

青色コントラスト感度を利用した視機能評価システムの構築

櫻井 理紗^{*}・竹村 匡正^{*}・田村 寛^{**}・黒田 知宏^{**}・堀尾 裕幸^{*}

Visual Function Evaluation System Using Blue Contrast Sensitivity

Risa SAKURAI,^{*} Tadamasa TAKEMURA,^{*} Hiroshi TAMURA,^{**} Tomohiro KURODA,^{**} Hiroyuki HORIO^{*}

Abstract Age-related opacity of the lens can happen to anyone. Lens opacity leads to decreased visual function, and damages the quality of life (QOL). It has been reported that lens opacity leads to absorption of blue color with short wavelength. Therefore, we hypothesized that the relationship between decrease in visual function and QOL can be examined if we can measure a person's recognition of blue color. In this study, we develop a visual function evaluation system to measure the blue color differential threshold. This system is implemented on tablet devices and displays a black Japanese character on a blue background. The background color can be changed based on the HSV color system. We conducted a survey on 27 participants aged 23-78 years, using the visual function system to measure the differential threshold and the NEI-VFQ25 vision-related questionnaire as a QOL evaluation tool. Consequently, we found a significant difference in blue contrast sensitivity between young participants and elderly participants. However, there was no correlation between blue contrast sensitivity and QOL. In summary, based on the results, we believe that this system can measure blue contrast sensitivity and can be used for evaluating visual function.

Keywords : visual function, QOL, blue contrast sensitivity.

1. は じ め に

加齢に伴う水晶体の混濁は誰にでも起こりうる現象であり、年齢別の初期混濁を含めた水晶体混濁の有所見率は、50歳代で37-54%、60歳代で66-83%、70歳代で84-97%、80歳代で100%と報告されている[1]。水晶体は眼球内の前方に位置しており、主に蛋白質、水、糖質、脂質、アスコルビン酸、グルタチオンで構成される無血管の透明組織で、前後径4-5mm、重量約0.2gである[2]。外界の光は、まず角膜と水晶体を透過しこれらの屈折作用を受けて硝子体を通過し網膜に像を結ぶ。網膜上に鮮明な像を生じさせるために、角膜と水晶体が眼内に入射する光を

屈折させる。また、水晶体はその調節作用により、異なる距離の外界からの光を網膜の黄斑部に結像する[3]。水晶体の透明度は、クリスタリンという蛋白質や水晶体繊維の配列と含水量で維持されている。ちなみに、水晶体構成成分の1/3がクリスタリンを含む蛋白質であり、これらの蛋白質が加齢によって変性し、黄色味を帯び始め、黄褐色から褐色調となる[2, 4]。当然ながら、水晶体の混濁は水晶体の分光透過率に影響することが報告されている[5]。分光透過率とは、各波長を透過する光の割合である。これまでの研究では、実際に白内障手術によって摘出された水晶体の切片を用いて分光透過率を計測する試みが為されているが[6]、透明性を維持した水晶体に対して、着色のある水晶体は400nmから500nmの波長域において透過率が相対的に低くなっており、短波長域の光が混濁した水晶体によって吸収され網膜に到達せず[7]、結果として青色系の認識が困難になると言われている[7, 8]。

よって、水晶体の混濁が青色系の光を吸収するのであれば、水晶体の混濁を客観的に計測できる可能性がある。しかし、生体としての人間には補正機能があるため、摘出した水晶体の切片のように青色系の光を吸収していたとしても、人間の色知覚系全体として計測できるかは不明である。そのため、今回われわれはこれまでの知見である水晶

生体医工学シンポジウム 2014 発表 (2014 年 9 月, 東京)
2014 年 8 月 1 日受付, 2014 年 10 月 20 日改訂, 2014 年 12 月 10 日再改訂

Received August 1, 2014; revised October 20, 2014, December 10, 2014.

