯

Fig. 18 に背面靱帯モデルを正面より少し角度を変えた視線で示している。背面靱帯は粘弾性ジョイントを用いて行い、パラメーターは懸垂靱帯と同じ値を用いている。背面靱帯はモデルの奥側からレンズに向けて接続している。背面靱帯についての詳しい資料がなく、本数、機能や役割については明確に提言されていないため、シミュレーションでは背面靱帯が複数の場合と単数の場合でのレンズ挙動について検証した。このシミュレーション解析ではレンズの変位を検証するために、尾側だけに収縮力を与えた。レンズの変位量は、尾側への移動を正、吻側への移動を負とする。尾側の水晶体筋に $7.0 \times 10^{-4} \text{N}$ を与えている。

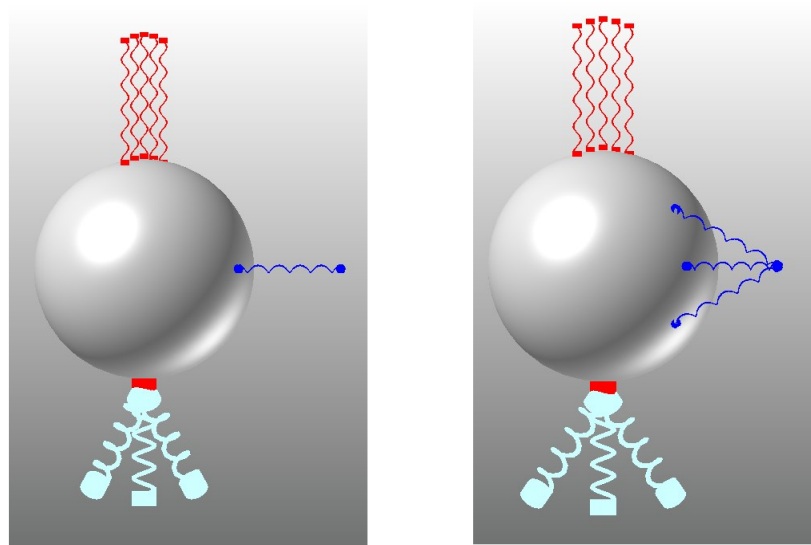


Fig. 18 背面靱帯モデル

第3節 結果と考察

硝子体

三角型水晶体筋による硝子体の粘性の有無によるシミュレーション結果を Fig. 19 と Fig. 20 に示す。粘性の有無によるレンズの水平方向の変位量の差は見られなかった。レンズの変位が落ち着くまでの時間が、硝子体有は 0.466 秒、硝子体無は 0.491 秒であり、わずかであるが硝子体がある方がレンズの変位が落ち着く時間は小さい。グラフからレンズの速度変位を比較すると、硝子体がある方が速度の振動が抑えられていることが読み取れる。これらのことから、硝子体の粘性があることによって、直接的にレンズの変位量に影響を与えることはないが、レンズ速度の振動が減少になっていることから、レンズに滑らかな移動を可能にし、レンズの振動による対象物へのブレ等を防ぐ役割があると考えられる。以上のことから魚類の焦点調節機構において硝子体の粘性は重要な役割があると考えられる。

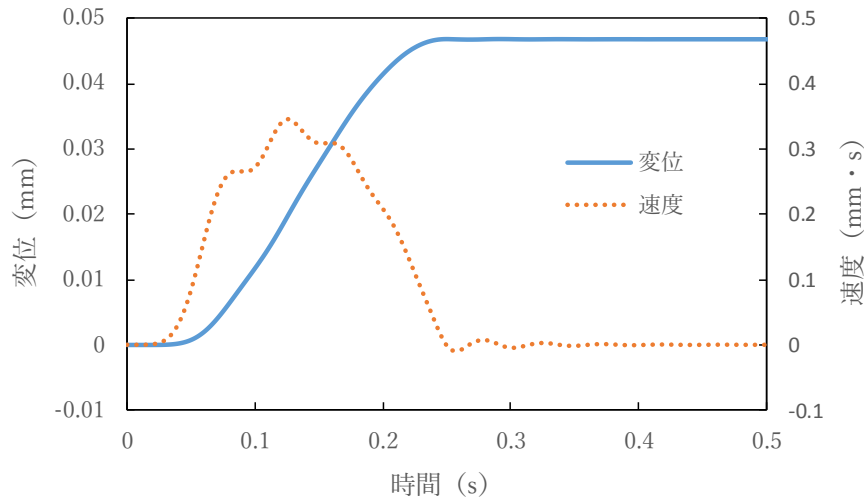


Fig. 19 硝子体有

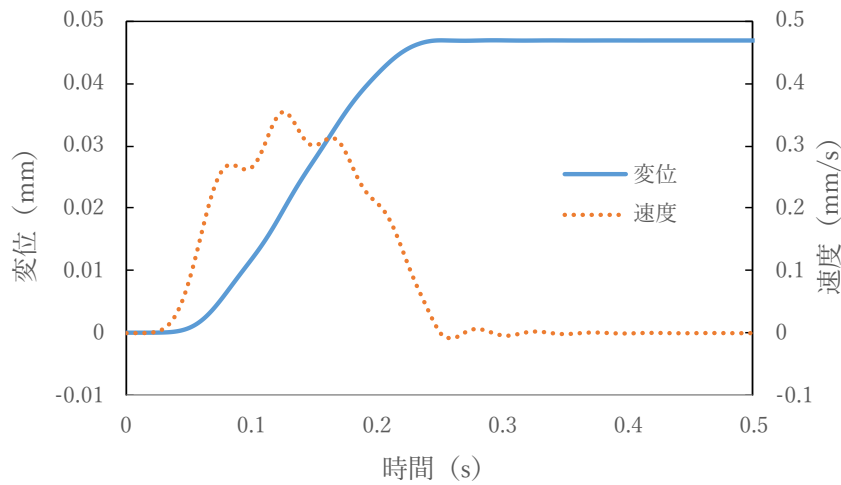


Fig. 20 硝子体無

背面靱帯

背面靱帯によるレンズの水平方向の変位と水平移動速度、力を加えたときのレンズの回転を Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23 に示す. 単数と複数ではレンズの変位量に差は見られなかった. 複数のほうが若干ではあるが、レンズの速度に振動が軽減されている. レンズが静止するまでに経過した時間が単数 0.907 秒に対して、複数では 0.466 秒で約半分近く減少した. レンズの回転のグラフをみると、複数背面靱帯は単数と比べ、回転の振動が抑えられた. 以上の結果から、懸垂靱帯が単数と複数とで比較すると、複数あることでレンズの動きが制御され、レンズ移動が滑らかとなり、焦点を合わせる物体へのブレを軽減していると考えられる. また、複数の方が、レンズが静止するまでの時間が短いことから、懸垂靱帯が複数あることで素早い焦点調節を可能にしていると考えられる. Omid Khorramshahi らは、懸垂靱帯はレンズに不必要な回転の動きと前方の動きを無くす為に存在している³⁰⁾と述べている. 本シミュレーションの結果、回転を無くすことができなかつたが複数あることでレンズの回転のブレを無くすことができた. レンズの前方の動きは無かつたが、レンズが背面靱帯の方つまり後方へ引つ張られる現象が起きた. これはモデルの作成上、ジョイントを後方に固定しているために起きたと考えられる. これらの結果から、背面靱帯は複数あることで、レンズ移動の振動や回転の振動を抑えることができ、対象物に対してブレなく焦点を合わせることができる. 背面靱帯は魚類の視覚器において、焦点調節のために重要な靱帯であると考えられる.

