博士論文　2010年度（平成22年度）

色覚異常者のQOL（Quality Of Life）を向上させる色覚ツール

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科

浅田　一憲

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
博士（メディアデザイン学）授与の要件として提出した博士論文である.

浅田　一憲

指導教員：

砂原　秀樹　教授	（主指導教員）
古川　享　教授	（副指導教員）
稲見　昌彦　教授	（副指導教員）

審査委員：

稲見　昌彦　教授	（主査）
砂原　秀樹　教授	（副査）
古川　享　教授	（副査）
中村　伊知哉　教授	（副査）
小林　光夫　電気通信大学名誉教授	（副査）

博士論文　2010年度（平成22年度）

色覚異常者のQOL（Quality Of Life）を向上させる色覚ツール

論文要旨

本研究では，色覚異常者の色の視認性や識別性を高める色変更手法を搭載した日常携帯可能な色覚補助ツールを開発し，公開することにより，色覚異常者のQOL（Quality Of Life）の向上に寄与することを目的とする．更に，正常色覚者がさまざまな色覚タイプの人の色の見えを体験することができる色覚体験ツールを開発し，公開することで，人々の色覚異常への理解を促進し，色覚異常者に優しい社会の構築のための一助となることを目指す．

色空間内に2色覚者の色射影面と平行な平面に挟まれる色ゾーンを設定し，その色ゾーン内の色を，その色が属する混同色線と離れた色にリアルタイムに変更することで，1型と2型の色覚異常者が色の視認性や識別性を高めるために有効な色変更手法を実現した．

また，この色変更手法を携帯機器上に搭載し，色空間上の一連の演算をGPU（Graphic Processing Unit）上で実行する実装上の工夫により，リアルタイムで動画像の色変更またはシミュレーションを行うことができる携帯可能な色覚補助ツールおよび色覚体験ツールを開発することができた．

色変更手法を搭載した色覚補助ツールは，携帯性，リアルタイム性，インタラクティブ性を同時に兼ね備えることにより，色覚異常者が日常生活の中のざまざまなシーンで活用して効果を得ることができる有用なツールとなった．

リアルタイムで色の視認性や識別性を高める色覚補助ツールと，リアルタイムで色覚シミュレーションが可能な色覚体験ツールを同時に公開することにより，正常色覚者と色覚異常者の双方が互いの色覚について理解を深める機会を提供することができた．

これらの結果から，提案した色変更手法，色覚補助ツールおよび色覚体験ツールは，色覚異常者のQOLを向上させる目的において，一定の効果を与えることができることが示唆された．

キーワード
色覚異常，色覚補助，色変更，シミュレーション，携帯可能，リアルタイム

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
浅田　一憲

Abstract of Doctoral Thesis Academic Year 2010

Color vision tools to improve quality of life of people with color vision deficiency

Summary

In order to improve quality of life (QOL) of people with color vision deficiency, versatile color vision assistance tools that they can use anywhere and anytime are required to be devised. We have developed such a portable real-time color vision assistance tool and a color vision experience tool (a defective color simulator of dichromat vision) which are compatible with the most commonly used digital gadgets.

A color changing method that changes colors in a color zone all at once is proposed. A color zone in a color space is segmented by parallel planes to the color projection plane of dichromat. Chromaticity or lightness of original colors are changed in the color zone. It was found that the color changing method is effective to improve discrimination and visibility for protanope, deuteranope, protanomaly and deuteranomaly.

The method is implemented on some portable devices. A series of calculations are performed on their GPU (Graphic Processing Unit) to increase speed of color changing.

Our experiments show that this device can be used as an effective color vision assistance tool with portability, real-time-ability and interactivity.

By distributing both our color vision assistance tool and our color vision experience tool at the same time, we were able to give people an opportunity of enhancing mutual understanding between people with color vision deficiency and people with normal color vision.

These results suggest that the color changing method, the color vision assistance tool and the color vision experience tool have a certain effectiveness in improving quality of life of people with color vision deficiency.