^{*} 兵庫県立大学大学院応用情報科学研究科
Graduate School of Applied Informatics, University of Hyogo

^{**} 京都大学医学部附属病院医療情報企画部
Division of Medical Information Technology and Administration Planning, Kyoto University Hospital

体の混濁が青系の光を吸収する、という事実を用いて混濁の度合いを客観的に計測できるかを検証し、これらの検証結果を用いて視機能評価システムを構築することを目的とする。具体的には、青系色の光が吸収されることから、人間の色知覚特性として[9]、青系色を中心とした色弁別閾値を「青色コントラスト感度」として高齢者、若年者を対象として計測をすることで、水晶体の混濁が計測可能かを試みる。実際の計測としては、タブレット端末上に青色コントラスト感度を計測可能なシステムを構築し、それを実際の被験者に対して適用することで、加齢による水晶体の混濁を計測可能かについて検証する。また、青色コントラスト感度による水晶体の混濁は視機能の低下をもたらしていると考えられることから、視覚に関する QOL 評価ツール (NEI VFQ-25) を用いて QOL を評価することで、青色コントラスト感度と QOL との関係の分析を試みる。

2. 方 法

2.1 青色コントラスト感度の計測方法

水晶体の混濁が起こることで短波長領域の光が吸収されるならば、青色の明度や彩度を下げて青色を黒に近づけた場合、水晶体の混濁がない場合に比べて青色と黒色を弁別する感度が下がることが予想される。よって、青色と黒色の判別可能な値を「青色コントラスト感度」として計測する。具体的には、画面上の青色の背景に黒色の文字を表示し、この黒色の文字色に対して背景色の青色を変更し、黒色の文字が認識できなくなる値を計測する。色の表示および計測については、HSV 表色系を用いる。HSV 表色系は、Hue(色相)、Saturation(彩度)、Value(明度)で色を表現し、色相は、0 から 360° で表現し、彩度は 0 から 100% で、明度は 0 から 100% で表される。HSV 表色系は彩度、明度を用いて人間の直感にあった表色が可能である。今回は、青系色の光の吸収が示唆されていることから、色相を青色に固定 (240°) し、明度と彩度を変更することで青色コントラスト感度を計測する。実際の計測では、色の認識については明度の影響が大きいことから、彩度を 10% ごとに区切り、各彩度において判別が不可能になった明度を詳細に計測する。

2.2 システムの実装

本システムは、今後の在宅での簡易視機能検査ツールへの展開も踏まえて、タブレット端末での実装を試みる。タブレット端末は Apple 社の iPad2 とし、iPad 上で動作するアプリケーションとして Xcode5.0.1 を用いて iOS ネイティブアプリケーションとして構築する。図 1 は本システムの実験画面である。画面の中央に黒色のひらがなを表示し、この文字を認識できる場合は○ボタンを、認識出来ない場合は×ボタンを選択するようそれぞれボタンを配置している。片眼ずつ計測するため、計測の眼がどちらか入力できるよう、上方に選択ボタンを配置している。

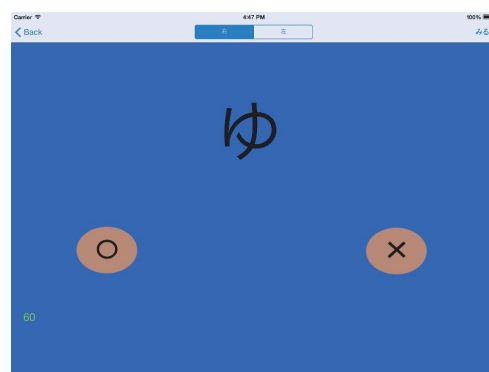


図 1 計測画面.
Fig. 1 Interface.

図 2 に各彩度における青色弁別閾値となる明度の計測のフローの例を示す。計測は、利用者が提示された文字が認識できるか認識できないかによって背景色の青色を二分探索アルゴリズムによって変更する。青色は HSV 表色系の 240° とし、各彩度において、初期値は明度が最も高い 100% (明度 100 と表記する) の背景色を提示し、文字が認識できると次は背景の明度を下げて文字の認識が難しくなる条件とする。次に提示された明度 50 での文字が認識出来た場合は、さらに明度を下げる。また、文字が認識できない場合は次に明度を上げた背景を提示し、前回の提示より文字が認識しやすい条件とする。結果、認識出来る値と認識できない値の間を測定できるが、この値が色弁別閾値であり、今回計測する青色コントラスト感度となる。今回は、色弁別閾値が 1 以下の差になった時点で計測を終了することとし、そのため各彩度あたり 7 回の計測で色弁別閾値が決定される。これを彩度 0% から 100% まで 11 回行う。