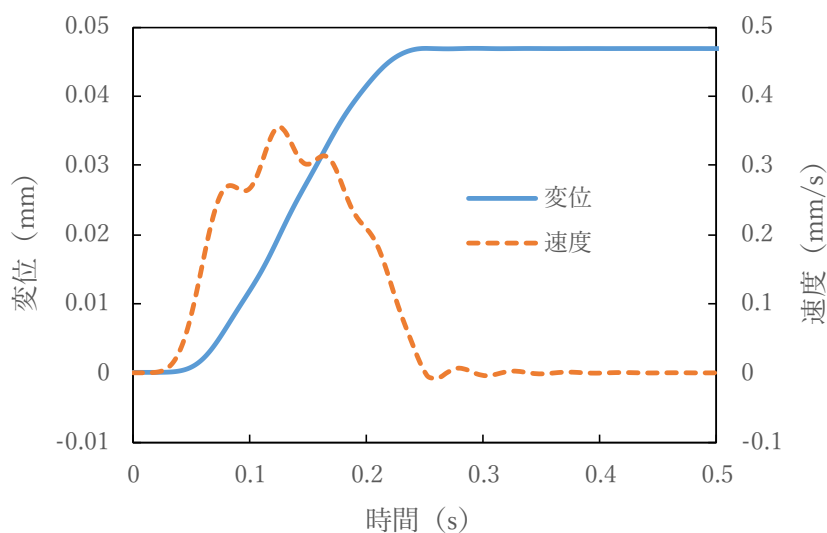


Fig. 21 単数背面靱帯

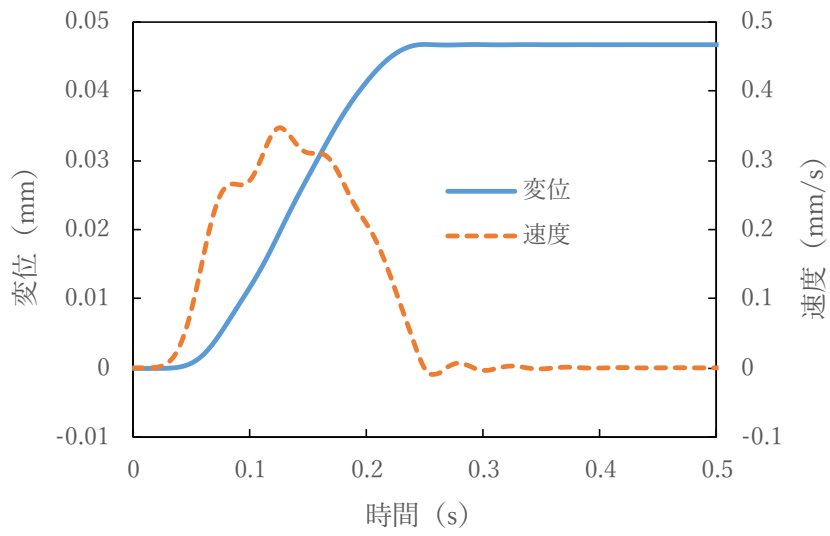


Fig. 22 複数背面靱帯

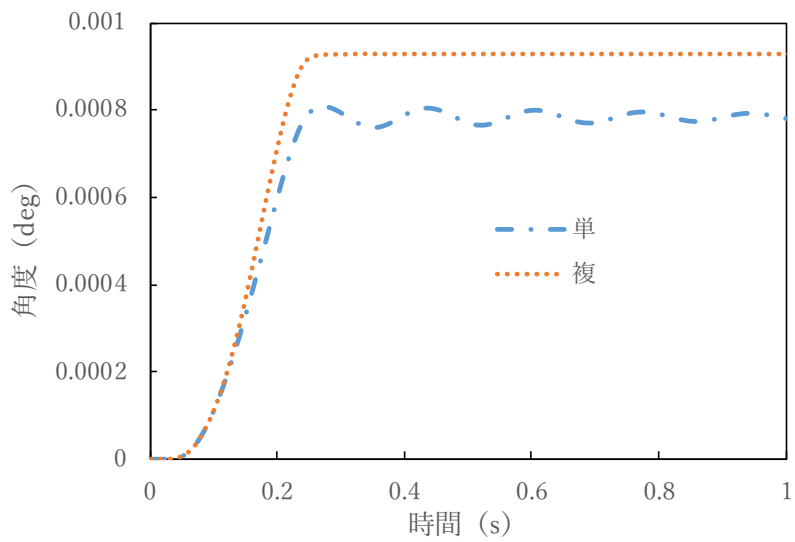


Fig. 23 レンズ回転

第5章 ブルーギルの異なる形状の三角型水晶体筋によるレンズ挙動の比較

第1節 目的

魚種によって水晶体筋の形状は様々であり、それぞれの生活環境によって異なる。焦点調節時で、レンズ変位が大きい魚は、大きい水晶体筋を有する。魚の焦点調節において、水晶体筋の大きさや形状は重要な要素であり、水晶体筋の形状が糸状の種類もあれば、三角型やマハゼが待つ入型の形状をもつ魚もいる。ブルーギルは三角型水晶体筋を持ち、視精度は優れていると言われている¹⁰⁾。しかし同じ魚種で水晶体筋の形状が同じでも、レンズと水晶体筋の接続箇所や水晶体筋の面積は異なる。宗宮らによって3固体のブルーギルのレンズの移動距離が測定され、レンズの水平方向への移動が0.55~0.75 mmであり、個体差が生じている¹⁰⁾。しかし、それぞれ3固体の水晶体筋の形状の比較や解剖図などは示されておらず、具体的な考察がなされていない。そこで同魚種において異なる固体での水晶体筋モデルを作成しシミュレーション解析を行い、各部位の役割や内部構造を明確にしたいと考える。

宮崎らによって解剖されたブルーギルの眼球と水晶体筋を Fig. 24 と Fig. 25 に示す。下部に三角型水晶体筋があり、上から懸垂靭帯によってレンズが吊り下げられている。双方を比較すると、レンズと水晶体筋の接続位置は異なり、若干ではあるが三角型水晶体筋の形状も異なる。2固体のブルーギルのレンズ、水晶体筋、懸垂靭帯を模倣し、モデルを作成し、レンズ、水晶体筋、懸垂靭帯の配置によるレンズの挙動について、比較検討を行った。

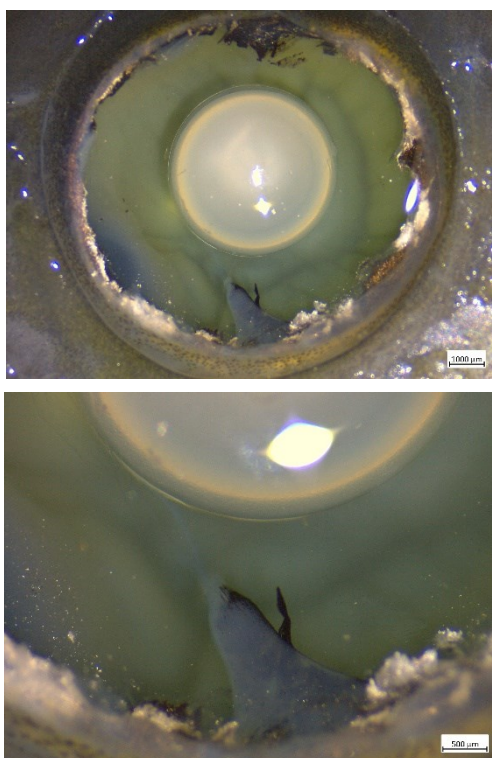


Fig. 24 ブルーギル_1の眼球と水晶体筋

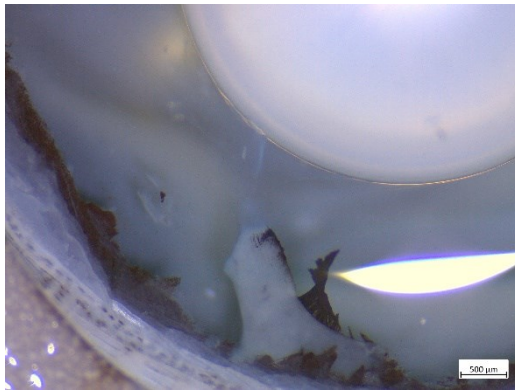
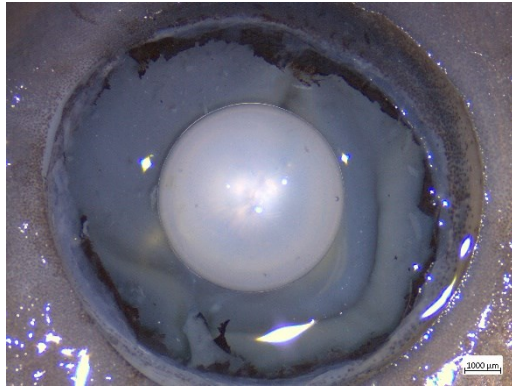


Fig. 25 ブルーギル_2 の眼球と水晶体筋

第2節 モデルの詳細

ブルーギル_1 とブルーギル_2 のシミュレーションモデルを Fig. 26 と Fig. 27 に示す。第3章で作成したものと同様に、水晶体筋とレンズをつなぐ靭帯の間にボディを設けている。水晶体筋は4本の粘弾性ジョイントを用いた。懸垂靭帯の長さ、レンズと水晶体筋の接続箇所、水晶体筋の面積は解剖写真のピクセル数から計算し、モデルを作成している。レンズと水晶体筋の接続位置や懸垂靭帯の位置によるレンズ挙動の差を比較するために、Fig. 28に懸垂靭帯、レンズの中心、水晶体筋が一直線となるモデル、ブルーギル_0 を作成した。靭帯と水晶体筋の粘性項とバネ定数のパラメータは第3章と同じ数値を用いる。それぞれの水晶体筋に0.7 Nの収縮力を与えた。硝子体の粘性抗力は加えており、背面靭帯は除いている。本実験ではレンズ、水晶体筋、懸垂靭帯の3つの接続位置によるレンズ挙動の検証を行うため、レンズ径とレンズ重量は2固体の平均を取り、レンズ径2.16 mm、レンズ重量0.072 gと統一した。発達した三角型水晶体筋をもつ魚のレンズは主に鼻側から側頭部への移動を確認しているため¹⁰⁾、収縮力を図右側（尾側）のみに収縮力を与えて水平方向の挙動を確認する。レンズの変位量は、尾側への移動を正、吻側への移動を負とする。