Keyword
color vision deficiency, color vison assistance, color change, simulation, portable, real-time

Graduate School of Media Design, Keio University
Kazunori Asada

目次

1. はじめに.....1
2. 背景.....5
2.1. 色覚異常の種類.....5
2.2. 色覚異常者の見え方.....7
2.3. 色の混同のメカニズム.....9
2.4. 2色覚者の色の知覚シミュレーション.....11
3. 関連研究・関連製品とサービス.....13
3.1. 色覚異常者向けの色変更手法.....13
3.2. 色覚異常者向けのデジタルツール.....14
3.3. 色覚異常者向けの携帯ツール.....16
3.4. カラーユニバーサルデザイン活動.....17
4. 目的.....18
4.1. 色覚補助ツール.....18
4.2. 色覚体験ツール.....19
5. 手法.....20
5.1. 色変更手法.....20
5.1.1. 色空間の設定.....21
5.1.2. 色ゾーンの決定法.....25
5.1.3. 混同色の変更法.....29
5.1.4. 色ゾーンのシフト法.....30
5.2. シミュレーション手法.....31
6. 実装.....33
6.1. 実装対象.....33
6.2. 高速化手法.....33
6.3. 色変更の方向と無変更域.....36
6.4. 色覚補助ツールのユーザインタフェイス.....37
6.5. 色覚体験ツールのユーザインタフェイス.....39

7. 公開 40
7.1. 色覚補助ツール「色のめがね」 40
7.2. 色覚体験ツール「色のシミュレータ・ウェブ版」 41
7.3. 色覚体験ツール「色のシミュレータ」 42
8. 実験と評価 43
8.1. 画像による効果の確認 43
8.1.1. 実験1：シミュレーション画像による実験 43
8.1.2. 実験2：色覚異常の被験者による実験 43
8.2. 色票による効果の確認 45
8.2.1. 実験3：カテゴリカルカラーへの分類 45
8.2.2. 実験4：混同色の弁別 48
8.2.3. 実験5：混同色と色名の関連づけ 51
8.3. モニター実験による所感 52
8.3.1. 色覚補助ツール 52
8.3.2. 色覚体験ツール 53
8.4. 関連研究・関連製品との比較 55
8.4.1. 色変更手法 55
8.4.2. 色覚補助ツール 56
8.4.3. 色覚体験ツール 57
9. 社会との関わり 58
9.1. ダウンロード数 58
9.2. 投稿されたレビュー 59
9.3. マスコミやネット上での紹介 62
9.4. 「CUD推進支援ツール」として推薦 64
10. 考察 65
10.1. 色変更手法 65
10.2. 色覚補助ツールと色覚体験ツール 68
10.3. 社会性 71
11. 結論 76

12. 今後の展望.....77
12.1. 機能・性能の向上.....77
12.1.1. 色弁別能力の向上.....77
12.1.2. ユーザインタフェイスの改善.....77
12.1.3. 色名の表示.....78
12.2. 対象ユーザの拡大と応用.....79
12.2.1. 異常3色覚の対応.....79
12.2.2. 後天色覚異常への対応.....79
12.2.3. 3型色覚異常と医学的弱視への対応.....79
12.2.4. 動作可能機器の拡大.....80
12.2.5. シミュレーションの応用.....80
12.3. 今後の抱負（本研究を振り返って）.....81
謝辞.....83
参考文献.....84
付録A. 新配カード199aの色.....87
付録B. 用語集と色度図.....89