本システム上では、被験者が文字を認識できたかによって、文字をランダムに表示し背景色を変化させる。図 3 に実際の背景色の変化の例を示す。

2.3 視機能に関する QOL 評価

視機能に関する QOL 評価については、認定 NPO 法人健康医療評価研究機構が提供している「視覚に関連した健康関連 QOL を測定する尺度 (The 25-item National Eye Institute Visual Function Questionnaire : NEI VFQ-25)」がある[10]。この VFQ-25 は、生活場面における視機能と、見え方による身体的、精神的、社会的な生活側面の制限の程度を測定する 12 の領域からなり、質問は 25 項目から構成されている。これら 12 の領域を下位尺度と呼ぶ。表 1 に VFQ-25 の領域と下位尺度の項目数を示す。項目数は下位尺度ごとの質問数を表している。この 25 項目の質問は各 5 から 6 の選択肢から一番当てはまるものを答える選択方式である。

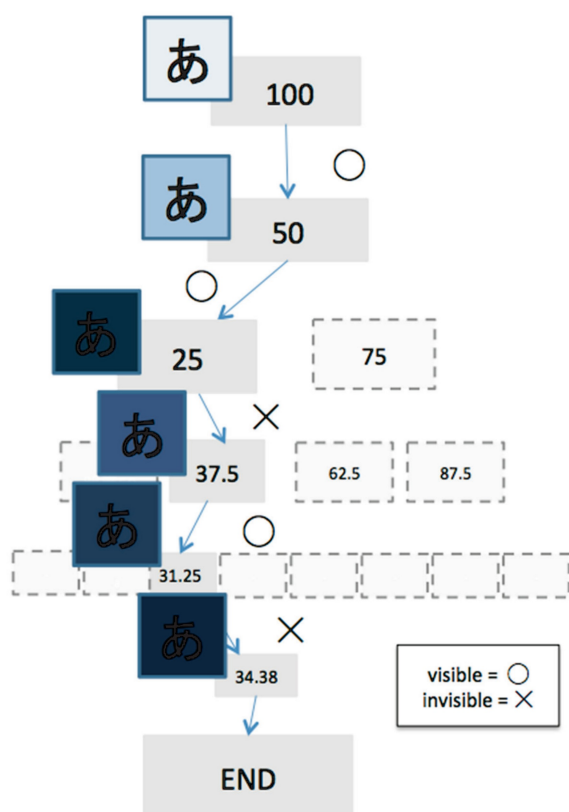


図 2 計測フロー.

Fig. 2 Flow chart of examination.

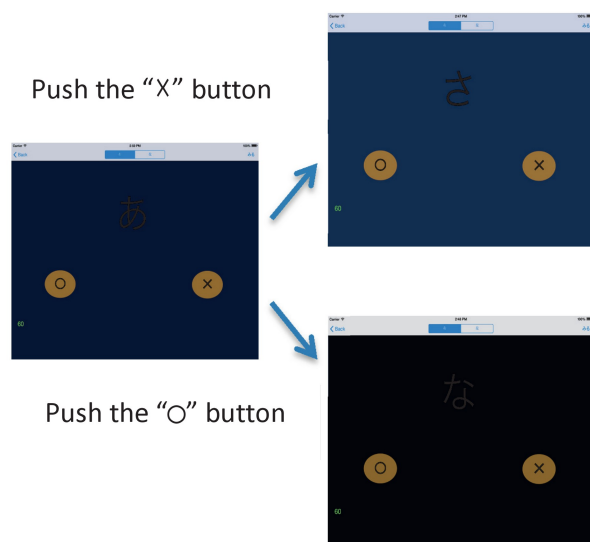


図3 背景色変化の一例.
Fig. 3 Change of background color.