重力のパラメータは、レンズの重量から浮力を計算し、重力との差で腹側（図の下）の方向に 3.3939 m/s^2 を与えた。浮力の計算式は式(3)に示す。

$$F = \rho \cdot V \cdot g \quad (3)$$

F：浮力 [kg m/s^2]， ρ ：水の密度 [kg/m^3]，V：体積 [m^3]，g：重力加速度 [m/s^2]。

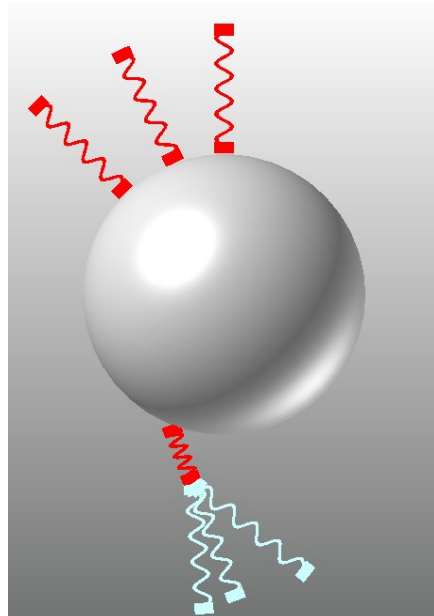


Fig. 26 ブルーギル_1 モデル

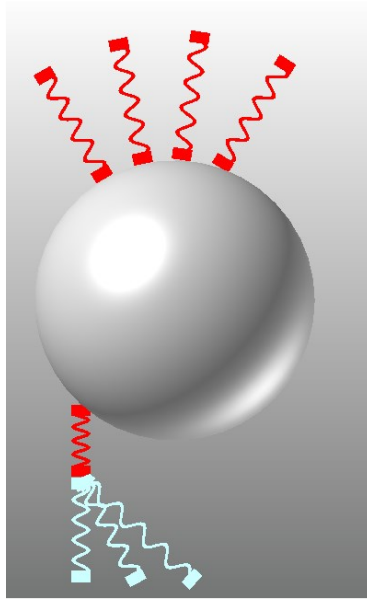


Fig. 27 ブルーギル_2 モデル

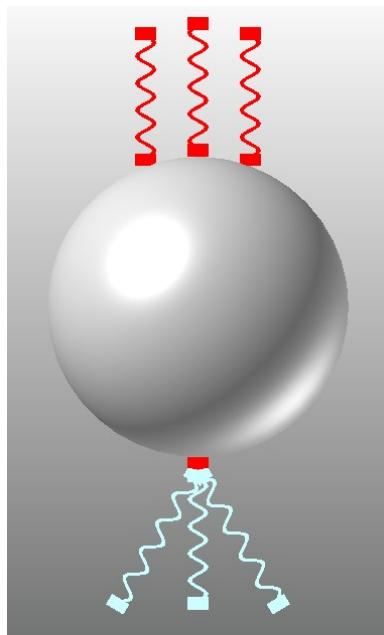


Fig. 28 ブルーギル_0 モデル

第3節 結果考察

レンズの水平方向の変位とレンズの回転のシミュレーション結果を Fig. 29 と Fig. 30 に示す。水平方向の変位は最大値でブルーギル_1 が 0.039 mm, ブルーギル_2 が 0.26 mm, ブルーギル_0 が 0.56 mm となった。レンズの回転では, 最大値ブルーギル_1 が 12.8deg, ブルーギル_2 が 15.1deg, ブルーギル_0 が 2.2deg となった。この結果から懸垂靭帯の位置や水晶体筋の位置関係がレンズの挙動に大きく影響することが明確となった。ブルーギル_0 のみレンズの変位が大きく, レンズの回転が小さくなった理由は懸垂靭帯の中心, レンズの中心, 水晶体筋の中心が一直線上に並んでいるからだと考える。他の二つは, 一直線上に並んでいないために, レンズの水平方向の変位が小さく, 回転が大きくなったと考える。Omid らはレンズの回転の動きは焦点調節において不必要な動きであり, 靭帯によってその動きが抑制されていると述べている³⁰⁾。しかしシミュレーションの結果ならびに解剖図から判断すると, 懸垂靭帯, レンズ, 水晶体筋それぞれの中心が一直線上に並んでいないことから, レンズの回転は起こりうると考える。もし魚の眼において回転が起こっていないとするならば, 今回のシミュレーションでは靭帯は懸垂靭帯のみのため, 懸垂靭帯以外の靭帯がレンズの回転に重要な影響を与えて回転を抑制し, 水晶体筋以外の力がレンズの水平方向の変位に影響を与えていると考える。もしくは, 本モデルのレンズは球体で行っているが, 実際の魚の中にはほぼ球体で楕円形のレンズを持つ魚がいる³¹⁾ことから, レンズを回転させることで焦点を調節し, レンズの回転が焦点調節に重要な役割があるのではないかと考える。

宗宮らによって調査されたブルーギルのレンズの変位は 0.55 mm から 0.75 mm と測定していることから¹⁰⁾, ブルーギル_0 のみ宗宮を支持する結果となり, ブルーギル_1 とブルーギル_2 は宗宮らの値より低い値となった。水晶体筋に与える収縮力を増減させて解析を行ったが, 宗宮の値に近づけることはできなかった。低い値になった理由として, 懸垂靭帯, レンズ, 水晶体筋の位置関係によって, レンズに回転が与えられたため変位量が低くなったと考える。このモデルは水晶体筋だけでレンズを動かしているため, 懸垂靭帯やレンズとの位置関係に依存してしまい, レンズの変位に限界がある。宗宮らは, レンズの回転や水晶体筋の形状については言及しておらず, 今回のモデルと眼球構造の比較は難しい。個体差は存在すると考えていたが, ブルーギル_1 とブルーギル_0 で約 15 倍近くと大きな差があった。魚の焦点調節では懸垂靭帯, レンズ, 水晶体筋が重要な要素であると考えていたが, シミュレーション結果から他にもレンズ移動に影響を与えている部位が存在し, 複雑に絡み合っただけで焦点調節を行っていると考え。今後は複雑な靭帯構造やレンズの裏側の構造を明確にしてモデル化する必要がある。そして実際の魚の眼には回転運動が起こっているのか明確にしたいと考える。

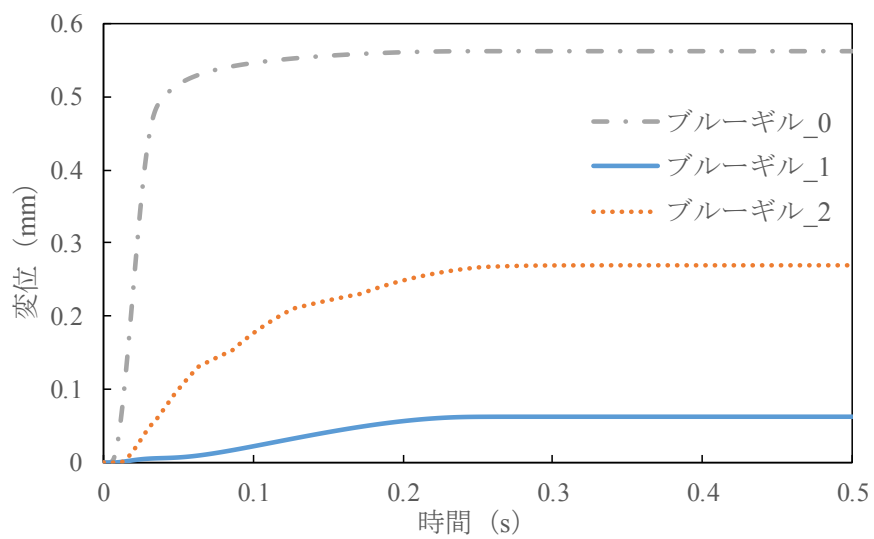


Fig. 29 レンズの水平方向の変位

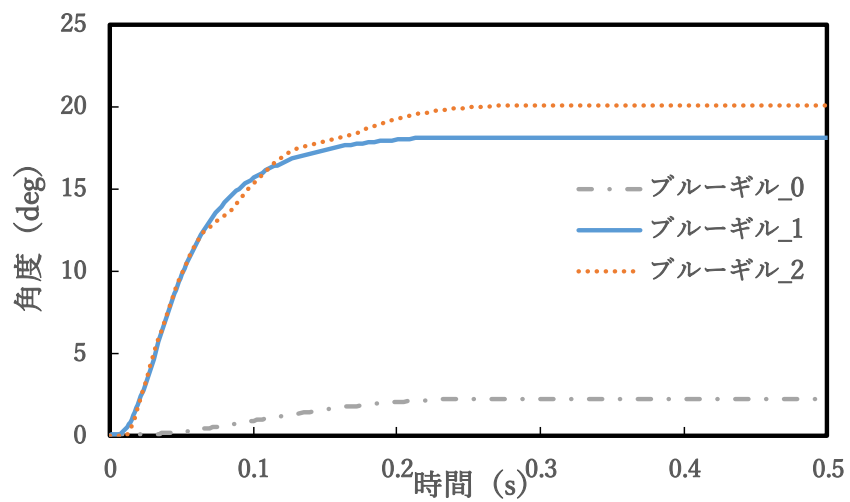


Fig. 30 レンズの回転

第6章 靭帯によるレンズ挙動の影響

第1節 目的

ブルーギルの解剖図を Fig. 31 に示す。Fig. 31 の解剖図を SEM によって撮影した図を Fig. 32 に示す。従来の顕微鏡の撮影よりも靭帯や水晶体筋をはっきりと撮影されており、靭帯の配置が明確になった。しかし靭帯が与えるレンズの挙動は理解されていない点が多く、機能や構造は明らかとなっていない。そこで Fig. 32 をモデル化し、第5章のモデルと比較して靭帯が与えるレンズ挙動の差異について解析した。解析結果から焦点調節のレンズ水平方向移動について考察した。

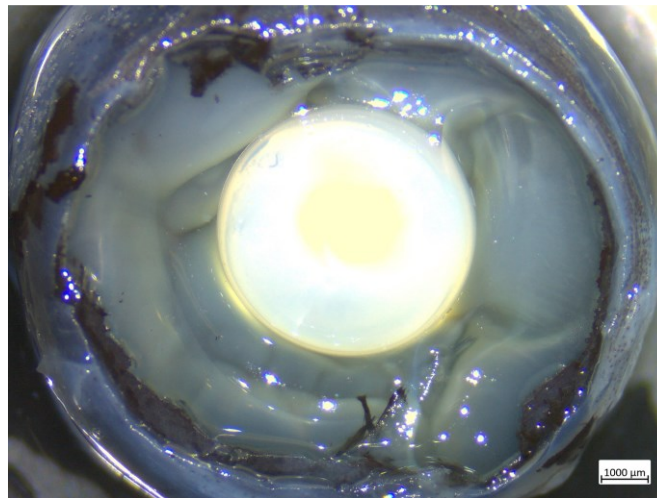


Fig. 31 ブルーギル_4

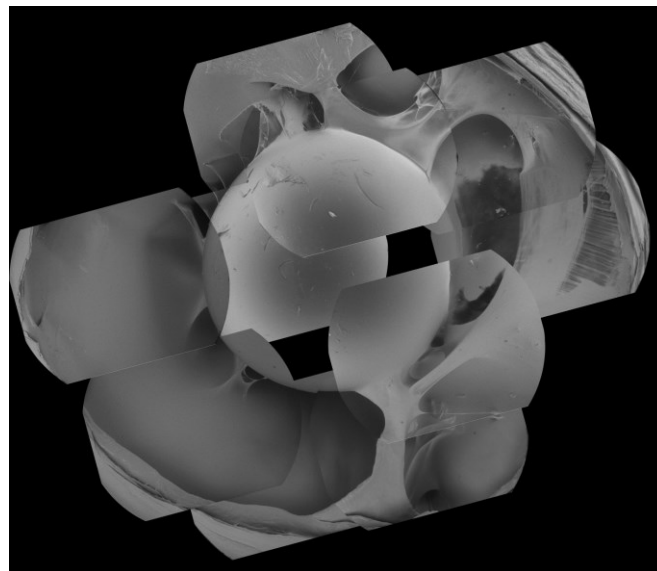


Fig. 32 ブルーギル_4 の SEM 画像

第3節 モデル詳細

SEM 画像 (Fig. 32) をモデル化したものを Fig. 33 に示す。第 5 章のモデルを大きく異なる点は、水晶体筋とレンズを繋ぐ靭帯を 2 本に増やしている点である。懸垂靭帯以外の靭帯を追加している。靭帯、水晶体筋、レンズのパラメータは第 5 章の値を用いる。収縮力は第 5 章同様に尾側のみに 0.7N を加えている解析と、吻側、腹側、尾側の全ての方向に力を加えている解析の 2 種類行った。水晶体筋の箇所による力の差が明らかになっていないことから、水晶体筋の部位全てに力を加える解析を行った。