図目次

図1　視覚系の構造.....1
図2　先天色覚異常の世界分布.....1
図3　白内障患者の見え方のイメージ.....3
図4　カラフルな東京の地下鉄路線図.....3
図5　色覚異常の見え方の例.....4
図6　眼の構造.....5
図7　オプシンの構造.....5
図8　標準観測者のS，M，L-錐体の受光感度.....6
図9　SMLオプシン遺伝子がある染色体（上）と構造（下）.....6
図10　色覚異常の遺伝.....6
図11　スペクトル光の色知覚.....7
図12　1型色覚，2型色覚共に混同しやすい色の例.....7
図13　色覚異常の見え方の例.....8
図14　*xy*色度図上の混同色線.....9
図15　各色空間における1型色覚の混同色線（赤線）.....10
図16　Brettelらの2色覚シミュレーション.....11
図17　Viénotらの2色覚シミュレーション.....11
図18　各色空間における1型色覚および2型色覚の色射影面.....12
図19　カテゴリカルカラー.....14
図20　富士通の色を教えてくれるケータイ ColorAttendant.....14
図21　色覚異常者向けの携帯ツールの例.....16
図22　特定非営利活動法人Color Universal Design Organizationが提唱するカラーユニバーサルデザイン推奨配色セット.....17
図23　特定非営利活動法人Color Universal Design Organizationの認証マーク.....17
図24　色覚異常者が日常生活の中で色に関して不便さを感じる場面の例.....18
図25　一般に標的物は画像内の連続した領域において類似した色を持つ.....20

図26　本論文で扱う色空間と各空間間の変換法.....21
図27　LMS空間上での色射影面と色ゾーン 25
図28　*u'v'*色度図上での色ゾーン分割.....28
図29　色度一定・明度変更法 29
図30　明度一定・色度変更法 29
図31　色変更手法とシミュレーション手法を実装した携帯機器.....34
図32　色覚シミュレーションにおける1ピクセルあたりの主な手順と演算 34
図33　色変更における1ピクセルあたりの主な手順と演算 35
図34　GPUのアーキテクチャの一例 35
図35　色変更の方向 36
図36　色覚補助ツールのユーザインタフェイス.....38
図37　色覚体験ツールのユーザインタフェイス.....39
図38　色覚補助ツール「色のめがね」 40
図39　色覚補助ツール「色のめがね」のウェブサイトと関連URL.....40
図40　色覚体験ツール「色のシミュレータ・ウェブ版」 41
図41　色覚体験ツール「色のシミュレータ」 42
図42　色覚体験ツール「色のシミュレータ」のウェブサイトと関連URL.....42
図43　実験1，実験2で使用した石原式色覚検査表の画像 44
図44　実験1，実験2で使用した花壇の花の画像 44
図45　実験3，4，5で使用した色票.....46
図46　実験4で使用した実験用紙 50
図47　色覚補助ツールと色覚体験ツールのダウンロード数 58
図48　マスコミでの紹介例.....63
図49　拝領したCUD推進支援ツール推薦状.....64
図50　ユーザが通勤路で発見した路面の消えかけた煙草禁止のマーク 74
図51　色の3属性による表示と系統色名の関係 78
付図1　xy色度図 92
付図2　*u'v'*色度図 92

表目次

表1　人種別の色覚異常の出現頻度（男性）.....1
表2　日本眼科学会が定めている色覚関連用語（抜粋）.....2
表3　日本における色覚異常の出現頻度（男性）.....5
表4　ヨーロッパ男性の1型と2型色覚の全男性人口に対する割合.....5
表5　これまでに提案された色覚異常者向けの色変更手法の例.....13
表6　色覚関係のデジタルツールの主なもの 15
表7　実験3で使用した色票とカテゴリカルカラーへの分類. 46
表8　実験3の結果 47
表9　実験4で使用した混同色対 49
表10　実験4の結果 50
表11　実験5の結果 51
表12　色覚補助ツールのモニター実験で得られた所感（抜粋）.....52
表13　色覚体験ツールのモニター実験で得られた所感（抜粋）.....54
表14　色変更手法の関連研究との比較.....55
表15　色覚補助ツールの関連製品との比較 56
表16　色覚体験ツールの関連製品との比較 57
表17　iTunes Storeで「色のめがね」に寄せられたユーザレビュー.....59
表18　iTunes Storeで「色のミュレータ」に寄せられたユーザレビュー 61
表19　本研究に関する紹介記事（抜粋） 62
付表1　実験で使用した「新配カード199a」の色.....87
付表2　本論文中で使用している色彩関連用語（主なもの） 89