3. 実 験

今回構築したシステムを用いて、実際の被験者に対して実験を行った。水晶体の混濁は左右の両方で別々に起こるので、各被験者の右眼、左眼についてそれぞれ計測を行った。

表1 VFQ-25の下位尺度ごとの項目数.

VFQ-25 subscales	Number of Items
General health (GH)	1
General vision (GV)	1
Ocular pain (OP)	2
Near vision (NV)	3
Distance vision (DV)	3
Social function (SF)	2
Mental health (MH)	4
Role limitations (RL)	2
Dependency (DP)	3
Driving (DR)	2
Color vision (CV)	1
Peripheral vision (PV)	1

3・1 被験者

対象となる被験者は、20代の若年者10名 (24.4 ± 1.78 歳) および大学が開催する市民公開講座に参加した17名 (65.0 ± 5.23 歳) である。市民公開講座に参加した被験者は全員59歳以上であったため、本論文では59歳以上を高齢者と表現する。被験者における眼疾患の有無に関しては、1名の高齢者において加齢黄斑変性症と診断された人がみられたが、視機能の低下によって日常生活に支障をきたしている被験者は居なかった。また、被験者は全員が実験の内容を理解し回答が明確であったことから、認知レベルが極端に低下した人は含まれていなかった。なお、本実験においては各被験者から実験に関する同意書を取得し、また兵庫県立大学大学院応用情報科学研究科研究倫理委員会の承認を受けた。

3.2 實驗環境

実験は、大学内の窓のある教室内で直射日光が入らず、かつ蛍光灯が直接タブレット端末に反射しない場所で実施した。今回構築したシステムをインストールした五台のiPad2を準備した。これらの端末は、端末自身の環境光に合わせた輝度の自動調節機能はオフにした上で、端末設定可能な最も高輝度の状態にて実験を行った。

3.3 実験方法

被験者は普段眼鏡やコンタクトレンズの矯正器具を着用している場合はその矯正器具を着用し、本人にとってもっともよく見える状態で行った。図 4 は実験風景を示す。右眼、左眼を別々に計測するため、被験者は自身の片手で計測する反対の眼を覆い、もう一方の手で画面の操作を行った。実験中に質問等がある場合は、実験補助者が対応した。

具体的な操作は、被験者は画面に表示されているひらがなの文字が認識できた場合は画面上の○ボタンを、認識で



図 4 計測風景.

Fig. 4 Measurement scene.

きなかった場合は×ボタンを押すことで、設定された彩度ごとの明度を青色弁別閾値として取得した。始めは右眼から計測し次に左眼を計測した。時間制限は設けておらず、被験者のペースで行った。

3.4 視覚関連 QOL の調査

QOL 調査は、先述した NEI VFQ-25 を使用し、高齢者に対して行った。今回の VFQ-25 の調査で得られた結果は、専用のスコアリング方法に基づいて得点計算を行った。各項目は高い得点ほどより良い状態の QOL を表すように得点化され、調査方法は紙によるアンケート形式で、青色コントラスト感度計測と同時に行った。

4. 結 果

4.1 青色コントラスト感度の計測結果

彩度と明度の関係について、若年者および高齢者の結果の一例を図 5、図 6 に示す。

被験者は、片眼ずつ左右の眼のデータを取得しているため、若年者 20 眼、高齢者 34 眼となった。図 7 に高齢者、若年者の彩度別の明度の平均値を示す。

若年者群と高齢者群の間で青色コントラスト感度に対して Welch の t 検定を行ったところ、棄却率 5% で有意差が認められた。また、若年者群と高齢者群の間で各彩度での明度の値に対して Welch の t 検定を行ったところ、全彩度において棄却率 5% で有意差が認められた。

4.2 青色コントラスト感度と QOL の相関関係

青色コントラスト感度と VFQ-25 の下位尺度の相関係数を表 2 に示す。青色コントラスト感度と VFQ-25 の下位尺度の間には役割機能 (Role Limitations) および自立 (Dependency) において、弱い負の相関がみられた。