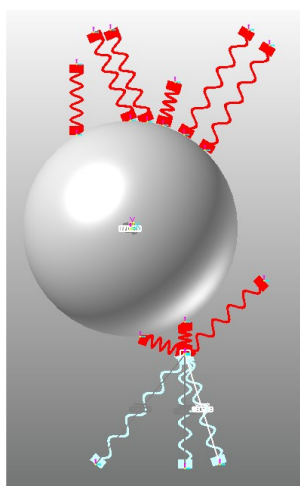


Fig. 33 ブルーギル_3 シミュレーションモデル

第4節 結果と考察

尾側のみに力を与えたレンズの水平方向の変位を Fig. 34 に示す。ブルーギル_3 は水平方向の変位量は他の 3 個体と比較して非常に小さい値となった。レンズの回転角度を Fig. 35 に示す。回転角度は非常に小さい値となった。靭帯が増加したことで、レンズの変位量と回転角度が減少したことから、靭帯が多いほどレンズの動きが抑制されると考える。この結果からレンズを動かす為には、より大きな力を水晶体筋に加えるか水晶体筋以外の他の部位や要素がレンズ挙動に影響を与えている可能性があると考ええる。

吻側、腹側、尾側の全ての方向に力を加えたレンズの水平方向の変位と回転角度を、Fig. 36, Fig. 37 に示す。ブルーギル_3 は変位量と回転角度は低い値となった。靭帯によってレンズの挙動が抑制されていることが明らかとなった。この章の結果から、レンズの回転を抑えつつ、ブルーギルの水平方向変位量である 0.55 mm 以上の変位量を出すためには、水晶体筋以外の作用がレンズ挙動に影響を与えていると考ええる。

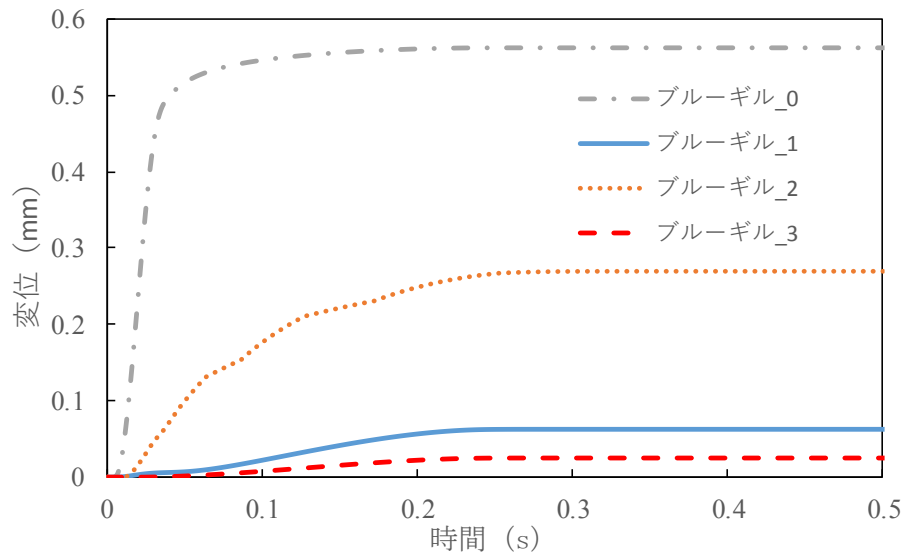


Fig. 34 レンズの水平方向の変位

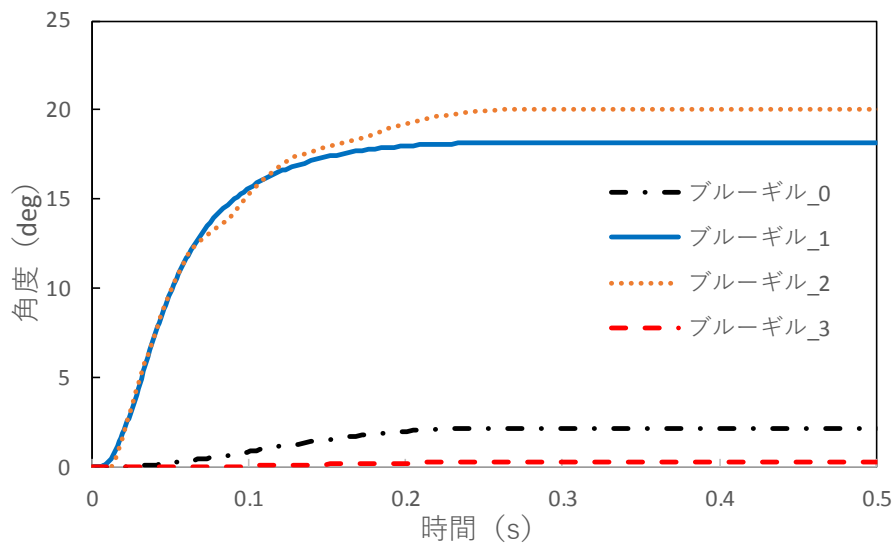


Fig. 35 レンズの回転角度

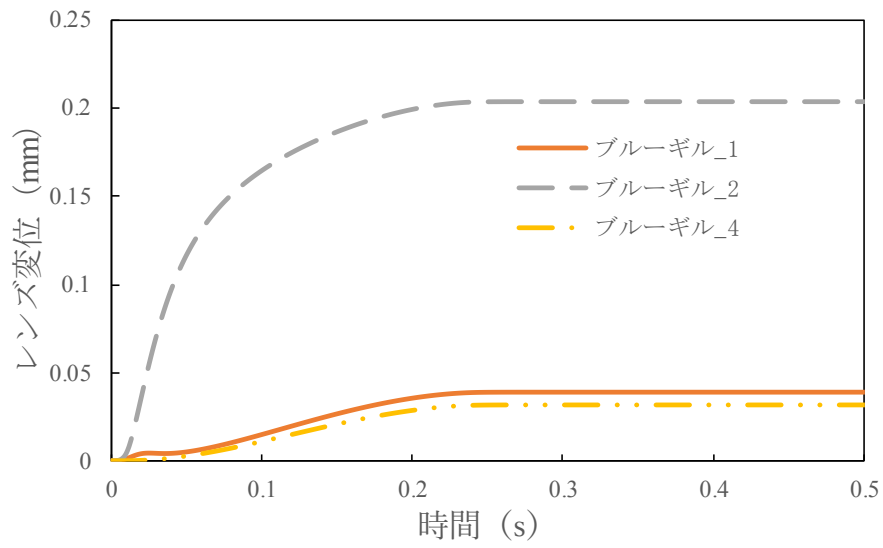


Fig. 36 全ての水晶体筋に力を加えたときのレンズ水平方向変位

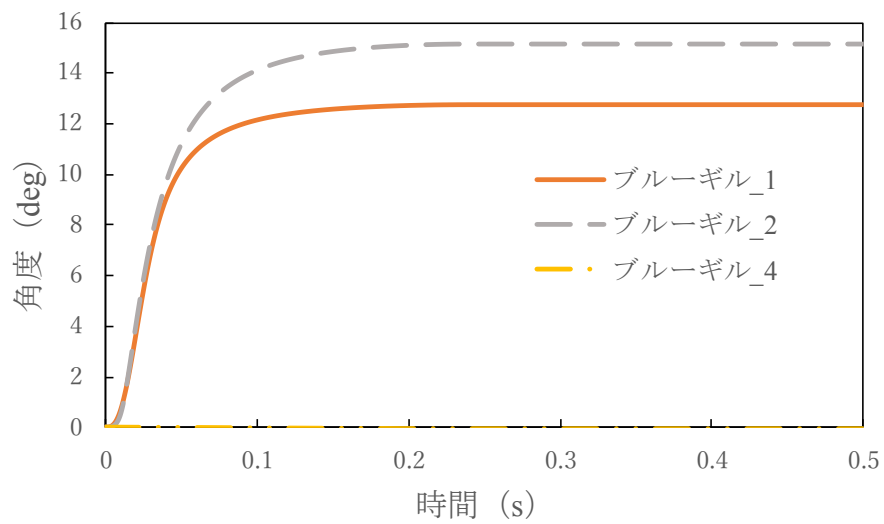


Fig. 37 全ての水晶体筋に力を加えたときのレンズの回転角度

第7章 結言

本論文では、三角型水晶体筋を模倣した水晶体筋を作成し、シミュレーション解析を行うことにより、眼球内部構造の妥当性について検討することを目的としている。従来の研究では、解剖学的にレンズの挙動を解析し、または魚の眼を摘出し、摘出した眼に電気刺激を与え、その前後の写真を撮ることでレンズの動きを解析している。それらの研究は、動いている魚を用いておらず、本論文でシミュレーション解析を行うことにより、これらの研究の結果の裏付けとなる可能性があると考えられる。本実験では、ブルーギルの三角型水晶体筋の眼球を模倣したモデルの作成、シミュレーション解析を行い、水晶体筋やレンズ挙動の機能について生物学的知見との比較検討を行った。

従前の研究で内田によってλ型水晶体筋と三角型水晶体筋の異なる水晶体筋形状でシミュレーション解析を行った。その結果、生物学的知見である魚の体軸に平行なレンズ挙動を表現することができた。シミュレーションによって眼球内部の位置予測ができる可能性があることを示唆している。本論文での第4章では内田によって作成された三角型水晶体筋を模倣してモデルを作成し、眼球内に含まれる硝子体の影響や背面靭帯が与えるレンズ挙動への影響を調査した。その結果、硝子体と背面靭帯ともレンズの変位量に直接影響することはないが、レンズ移動の過程でレンズの移動を滑らかにし、レンズの振動によるブレを防ぐ役割があるのではないかと考えられる。このことから、硝子体と背面靭帯は魚類の焦点調節機構において重要な要素であると考えられる。