1. はじめに

赤と緑の区別がつきにくい，こい赤が見えにくいなど，色覚に特徴がある人は多く，日本人男性では約20人に1人が先天色覚異常を持ち，65歳以上の高齢者の20人に1人以上が後天色覚異常を持っている．一方，印刷技術・電子技術の発展により，紙やプラスチック，電子ディスプレイ上で綺麗な色が安価に表現できるようになったため，私たちの日常生活には以前に比べて多くの色があふれ，色を利用したコミュニケーションも頻繁に行われるようになった．それに伴い，色覚異常者が不便な思いをする機会も増加してきている．

多くの人間は，さまざまな行動において，五感のひとつである視覚から得られる情報を頻繁に活用しており，視覚は人間が知覚する感覚の中でも特に重要性が高いと言うことができる．視覚の一部として色を感じる色覚があるが，人間は，眼から入ってきた光を体内の化学反応によって感知し，それを合成して得られる電気信号に基づいて脳によって色を感じているため，その感じ方は全員が同じではなく，個人差がある（図1）．

中でも，特定の色が見えにくかったり，ある色が他の色と同じに見える視覚特性である色覚異常は，両親から受け継いだ遺伝子が原因となっていることが多く，その特性も保有する遺伝子のタイプに依存している．このような色覚異常の出現頻度は，日本人男性の約5%，日本人女性では約0.2%であり，日本人全体では300万人以上になる[1]．黄色人男性全体ではほぼ同じく約4〜5%，白人男性は更に多く約6〜8%，アフリカ系アメリカ人男性が約3.5%，アフリカ人男性では約2.5%であり[4]（表1），世界中に広く分布している（図2）．

なお，色覚異常と同じような意味で使用される呼称として，色覚障害，色盲，色弱などがあるが，本論文では日本眼科学会が定め医学系の学会において統一的に使用されている学術用語の「色覚異常」を使用し，他の色覚関連用語も同様とする[5]（表2）．

また，そのような遺伝的な特性を持たない人であっても，老化によって眼の水晶体が濁ったり着色したりするなどの理由で，後天的な色覚異常が現れる場合がある．歳を取るにつれて色の見え方が変わった，物がよく見えなくなったなどの症状はほぼ万人に現れるが，それらは白内障の症状であることが多い（図3）．2008年の国内の白内障の総患者数は約91万7千人（2005年は約128万8千人）[6,7]で，そ

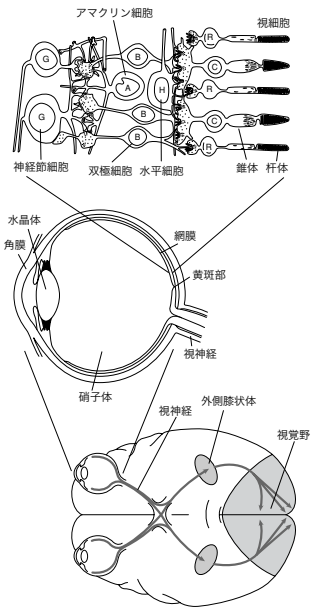


図1　視覚系の構造[2].

表1　人種別の色覚異常の出現頻度（男性）[4].

人種	頻度 (%)
白人	6〜8%
黄色人	4〜5%
アフリカ系アメリカ人	3.5%
アフリカ人	2.5%
ネイティブアメリカン	2%以下

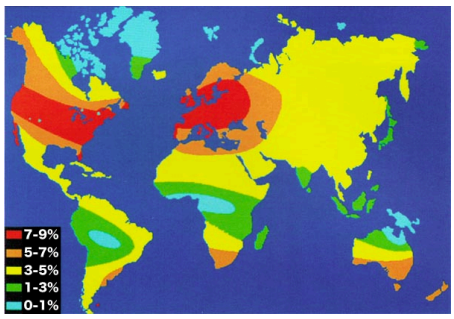


図2　先天色覚異常の世界分布[8].