5. 考 察

5.1 市販タブレット端末の利用について

本実験においてもっとも懸念されたのが、市販のタブレット端末が、システム上で設定した同じ「色」を表現し

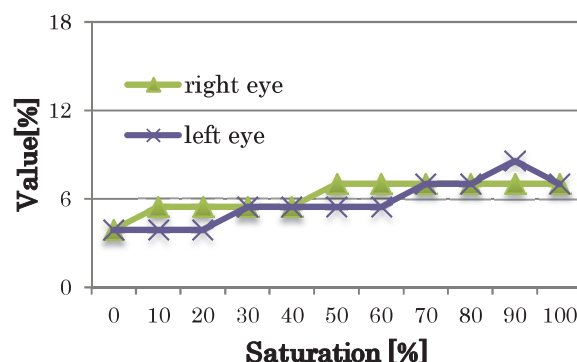


図 5 ある若年者の測定結果.

Fig. 5 An example of results from young people.

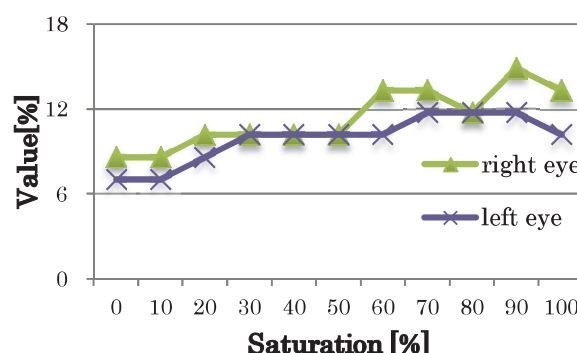


図 6 ある高齢者の測定結果.

Fig. 6 An example of results from elderly people.

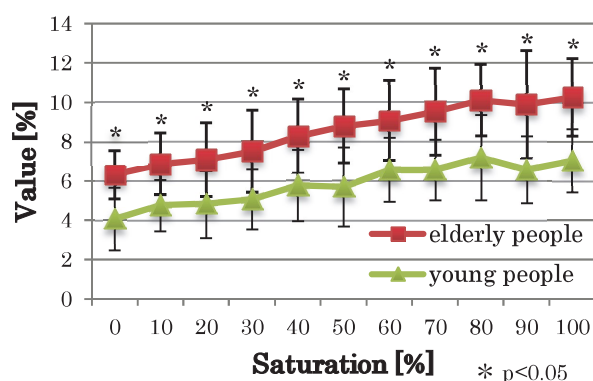


図 7 若年者と高齢者の彩度と明度の関係.

Fig. 7 Relationship between value and saturation in elderly people and young people.

ているのか、ということである。これについては、色彩輝度計 (BM-7, トプコンテクノハウス社製) を用いて、二台の iPad について計測を行った。結果については、色彩輝度計が示す Yxy 値と iPad が表示した色そのものには違いあるものの、iPad 間の表示色そのものにはほとんど差が無く、相対的にはほとんど同条件とみなすことができると考えられた。目視の上では他の iPad についても同条件での発色の違いはほとんど見られなかったが、iPad のモ

表2 VFQ-25 の下位尺度および青色コントラスト感度の相関係数.

Table 2 Correlation coefficient between blue contrast sensitivity and VFQ-25 subscales.

	BCS	GH	GV	OP	NV	DV	SF	MH	RL	DP	DR	CV	PV
Blue contrast sensitivity (BCS)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
General health (GH)	-0.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
General vision (GV)	-0.23	0.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ocular pain (OP)	-0.14	0.44	0.70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Near vision (NV)	-0.26	0.30	0.36	0.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Distance vision (DV)	-0.28	0.42	0.58	0.80	0.72	—	—	—	—	—	—	—	—
Social function (SF)	-0.11	0.57	0.64	0.57	0.48	0.73	—	—	—	—	—	—	—
Mental health (MH)	-0.25	0.61	0.72	0.69	0.61	0.75	0.77	—	—	—	—	—	—
Role limitations (RL)	-0.41	0.47	0.56	0.51	0.73	0.71	0.84	0.76	—	—	—	—	—
Dependency (DP)	-0.31	0.61	0.63	0.32	0.52	0.36	0.50	0.77	0.61	—	—	—	—
Driving (DR)	0.01	0.42	0.47	0.40	0.36	0.36	0.55	0.26	0.45	0.20	—	—	—
Color vision (CV)	-0.20	0.20	0.42	0.16	0.54	0.34	0.53	0.40	0.50	0.53	0.57	—	—
Peripheral vision (PV)	-0.22	0.54	0.65	0.70	0.57	0.75	0.90	0.81	0.89	0.53	0.57	0.55	—
Total score (TS)	-0.25	0.56	0.76	0.81	0.77	0.90	0.84	0.91	0.91	0.75	0.49	0.54	0.89