第5章、第6章では視精度が高いと言われているブルーギルの三角型水晶体筋を眼球の解剖写真からモデル化し、シミュレーション解析を行った。懸垂靭帯、レンズ、水晶体筋の位置関係によって、レンズの変位量やレンズの回転に差が見られた。懸垂靭帯、レンズ、水晶体筋それぞれの中心が一直線上にある場合、知見の研究で得られていたレンズの変位量と同程度の値が得られた。しかしそれぞれの中心が一直線上にない場合、レンズが回転し、変位量を得ることができなかった。既存の研究では、多くの靭帯などがレンズの無駄な動きである回転を抑えていると述べているが、シミュレーション解析の結果ならびに解剖写真から判断すると、回転は起こる可能性があると考えられる。懸垂靭帯は焦点調節において重要な機能であるが、懸垂靭帯のみならず眼球に存在する他の要素がそれぞれ複雑に絡み合っており、レンズの動きを制限していると考えられる。または、楕円形のレンズが存在することやレンズの部位によってタンパク質濃度が異なり、光の屈折率が異なることから実際の焦点調節機構において、レンズを回転させることで焦点調節を行っている可能性があると考えられる。

また第6章では、SEM画像からモデル化し靭帯が与えるレンズ挙動を解析した結果、靭帯が多いほどレンズの動きが抑制されることから、レンズの回転を抑えつつ変位を出すためには、水晶体筋以外の要素がレンズの挙動に影響を与えていると考えられる。今後は他のブルーギルの解剖写真からモデルを作成し、レンズ挙動を検討し、正確な眼球内部構造を把握していきたい。

謝辞

本研究を行うにあたり，ご指導賜りました三重大学大学院生物資源研究科応用環境情報学研究分野の佐藤邦夫教授ならびに福島崇氏准教授に深く感謝申し上げます。また，ブルーギルの解剖や測定においてご協力していただきました，三重大学生物資源学部水族生理学教育研究分野の宮崎多恵子准教授ならびにその研究室生徒の皆様に感謝いたします。

引用文献

- 1) Tamura Tamotsu. A study of visual perception in fish, especially on resolving power and accommodation. Bulletin of the Japanese society of scientific fisheries. Vol. 22, No. 9. 536-556 1957
- 2) 田村保, 丹羽宏. 深海の魚ー眼とウキブクロとスクワレン.
- 3) 川村軍蔵, 田村保. ゴマサバおよびキュウセンの網膜の組織学的研究. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries. Vol.39. No.7. 715-726.1973.
- 4) O.S.E.Gustaffon, S.P.Collin and R.H.H.Kroger. Early evolution of multifocal optics for well-focused colour vision in vertebrates. The Journal of Experimental Biology 211. 1559-1564. 2008
- 5) Bjorn Karpestam, Jonas Gustafsson, Nadav Shashar, Gadi Katzir and Ronald H.H. Kroger. Multifocal lenses in coral reef fishes. The journal of Experimental Biology 210. 2923-2931.2007
- 6) 宮城美加代, 秋山清二, 有元貴文. ブリの視力の成長にともなう変化. 日本水産学会誌. 67. 455-459. 2001.
- 7) Omid Khorramshahi, J.marcus Schartau, Ronald H.H. Kroger. A complex system of ligaments and a muscle keep the crystalline lens in place in the eyes of bony fishes (teleosts). Vision Research. Vol.48. 1503-1508. 2008.
- 8) Sivak.J.G. Interrelation of feeding behavior and accommodative lens movements in some species of north American freshwater fishes. Journal of the Fisheries research board of Canada. Vol. 30. No. 8. 1141-1146. 1973.
- 9) 小笠原弘樹, 小井士隆, 山口敦子, 竹村暁. ナルトビエイとトビエイの視軸と視精度について.
- 10) Hiroaki somiya, Tamotsu tamura. Studies on the visual accommodation in fishes. Japanese journal of ichthyology. Vol. 20. No. 4. 193-206. 1973

- 11)宮元健郎. 魚眼レンズの射影について. 応用物理. 第 33 卷. 212(66). 1964
- 12)Elaine N. Marieb, R.N., Ph.D. 人体の構造と機能. 医学書院. 268-276.2015
- 13)大島祐介. 眼の光学的機構. 精密機械. Vol. 27. No. 11. 1961
- 14)落合明, 中村利一. 魚類解剖学. 緑書房. 283-291.1987.
- 15)川村軍蔵. 魚との知恵比べー魚の感覚と行動の科学ー. 成山堂書店. 2005
- 16)Beer T. Die Accommodation des Fischeauges. Pfluger Arch Ges Physiol. 58. 523-650. 1894
- 17)百瀬修, 武井史郎, 前川陽一, 内田誠, 宗宮弘明. シイラの遠近調節系と網膜視神経細胞分布. 日本水産学会誌. 69(3). 933-934. 2003
- 18)Tamotsu Tamura. A study of visual perception in fish, especially on resolving power and accommodation. Bulletin of the Japanese society of scientific fisheries. Vol. 22. No. 9. 536-557. 1957
- 19)環境省. 特定外来種生物の解説: ブルーギル [外来生物法].
<http://www.env.go.jp/nature/intro/1outline/list/L-sa-05.html>
- 20)坂野博之, 淀太我. ブルーギル *Lepomis macrochirus* の餌選択性ー動物プランクトンについて. Vol. 70. NO. 3.313-317. 2004
- 21)M.Fujimoto. H.Kunio. H.Katayama. Pharmacology of the retractor lentis muscle of the bluegill (*Lepomis macrochirus*). J Comp physiol A. 176. 673-677. 1995.
- 22) WEB 魚図鑑. <http://zukan.com/fish/internal140>
- 23)ファンクションベイ株式会社. ホームページ. <http://www.functionbay.co.jp/>
- 24)日本機械学会. マルチボディダイナミクス (1) ー基礎理論ー. コロナ社. 2008.
- 25)理化学研究所. 身体組織物性値データベース. <http://cfd-duo.riken.jp/cbms-mp/j/>

26)中野倫明, 樋口和則, 山本新, 画像処理を用いた高齢者の視覚特性の疑似体験システム.
テレビジョン学会誌. Vol.50. No.10. 1489-1495.1996

27)魚里博. 眼光学の基礎.

28)松浦豊明, 丸岡真治, 川崎健輔, 原嘉昭. 硝子体の構造とヒアルロナン. 日本バイオロ
ジー学会誌 (B&R). 第 17 卷. 第 4 号. 2003.

29)中村公俊, 岸田健一, 真鍋禮三, 坂西明朗. 眼科領域におけるレオロジー. 日本バイオ
ロジー学会誌. Vol. 45. Vol.5. 37-50.1991.

30)Omid Khorramshahi, J.Marcus Schartau, Ronald H.H. Kroger. A complex system of
ligaments and a muscle keep the crystalline lens in place in the eyes of bony fishes (teleosts).
Vision Research. Vol. 48. 1503-1508. 2008.

31)W.S.Jagger. P.J.Sands. A wide-angle gradient index optical model of the crystalline lens
and eye of the rainbow. Vision research. Vol.36. No. 17. 2623-2639. 1996.

参考資料

Taeko Miyazaki, Masashi Kobayashi. Morphological characteristics of eyes and retinas of two
sardines (*Sardinops melanostictus* and *etrumeus sadina*, clupeidae) and an anchovy
(*Engraulis japonicas*, Engraulididae). Journal of morphology. 1-10. 2014.

内田美幸. 魚類の焦点調節機構の運動解析による眼球内部構造の妥当性. 三重大学卒業論文.
2015.

付録

形状記憶合金を用いて水晶体筋アクチュエータの開発

第1章 緒言

魚の視覚器は多くの特徴を有し、片目での幅広い視野、紫外線視細胞の存在、素早い焦点調節などを持つ。しかし、多くの特徴をもつ視覚器は解剖学、生物学的に理解は進んでいるが、実際にどのように見えているのか、焦点調節や動体視力などのレンズの駆動に関して未解明な部分が多く、力学的に解明されていない。魚の視覚器を解明することは魚の摂餌行動・遊泳行動、主の生育環境への適応など、魚類の生態・進化的知見を新たに提供できると考える。また視覚器の機構を実際に物に起こして表現し、カメラに応用することで漁業や養殖といった産業分野への応用が期待できる。

従前の研究によってΛ型水晶体筋をもつマハゼの眼球や一般的な三角型水晶体筋によるレンズ駆動機構を簡易な運動解析モデルを作成し、動的シミュレーションを行った。生物学的知見で推測されていた水晶体の体軸に平行な動きを工学的に表現できた。そこで本研究は、魚の視覚器のレンズ駆動機構を機械的に表現することを目的とする。機械的に表現することで、焦点調節が可能な範囲、焦点調節に必要なレンズの変位量などを理解することができると考える。焦点調節機構で重要と考えられている水晶体筋を、形状記憶合金を用いてΛ型、三角型水晶体筋を表現し、レンズの挙動を観測し各形状の役割などを考察した。形状記憶合金を用いる理由として、水晶体筋は小さな眼球内に存在しているため、小型なアクチュエータを使用しなければならず、一般的なモータは、リンク機構などの動力伝達が必要なため大きくなり、水晶体筋としては不向きである。そこで加熱することで元の形状に戻る特性をもった金属である形状記憶合金を用いた。