の多くを老人が占め，65歳以上では5%以上の人が白内障の疾患を持っている．

これら先天的，後天的の両方を合わせると，色覚異常者の数は日本人だけでも400万人以上に上ると考えられ，一般にイメージされているであろう数よりもかなり多いことがわかる．同様の傾向は世界中の国や地域でも見ることができ，世界には多くの色覚異常者が存在する．

色覚異常は，それを指し示す用語の中に「異常」や「障害」という言葉が使われることがあるが，該当する人の比率の高さから，AB型の血液型の人や近眼や乱視などで眼鏡をかけている人と同じように，その人の特徴や特性であると捉えることができ，「色覚に特徴がある人」と呼称する方が適切だという意見や，他の適切な用語を使用するべきという意見もある．色覚関連用語として何をどのように使用するかは，それらの用語を使用して呼称されることが多い色覚異常者にとってはセンシティブな問題であり，多くの議論が存在する．

表2　日本眼科学会が定めている色覚関連用語（抜粋）[5].

色覚	color vision, color sense	1型3色覚	protanomaly
正常色覚	normal color vision	2型3色覚	deuteranomaly
3色覚	normal trichromatism	3型3色覚	tritanomaly
長波長感受性錐体 (L-錐体)	long wave sensitive cone	1型色覚	protan defect
中波長感受性錐体 (M-錐体)	middle wave sensitive cone	2型色覚	deutan defect
短波長感受性錐体 (S-錐体)	short wave sensitive cone	3型色覚	tritan defect
色覚異常	color vision defect, color anomaly	1型色覚者	protan
先天色覚異常	congenital color vison defect	1型2色覚者	protanope
後天色覚異常	acquired color vision defect	1型3色覚者	protanomal
1色覚	achromatopsia, monochromatism	2型色覚者	deutan
2色覚	dichromatism, color blindness	2型2色覚者	deuteranope
1型2色覚	protanopia, red color blindness	2型3色覚者	deuteranomal
2型2色覚	deuteranopia, green color blindness	3型色覚者	tritan
3型2色覚	tritanopia, blue color blindness	3型2色覚者	tritanope
異常3色覚	anomalous trichromatism	3型3色覚者	tritanomal

このように多くの色覚異常者が存在する一方で，近年，印刷技術や情報通信技術の発展によって手軽に色を表現できるようになり，カラフルな看板や出版物，パソコンやデジタルサイネージを使ったプレゼンテーションなど，色を多く使用した画像や映像情報が多く見られるようになってきた．このようにコミュニケーションの手段として色を利用することは，単調なモノクロームのみ使用する場合に比べて，見る者の目を引き，訴求効果が高く，わかりやすいというメリットがある（図4）．

しかし，受け手が色覚異常者だった場合，同じものを見ても，使用されている色の種類や組み合わせによっては，正常色覚者と比べて少ない情報量しか得ることができない．逆に，コミュニケーションを色に依存している場合は，却って伝えるべき情報が伝わらないという問題が発生する．そして，そのレス・コミュニケーションは，生活する上でのさまざまな不便さの原因となる．近視の人が眼鏡やコンタクトレンズを使用したり，老眼の人がルーペや虫眼鏡を使用するのと同じように，色覚異常者が簡単に，そして手軽に使用できる道具の存在が求められている．

また，色彩は人間の感情にもさまざまな影響を及ぼしている．綺麗な色の絵を見ると感動したり，冷たさや暖かさ，安らぎや情熱を感じる．家庭の食卓やレストランの照明には，白色の蛍光灯ではなく電球色を使用した方が食べ物がおいしく見えることはよく知られている．近視の人が人物の顔や風景がぼやけて見えることを当たり前だと思っているのと同じように，色覚異常者は生まれながらにしてその人の色の見え方に慣れているので，日常見える色を当たり前だと思いつつ生活をしている．綺麗な花の存在そのものに気付かないこともある（図5）．

近視や老眼の人にとっての眼鏡と同じように使用することのできる色覚補助ツールがあれば，知覚することができる色の世界が大きく広がり，これまでに感じたことがない新たな感情の発生や，感情の変化が得られるかもしれない．例えば，1型2色覚者にとって，こい赤は黒と混同しやすいので，マグロの赤身の刺身や生の牛肉は少しもおいしそうに見えないかもしれない．しかし，色覚補助ツールを使ってそれらを見れば，おいしそうに見え，そして実際においしく感じることがあるかもしれない．そのように生まれ持った色覚を拡張することによって，これまでに見えなかった物を見，感じてこなかったことを感じ，その結果として豊かな感情を引き出すことができる可能性がある．

