

電子・情報工学専攻	学籍番号	953414	指導教官氏名	臼井支朗 中内茂樹
申請者氏名	堀 浩之			

## 論 文 要 旨 (博士)

論文題目	視覚における瞳孔の機能と対光反射生成機構に関する研究
------	----------------------------

(要旨 1,200 字程度)

眼光学系は、物体表面で反射した光を網膜視細胞層上に結像させる機能を担っている。瞳孔は、眼光学系における開口絞りに相当し、外界の輝度増加にともなって縮小する。ところが、視覚情報の獲得という眼光学系の本質的な役割に対して、輝度に応じた瞳孔径が選択されることの利点は不明であった。過去の研究では、瞳孔の主機能は視力の最大化にあると予想されていたが、それを裏付ける実験的な証拠はなかった。一方、生体工学においては、対光反射の生成機構に関する研究が過去 50 年に渡って進められ、瞳孔光反射系の数理モデルがいくつか提案された。しかしながら、いずれのモデルも、その ad hoc な構造の所為で様々な光刺激に対する瞳孔反応を統一的に再現することはできなかった。本論文は、こうした背景の下、生体工学的な観点から瞳孔の理解をさらに進めることを目標とし、対光反射が何を目的としてどのような機構によって実現されるのかという問題意識の下に行った研究である。

まず、視力の計量として網膜情報容量を導入し、瞳孔機能を理論的に考察した。その結果、最大の網膜情報容量を与える瞳孔径があらゆる輝度で自然瞳孔に近いことが示された。これは、瞳孔機能が視力の最大化にあるという仮説を支持する。さらに、網膜情報容量の最大化に基づいたシミュレーションにより、眼屈折状態が劣化するにつれて最適な瞳孔径が小さくなることを予測した。そこで、その検証実験として、20 名の被験者を対象に眼屈折状態と輝度-瞳孔径関係を測定した。その結果、眼屈折状態が劣化した被験者ほど縮瞳する傾向が捉えられた。また、再矯正により眼屈折状態が改善した 1 名の被験者から輝度-瞳孔径関係の経日変化を測定したところ、2-4 週間かけて徐々に散瞳する傾向が捉えられた。これら 2 つの実験結果は、互いに矛盾することなく、網膜情報容量に基づく理論的な予測に一致した。つまり、瞳孔の主機能は視力の最大化であり、且つ、その静的な特性が眼屈折状態に応じて適応的に変化することが示された。

また、瞳孔光反射系の数理モデルを構築した。光反射系は、そこを伝達する信号の形態に着目した巨視的な観点から捉えると、光を神経活動に変換する網膜・中枢神経系と、神経活動を筋張力を介して瞳孔径へと変換する瞳孔筋系の 2 つのサブシステムに分割される。前者は、電気生理学において蓄積されてきた網膜への光刺激に対する副交感神経活動に基づいてモデル化した。後者は、生体工学において提案、改良されてきた瞳孔筋系モデルを基盤にした。そして、それらを統合した光反射系全体のモデルが、ステップ、ランプおよび指数関数状に強度が増加する光刺激に対する瞳孔反応を統一的に再現できることを確認した。

本論文の成果は、視覚における瞳孔の機能を明確にし、その機能を実現している機構を数理モデルとして記述したことである。さらに、輝度-瞳孔径関係の適応は、本論文により発見された全く新しい現象であり、眼球運動の運動学習に関する研究がかつてそうであったように、生理学や生体工学のみならず計算論的神経科学など幅広い分野への展開が期待される。