第2章 形状記憶合金

第1節 形状記憶合金

形状記憶合金は熱エネルギーを力学的エネルギーに変換する機能材料であり、発見当初から感温型のアクチュエータとして、いろいろな方面で研究が進められている¹⁾。人工筋肉として活用²⁾や、魚類型ロボットへの活用³⁾などが挙げられる。形状記憶合金は電流を流すと筋肉のように動く細い繊維状で、生物のように柔らかく静かな動きをする金属製のアクチュエータである。通常は柔らかくナイロンの糸のようにしなやかで、電流を流すとピアノ線のように強靱になり、強い力で収縮する。電流を止めると再び柔らかくなり、もとの長さに伸び、何度でも動かすことができる⁴⁾。トキ・コーポレーション社製の形状記憶合金であるバイオメタルは繊維状のバイオメタルファイバー (BMF) とコイル状のバイオメタルヘリックス (BMX) があり、どちらもアクチュエータとして用いることができる。

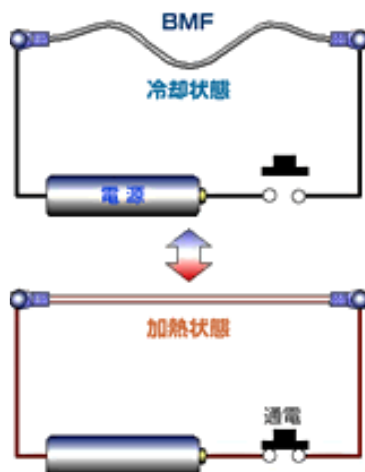


Fig. 38 バイオメタルファイバーの収縮図

表 1 BMF の仕様書

実用発生力(gf)	150
実用運動ひずみ(%)	4
実用動作寿命(回)	1,000,000
標準駆動電流(mA)	340
標準駆動電圧(V/m)	20.7
電力(W/m)	7.05
抵抗値(Ω /m)	61
引っ張り強度(Kgf)	1.8
重量(mg/m)	112

表 2 BMX の仕様書

標準コイル径(ϕ mm)	0.62
コイル径線径比 (D/d)	4.1
実用最大発生力(gf)	20~40
運動変位(長さ変化) (%)	50
標準駆動電流(mA)	200~300
標準電気抵抗(Ω /m)	400
使用可能温度の上限($^{\circ}$ C)	50~60
実用動作寿命(回)	100,000

第3章 BMF, BMX の変位量実験

第1節 目的

組織的に安定で耐久性のある BMF と BMX を水晶体筋アクチュエータとして適しているのか検討するために、変位量を知る必要がある。どの程度の電流と電圧で BMF と BMX に変位量があるのか実験を行った。

第2節 実験器具

マイコンボード

マイコンボードには ArduinoUNO を使用した。USB ケーブルからの給電で作動する。14 本デジタル入出力ピンが付いておりうち 6 本は PWM 出力で使用可能である。プログラミングには専用ソフトウェア ArduinoIDE を用いる。仕様書は以下に示す (表 3)。

表 3 ArduinoUNO 仕様書

マイコン	ATmega328
動作電圧	5V
入力電源電圧(推奨範囲)	7~12V
入力電源電圧(最大範囲)	6~20V
デジタルI/Oピン	14本
アナログ入力ピン	6本
I/Oピンの最大DC電流	40mA
3.3Vピンの最大DC電流	50mA
フラッシュメモリー	32KB
SRAM	2KB
EEPROM	1KB
クロック周波数	16MHz

トランジスタ

Arduino の出力電流ではバイオメタルの作動電流に不足していたためトランジスタで電流を増幅した。今回使用したのは 2SC3852 (サンケン電気株式会社) というシリコン NPN 三重拡散型トランジスタである。仕様書は以下に示す(表 4)。

表 4 トランジスタ仕様書

トランジスタタイプ	NPN
I _c (A)	3
V _{ceo} (V)	60
P _c (W)	25
hFE _{min}	500
hFE条件V _{ce} (V)	4
hFE条件I _c (A)	0.5
V _{ceo(sat)max} (V)	0.5

電源

電源には直流安定化電源(CPS-3025L,株式会社カスタム)を使用した。仕様書を以下に示す(表 5)。

表 5 直流安定化電源の仕様書

出力電圧範囲(V)	0~30
出力電流範囲(A)	0~2.5
リップルノイズ	5mVrms以下
出力電圧安定度(定電圧動作時)	±(0.05%+10mV)以下
表示方式	デジタル
表示部分解能(A)	0.01
表示部分解能(V)	0.1
表示部精度	±(1%rdg+2dgt)
入力電圧範囲	AC100V±10% (50/60Hz)
ヒューズ仕様	3A/250V
ヒューズサイズ	φ5.2×20mm
出力安定化方式	シリーズレギュレーション方式
冷却方式	自然空冷

データロガー

電圧値の測定には電圧ロガー(GL820, グラフテック株式会社)を使用した。仕様書は以下に示す(表 6)。

表 6 データロガーの仕様書

アナログ入力ch数	標準20 ch
外部入力	トリガ入力または、外部サンプル入力1ch・ロジック入力4chまたはパルス入力4ch
外部出力	アラーム出力4ch
サンプリング周期	10 ms～1 h
TIME/DIV	1s～24h
アラーム出力	チャンネル数 4ch、出力形式：オープンコレクタ出力（5Vプルアップ抵抗10kΩ
パルス入力積算モード	50C、500 C、5000 C、50 kC、500 kC、5 MC、50 MC、500 MC/F.S.
瞬時モード	50 C、500 C、5000 C、50 kC、500 kC、5 MC、50 MC、500 MC/F.S.
回転数モード	0rpm、500 rpm、5000 rpm、50 krpm、500 krpm、5 Mrpm、50 Mrpm、500 Mrpm.
最大パルス周波数	50kHz
CH間演算	加算・減算・乗算・除算
統計演算	平均値・ピーク値・最大値・最小値・実効値の中から2演算
PCI/F	イーサネット(10 BASE-T/100 BASE-TX)、USB（ハイスピード）
記憶媒体	本体内蔵フラッシュメモリ4GB
リング収録	収録点数：1000～2000000（
スケーリング機能	電圧レンジ時：4点設定，温度レンジ時：2点設定
表示器サイズ	5.7インチTFTカラー液晶ディスプレイ(VGA:640×480ドット)
使用環境	0～45℃、5～85%RH
定格電源	AC100V～240V/50～60Hz，DC8.5V～24V(最大26.4V
消費電力	32VA以下

測距センサ

BMF や BMX の変位量を測定するために、測距センサ（SHARP, 2Y0A21）を用いて、下側からレーザを当て、その反射したレーザを読み取って距離を求めている。レーザ変位計の仕様書を以下に示した（表 7）。

表 7 測距センサの仕様書

供給電圧	-0.3～7 V
出力端子電圧	-0.3～+0.3 V
動作温度	-10～60℃
出力距離範囲	10～80 cm

第3節 実験方法

BMF 通電実験

長さ 200 mm にした BMF の両端に端子を取り付け、被膜した S 字フックで下側に荷重を与え、安定化電源を用いて通電させのち、下側にレーザ変位計を用いて、BMF の変位量を測定した。



Fig. 39 BMF の荷重実験

BMX 通電実験

自然長 200 mm の BMX に十分に伸ばすことのできる 10 g の荷重を与え，入力電圧パルスを変化させて変位量を測定した．今後の実験において電圧を変化させる場合に安定化電源で電圧を変化させるよりも制御が正確である PWM 制御を用いた．このパルス制御にはマイコン基盤である Arduino を使用し，トランジスタを用いて出力電圧を増幅させることで BMX を作動させた．回路図を Fig. 40 に示す．パルスは 0～255，Duty 比 0～100% の幅で制御し，最大値で電圧 5V となるようにした．BMF の実験と同様に端子を取り付け，荷重の変位量をレーザー変位計で測定した．

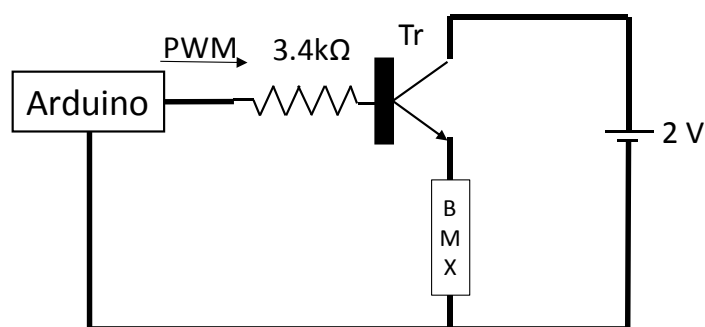


Fig. 40 BMF の作動回路図

第4節 結果と考察

BMF

BMF 変位量と電圧，電流の相関の結果を Fig. 41 に示す．実験結果から電圧が 3～4V の間で変位量が大きく増加した．この時の電流値は 0.09～0.14V であった．4V～6V の間では変位量に若干の増加傾向があったがそれ以降では変位量に大きな差は見られなかった．変位量の最大値は 10mm であり，全長の 5% となった．また，4V 以下の状態でも 2 分以上通電状態を維持すると急激に BMF が収縮するという現象も見られたが，アクチュエータと使用するためには応答速度が求められるため今回はデータに反映しなかった．これらのことから BMF は通電により一定以上の温度に達すると収縮し，それ以上温度を上昇させても変位量にあまり影響が出ないといえる．また，今回の実験の電流値，変位量は BMF 仕様書と同等の結果となった