色覚異常は，色の知覚が脳内で行われるため，その原因の解明は難しく，まだ詳細なメカニズムが判明していない．また，自分とは違う色覚的特徴を持つ人たちはどのように見

図3　白内障患者の見え方のイメージ[2]．左：オリジナル画像．右：シミュレーションによって白内障の見え方を再現したもの．水晶体の着色により青の透過率が減少するなどし，暗く赤茶けて見える．

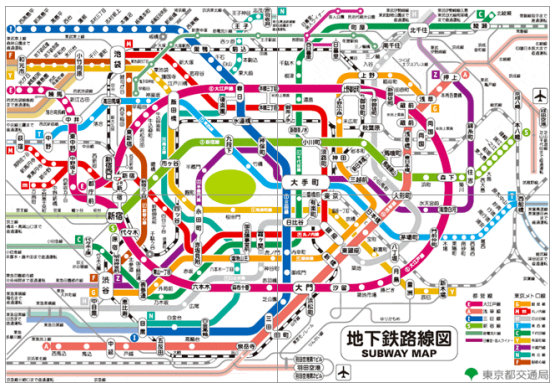


図4　カラフルな東京の地下鉄路線図．
http://www.metro.tokyo.jp/SUB/

えているのかを想像することは難しい．

猿は色覚異常を持つ割合が人間より少ないという．人間も，定住農作が行われる以前の狩猟や漁などで生活を支えていた時代は，素早く正確に獲物を見つけることが重要であったため， 色覚の差異や優劣は食料の獲得量に大きな影響を及ぼしていたと想像する．しかし，現代においては色覚の差が直ちに生命に関わるほどの大きな問題を引き起こす原因となることは少なくなったため，色覚への関心は薄れてしまっている．このような背景もあり，社会的マイノリティとはいえ世界各地において共通して一定の人口割合を占める色覚異常者は，それほど深い理解やケアをされているとは言えない状況となっている．

多くの人が幸せに快適に暮らすことができる社会を作るためには，社会的マイノリティを皆で支えることが必要である．自分も明日突然その人たちと同じようになるかもしれないし，自分の子供がそのような特性をもって生まれてくるかもしれない．社会の一員として生きている以上，一人一人が何らかの形でそのような社会を作り維持するためのコストを負担し，貢献をしなければならない．そのためにはさまざまな方法があるが，色覚異常者への理解を深め，彼らが抱えている問題を解決し，また彼らが見る色の世界を広げ，QOL（Quality of Life）を向上させることができる理論やツールの研究を進めることでそのような社会の実現のために貢献したい．そのような考えから本研究を行うこととした．

本論文では，先天的に色覚異常を持つ人々に向けて，色の視認性や弁別性を高める色変更手法と，それを搭載した日常生活の中で使用可能な色覚補助ツール，および主に正常色覚者が色覚異常者の色の見えを体験し，色覚異常への理解を深めるための色覚体験ツールの開発と公開について述べる．

1章は序論である．2章では，色覚異常の起きるメカニズムや実際の色の見え方を通じて，本研究が解決を試みる問題の背景について説明する．3章では，先行研究や関連製品のレビューを通じて，本研究にて解決すべき課題を明確化し，4章で，それらを基に本研究で開発する理論，製品には何が必要とされるかを明確化する．5章では色の認識と弁別を可能にするための具体的な色変更手法について提案を行う．6章では色変更手法の実装法と色覚ツールの製品化について，7章では開発した色覚ツールの公開法について述べる．8章では提案手法と提案ツールについて有効性の評価を行う．9章では社会から得られたフィードバックを紹介し，10章では本研究全般について考察し，11章で結論を得る．それらを元に，今後本研究をどのように進めていくかについてを12章で述べる．