デルそのものの違い (iPad3 や iPad mini) とは明らかに発色が異なるため, 同一モデルによる計測が必要だと思われる. また, 複数のモデルや iPad 以外のタブレットに展開する場合は, 同一被験者からの計測値によってキャリブレーションを行う必要があると思われる.

5.2 計測結果について

本研究は, 加齢による眼の器質的变化によって水晶体の混濁が起これ, これによって短波長域の吸収が起これという眼光学的変化が予測されていたことに基づく. その結果として, 加齢に伴い青色コントラスト感度の低下が起これのではないかと, という仮説に基づいて行った. 結果は, 各被験者の全彩度における明度の平均値を若年者群と高齢者群に分けてみると, 若年者と高齢者に有意に差があることがわかった. しかし, 彩度 0% の場合など, 青系色を発色させているとは言えない表色においても, 有意な差があった. このことは, 短波長領域の光である青系色は水晶体の混濁によって吸収されることは明らかではあるものの, 加齢による視機能の低下という観点では, 明度差がより端的に結果に影響したと思われる.

5.3 青色コントラスト感度と QOL について

青色コントラスト感度と QOL との関係については, 青色コントラスト感度は役割機能 (Role Limitations) および自立 (Dependency) において弱い負の相関が認められたが, その他の下位尺度について相関は認められなかった. これは, そもそも今回の被験者の視機能自体が, 年齢および個人で差はあるものの, 日常生活に問題はなかったためと考えられる. しかし, 今回の調査結果および青色コントラスト感度と視機能に関する QOL との間の相関関係

から, 一般的に健康と言われる人においても QOL には差があり, かつ青色コントラスト感度は QOL の低下を計測できる可能性があると考えられる. もっとも, 水晶体の混濁が進行すると一般的には白内障と診断され, 症状が進行している場合には手術適応となり, その場合青色コントラスト感度はより低くなることが示唆される. この場合, 白内障の自覚症状から, QOL の低下が認められるのは明らか[11]なため, 白内障患者では QOL との関係がより顕著に現れることが予測される. 今後白内障患者を対象とした実験を行うことができれば, 白内障の治療適応について簡易に診断できるツールとして発展させることも期待できる.

6. おわりに

青色コントラスト感度の低下は, 加齢による水晶体混濁を間接的に計測可能なことが示唆された. また, 青色コントラスト感度を簡易に計測できるタブレット上で稼働するシステムを構築した結果, 視機能の評価を行うことが可能になった.

利益相反 日本生体医工学会の投稿規定の基準による利益相反はない.

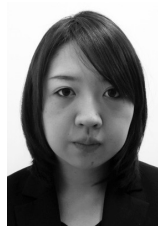
文 献

1. 公益財団法人日本医療機能評価機構: 医療情報サービス Minds. <http://minds.jcqh.or.jp/n/medical_user_main.php#>, [accessed January 2nd 2014].
2. 木下茂: 標準眼科学. 医学書院, 東京, pp. 68-71, 2013.