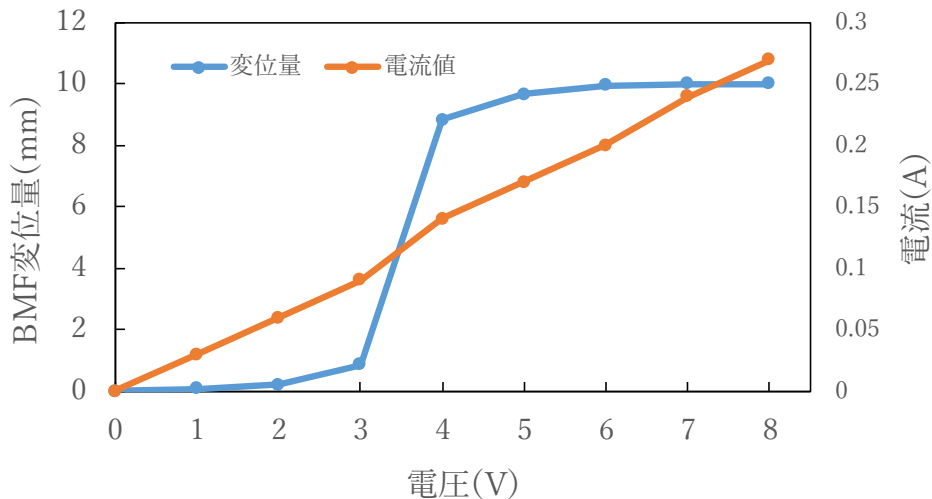


Fig. 41 BMF 変位量と電圧，電流の相関

BMX

BMX の変位量と電圧，電流の相関を Fig. 42 に示す．実験結果からパルスが Duty 比 40～60% の間で変位量が大きく増加した．この時の電流値は 0.05～0.11A であった．変位量は自然長 20mm に対して 40mm と大きな変位量が得られた．このことから適正パルスは Duty 比 60% であり，この時の電圧は約 3V であった．パルスの Duty 比 60～100% の間では変位量に大きな差は見られなかったが，これは BMX がコイルばねのような形状をしているため自然長以上には収縮できないためと考えられる．また，適正パルスである 60% のときの電流は 0.11A であった．これは仕様書の適正電流 0.2～0.3A と比較して小さな数値であった．この原因としては，BMX を今回 20mm と短い長さで使用したため，通電による昇温が長い場合に比べ早かったことが考えられる．変位量に関しては自然長の 200% 以上の収縮量を得ることができた．この数値は BMX の仕様書と同等の結果であると同時に

に、生体筋の運動変位 20% に対して十分な数値であるため、BMX の伸長量を調節することで様々な運動変位を得られることが分かった。そのため、本論分でのレンズ駆動機構モデル化の実験においては BMX を用いる。

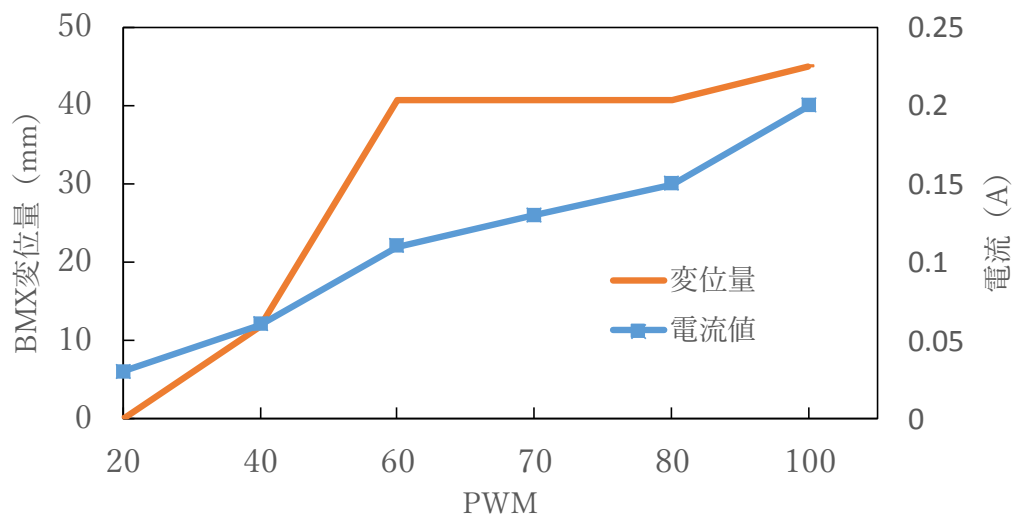


Fig. 42 BMX 変位量と電圧、電流の相関

第4章 BMX を用いてレンズ駆動モデルの作成と比較

第1節 目的

第3章の結果から BMX を用いて一般的な魚類の水晶体筋形状である三角型水晶体筋とλ型水晶体筋のレンズ駆動機構を作成した。レンズ駆動機構を再現することで、内部構造の解析や焦点調節機構の理解を深め、今後のカメラデバイスとしての活用法を見つけ出すことを目的とする。従前の研究のシミュレーションの三角型 (Fig. 43), λ型 (Fig. 44) 水晶体筋モデル、水晶体筋、懸垂靱帯の20倍スケールで作成した。二つの水晶体筋形状のレンズ駆動機構を用いて BMX の伸長量とレンズの変位量の相関を求める。

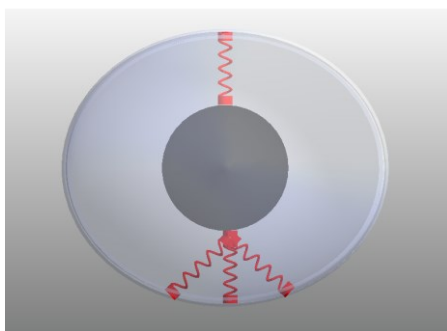


Fig. 43 三角型水晶体筋シミュレーションモデル

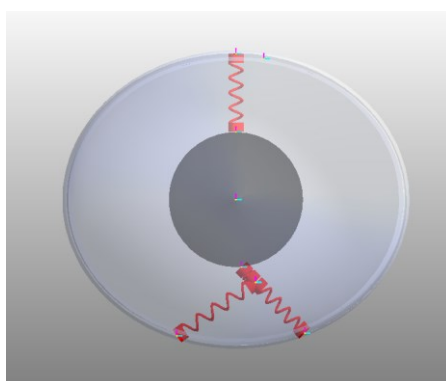


Fig. 44 λ型水晶体筋シミュレーションモデル

第2節 実験モデル

三角型水晶体筋

BMX によって表現された三角型水晶体筋駆動実験モデルを Fig. 45 に示す。レンズは卓球ボール、懸垂靱帯にはばね定数の高いコイルばね、吻側、尾側の水晶体筋には長さ 20 mm の BMX を使用した。従前の研究のシミュレーションの結果より、腹側の水晶体筋の収縮力はレンズの変位量に影響を及ぼさないことから、腹側にはばね定数の低い引っ張りスプリング（トキ・コーポレーション株式会社）を使用した。卓球ボールの上下に端子を固定し、2本の BMX の両端にもそれぞれ端子を固定した。卓球ボールの上側端子には、コイルばねを取り付け、下側端子には4つ穴をあけた金属板を固定した。この金属板に2本の BMX の端子と引っ張りスプリングを固定した。卓球ボールの下側端子に2本の BMX と引っ張りスプリングを同時にねじ止めすることもできたが、金属板を使用した理由としては3点全てを同平面上に固定することができ、吻側と尾側の BMX の長さを同じにすることができるためである。BMX と引っ張りスプリングのもう一方の端子はレンズを90度で引っ張ることができるよう作製した任意の位置でねじ止め可能なアクリル板の台に固定した。

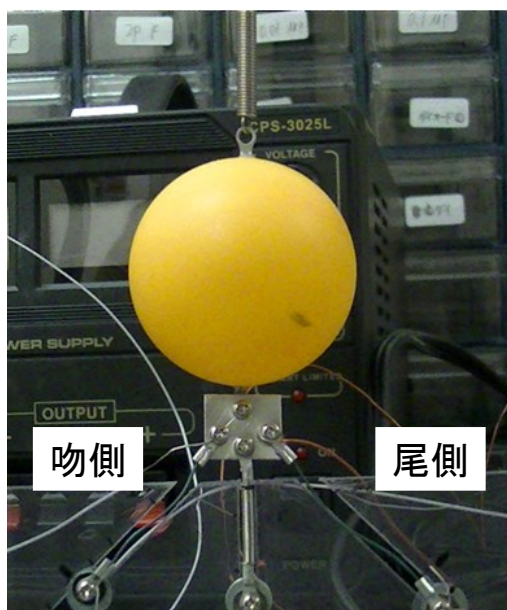


Fig. 45 三角型水晶体筋実験モデル

λ型水晶体筋

BMX によって作成されたλ型水晶体筋実験モデルを Fig. 46 に示す。BMX の使用温度上限が 50~60 度ではんだ付けを行うことができないため、尾側の水晶体筋から吻側の水晶体筋が枝分かれするように出ている部分は、BMX を一部被膜し接着剤で固定した。従前のシミュレーションモデルの 20 倍スケールで作成し、吻側 18mm、尾側 17mm とした。吻側の BMX は尾側の上部から 4mm の位置に接着した。三角型水晶体筋モデルと同様にレンズに卓球ボール、懸垂靱帯にはばね係数の高いコイルばねを使用した。卓球ボールの上下に端子

を固定し、尾側バイオメタルヘリックスの両端と吻側バイオメタルヘリックスの非接着の端に端子を固定した。これを実験 1 と同様に任意の位置でねじ止め可能なアクリル板の台に固定した。

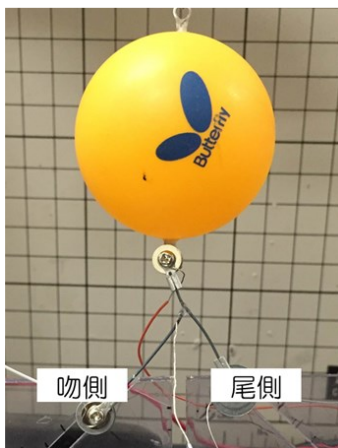


Fig. 46 λ 型水晶体筋実験モデル

第3節 実験方法

BMX に変位量を与え通電を行い、そのときの卓球玉の変位量を測定する。BMX の変位量は、生態筋の運動変位 20%と合わせ、運動変位 20%, 40%, 60%となるように与えた。本実験では水平方向の変位を見たいため、図から右側と左側つまり魚類でいう尾側と吻側のみ通電を行った。卓球ボールの変位量は通電前と通電後のレンズ駆動モデルを台に固定したデジタルカメラで撮影し、画像編集ソフト paint.net で 2 枚の画像を重ね合わせ、卓球ボール外側のピクセル移動量を測定した。また、同時に撮影した定規のピクセル量から 1 ピクセルの実寸を計算してレンズの変位量を算出した。各 BMX につき 5 回行った。

第4節 結果と考察

三角型水晶体筋モデルのBMXに与えた変位量と卓球ボールの変位量との相関を示す。図は卓球ボールの吻側への変位を正としている。Fig. 47からBMXに与える変位量を増加させると卓球ボールの変位量が増加することが分かった。これはBMXが持つ通電すると自然長に戻ろうとする性質から、自然長に対して大きな変位量を与えるほど強い収縮力が得られるためである。また、この実験ではFig. 48のようにレンズの体軸方向の移動が再現出来ていることが分かる。しかし、BMXの運動変位が40%の場合で平均1.98mm、60%の場合で1.42mmの卓球ボール変位量の差が吻側と尾側の実験結果に生じた。この変位量の差はBMXの台への固定を手作業で行っているために、吻側と尾側でBMXの長さが違っていたことが考えられる。そのため、今後正確な長さ調節が可能かつ大型化しないような方法を検討していく必要がある。

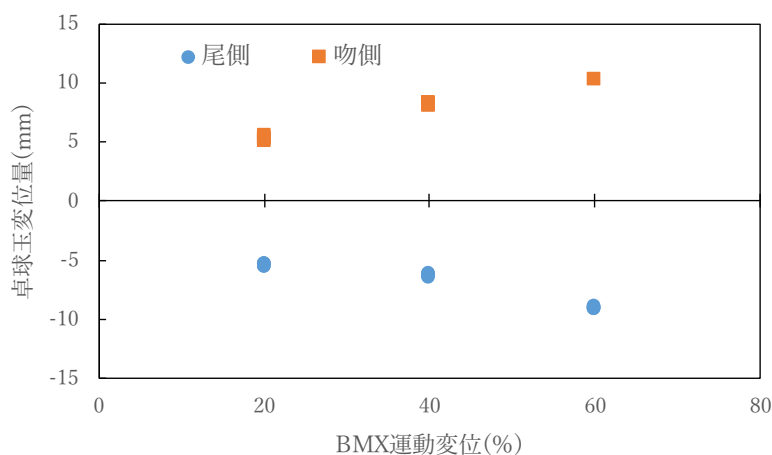


Fig. 47 三角型水晶体筋モデルの卓球変位

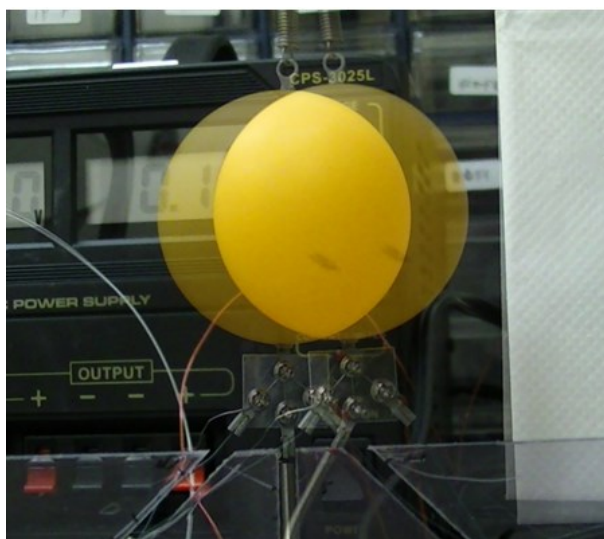


Fig. 48 三角型水晶体筋モデルオーバーレイ画像

λ型水晶体筋

λ型水晶体筋モデルのBMXに与えた変位量と卓球ボールの変位量との相関をFig. 49に示す。図は卓球ボールの吻側への変位を正としている。尾側はBMXに与える変位量を増加させると卓球ボールの変位量が増加する傾向にあった。吻側はBMXに与えた変位量に関わらず卓球ボールは尾側に変位し、変位量にも相関は無かった。この結果は従前の研究でのシミュレーションで吻側と尾側の水晶体筋に同時に収縮量を与えた場合の結果(Fig. 50)と同等の結果であった。また、尾側と吻側の実験結果を比較すると吻側の実験では卓球ボールの変位量が小さくなっていること、尾側に対して大きな運動変位を与えても吻側に卓球ボールが変位しないことから、吻側の水晶体筋は尾側に変位したレンズを吻側に戻す性質があり、焦点調節を行う上でレンズを適切な位置により強く固定する役割や、焦点調節のために移動したレンズを正常な位置に戻す役割があると考えられる。三角型水晶体筋モデルの実験結果と比較すると、尾側のBMXに変位量を与えた場合では三角型と同様にBMXに与える変位量を増加させると卓球ボールの変位量が増加する傾向にあった。吻側に変位量を与えた場合は三角型では卓球ボールを初期位置よりも吻側に移動させるが、λ型の場合には尾側への変位量を抑える働きをし、卓球ボールが初期位置よりも吻側に移動することが無かった。そのため三角型水晶体筋を持つ魚種はレンズを吻側と尾側の両側に移動させ焦点調節を行い、λ型水晶体筋を持つマハゼはレンズを初期位置から尾側のみへ移動させることで焦点調節を行っていると考えられる。

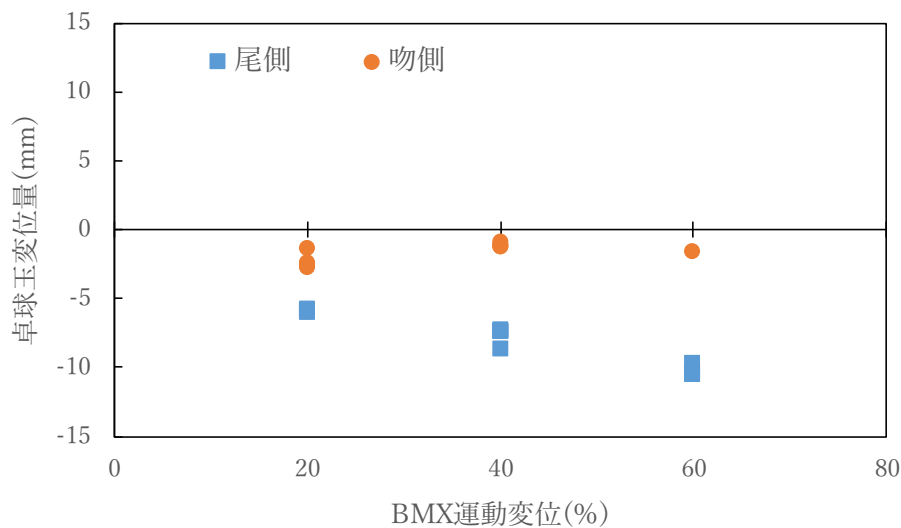


Fig. 49 λ型水晶体筋モデル変位

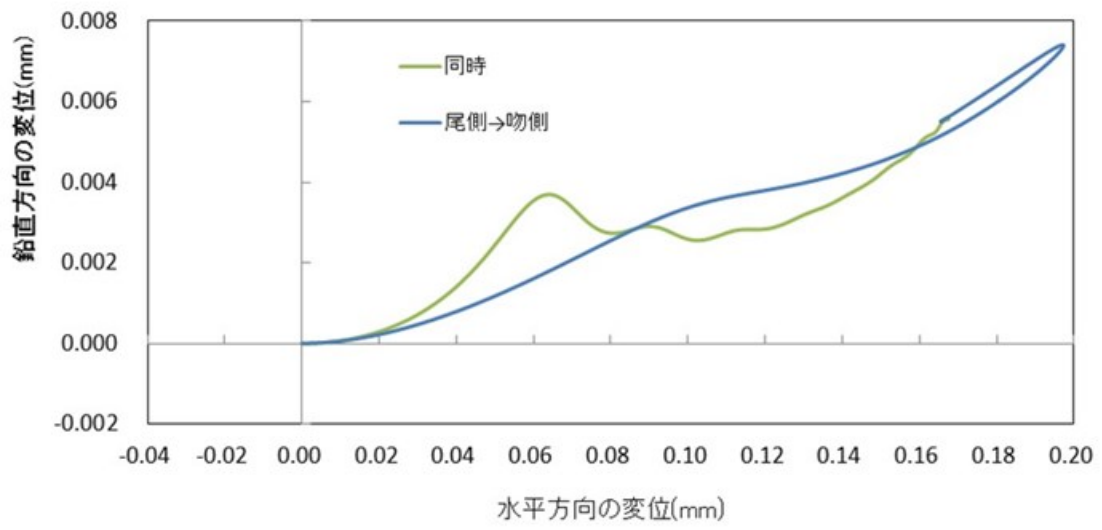


Fig. 50 λ型水晶体筋シミュレーション結果

第5章 結言

レンズ駆動機構を機械的に表現する上で動力源となる水晶体筋を模倣する材料の選定としてバイオメタルファイバー (BMF) と BMF をマイクロコイル状に加工したバイオメタルヘリックス (BMX) の性能比較をおこなった。BMX は大きな運動変位が得られ、任意の運動変位を出力できるため BMX を水晶体筋アクチュエータとして使用した。

多くの魚類が持っている三角型水晶体筋とマハゼが唯一持っている λ 型水晶体筋モデルを作製し、BMX に与えた運動変位とレンズ変位の相関を調べた。三角型水晶体筋モデルでは BMX の変位量を増加させると卓球ボールの変位量が増加することが明らかになった。しかし、BMX 変位量の微調整の難しさや BMX の自然冷却において元の長さに戻るまでに時間を有することから、カメラデバイスとして適用は現段階で困難であると判断した。未だに解明されていない焦点調節のメカニズムや魚の内部構造の理解を深める必要があると考え、シミュレーションで解析する必要があると結論する。

引用文献

- 1)本間大. 機能異方性形状記憶合金の開発と応用. 精密工学学会誌. Vol.75. No.6. 690-694. 2009
- 2)石川敏也, 田中毅. 人工筋肉を目指した形状記憶合金アクチュエータ (巻フィルムチューブ方式の提案). 日本機械学会. Vol. 71. No. 703. 180-186. 2005.
- 3)須本祐史, 山口悟. 人工筋肉を用いた魚類型ロボットの大型化に関する研究. 日本船舶海洋工学. 第 12 号. 157-163. 2010.
- 4)トキ・コーポレーション株式会社ホームページ.
<http://www.toki.co.jp/biometal/products/WhtsBM.php>