3. 坪田一男, 大鹿哲郎: 眼科学. 南山堂, 東京, pp. 17-18, 2012.
4. 帝京大学: 水晶体の病変. <<http://www.med.teikyo-u.ac.jp/~ortho/med/dis/dis1/cat.htm>>, [accessed January 2nd, 2014].
5. 岡部正隆, 伊藤啓: 色覚の多様性と色覚バリアフリーなプレゼンテーション. 細胞工学, **21**(8), pp. 909-930, 2002.
6. 坂本保夫: 水晶体の光透過特性. 視覚の科学, **15**(4), pp. 198-205, 1994.
7. 藤田徹也: 白内障視環境下における HSV 色光に対する色覚特性. 富山大学芸術文化学部紀要, **3**, pp. 102-115, 2009.
8. 桜井理紗, 山下和彦: 白内障の視認性に基づいたスクリーニング効果の評価. 日本生体医工学会大会予稿集, (CD-ROM), 日本生体医工学会, 2012.
9. 望月理香: 色弁別閾値に基づく個人特徴に対応できる色弱者補正法の提案. 第 23 回先端技術大賞受賞論文, <<http://www.fbi-award.jp/sentan/jusyou/2009/index.html>>, [accessed January 2nd, 2014].
10. Suzukamo Y, Oshika T, et al.: Psychometric properties of the 25-item National Eye Institute Visual Function Questionnaire (NEI VFQ-25), Japanese version. Health and Quality of Life Outcomes, **3**(65), 2005.
11. 田倉智之, 大鹿哲郎, 三宅謙作, 小沢忠彦, 山下英俊: 医療費原価と患者効用値による白内障手術の社会経済的な評価研究. 眼科手術, **22**, pp. 67-76, 2009.

桜井 理紗 (サクライ リサ)

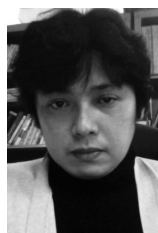
2012 年東京医療保健大学医療保健学部医療情報学科卒業. 2014 年兵庫県立大学大学院応用情報科学研究科応用情報科学専攻博士前期課程修了. 同年博士後期課程入学, 現在に至る. 医療情報学, ヘルスケア情報科学の研究に従事. 修士 (応用情報科学).



竹村 匡正 (タケムラ タダマサ)

1998 年大阪大学医学部保健学科卒業. 2003 年同医学系研究科博士課程修了. 同年京大病院医療情報部助手, 2007 年同講師, 2012 年ハーバード大学医学部客員研究員を経て, 2012 年兵庫県立大学大学院応用情報科学研究科准教授. 2014 年先端医療センター研究所客員上席研究員 (兼任). 現在に至る. 医療情報学, 病院情報システムの研究に従事.

日本医療情報学会, 日本生体医工学会等の会員. 博士 (保健学).



田村 寛 (タムラ ヒロシ)

1998 年京都大学医学部卒業. 1998 年神戸市立中央市民病院 (眼科), 2002 年京大病院助教 (眼科), 2006 年京都大学大学院医学研究科博士 (医学). 2008 年京大病院診療報酬センター助教. 2013 年ハーバード公衆衛生大学院修士 (疫学). 2013 年京大病院医療情報企画部運営企画室室長・准教授, 現在に至る. 眼科学, 病院管理学, 疫学, 医療経済学等の研究に従事.

日本眼科学会, 日本診療情報管理学会等の会員.



黒田 知宏 (クロダ トモヒロ)

1994 年京都大学工学部卒業. 1998 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了. 同年同助手. 2001 年京大病院講師. 2007 年阪大基礎工学研究科准教授, 2009 年京大病院准教授, 2013 年同医療情報企画部長・教授, 現在に至る. 仮想・強調現実感, 福祉情報学, 医療情報学, ウェアラブル・コンピューティング等の研究に従事.

IEEE, 日本生体医工学会, 日本 VR 医学会, 日本医療情報学会等の会員. 博士 (工学).



堀尾 裕幸 (ホリオ ヒロユキ)

1974 年大阪大学基礎工学部生物工学科卒業. 1981 年大阪大学基礎工学研究科後期課程満期退学, 工学博士 (大阪大学). 1982 年福島県立医科大学生理学第 2 講座助手. 1985 年国立循環器病センター研究所研究員. 2006 年兵庫県立大学大学院応用情報科学研究科教授, 現在に至る. 生体計測と医療情報に関する研究に従事.

日本生体医工学会, 日本医療情報学会, 電子情報通信学会, 周産期・新生児医学会, 母体胎児医学会の会員.