図5　色覚異常の見え方の例．右は左の画像の1型2色覚のシミュレーション画像．赤いサルビアの花が緑の葉と混同して見えにくい．

2. 背景

本研究の背景として，色覚異常の種類，見え方，原因とメカニズムなどの詳細を述べる．本論文に表記する色名は，特に記載がない限り，JIS Z 8102（物体の色名）[9]に従う．また，本論文中で表示する色は正確ではない．

2.1. 色覚異常の種類

人間の目には眼球内面の約2/3を覆う網膜 (retina) がある．網膜内の視細胞には，暗所で明暗のみを知覚する杆体 (rod)と，明所で特定の範囲の波長の光に対する感光性を持つ3種類の錐体 (cone) がある（図6）．3種類の錐体は，L-錐体，M-錐体，S-錐体と呼ばれ，それらはそれぞれ異なる視物質 (visual pigment) を蓄えている．オプシン (opsin, 図7) と呼ばれるタンパク質とビタミンA誘導体 (retinal) の複合体である視物質は，特定の範囲の波長の光が当たると化学反応をひきおこす．それが電気信号へと代わり，更に神経系で加工された上で脳に伝わって処理されることによって色が知覚される．正常色覚者は，3つの錐体の出力をすべて使用して色を知覚する3色覚である．

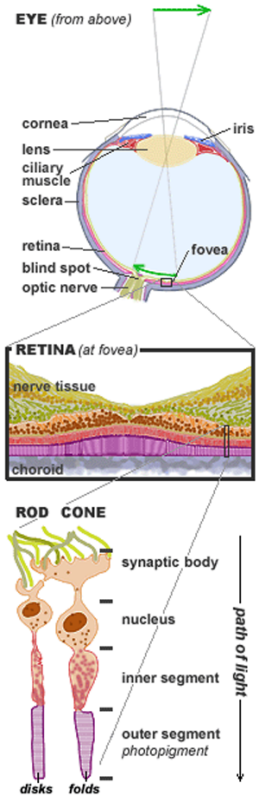


図6　眼の構造[10].

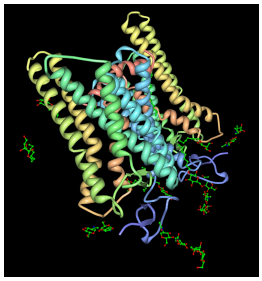


図7　オプシンの構造.

オプシンタンパク質を作る遺伝子が発現しなかったり，遺伝子の相同組換などにより視物質の分光吸収特性がずれるなどの異常によって正常な色覚が得らない場合に，2色覚や異常3色覚となる．L-錐体の赤オプシン遺伝子の変異によるものを1型2色覚，M-錐体の緑オプシン遺伝子の変異によるものを2型2色覚，S-錐体の青オプシン遺伝子の変異によるものを3型2色覚と呼ぶ[1,4,8].

日本人男性においては，先天色覚異常は全男性の約5%（表3）で，その内訳は，1型色覚が約1.5%，2型色覚が約3.5%，3型色覚は約0.001%となる[1,4]．ヨーロッパでもこの比率はさほど変わらず（表4），もっとも多い2型色覚が，次に多い1型色覚の約3倍存在する．つまり，M-錐体の遺伝子の異変による色覚異常が多い．

図8に示すように，L-錐体とM-錐体の受光スペクトルは大部分が

表3　日本における色覚異常の出現頻度（男性）[4].

報告者	検査地域	頻度 (%)
馬嶋 (1959)，Majimaら (1960)	静岡	5.05%
中島，馬嶋ら(1960)	静岡	4.71%
根本，村尾 (1961)	広島，長崎	4.39%
市川，馬嶋ら(1969)	利尻島	6.83%
市川，鳥井ら(1980)	名古屋	4.50%

表4　ヨーロッパ男性の1型と2型色覚の全男性人口に対する割合[11].

性別	異常3色覚		2色覚	
	1型	2型	1型	2型
男性	1.08%	4.63%	1.01%	1.27%
女性	0.03%	0.36%	0.02%	0.01%

重複しており，元は同じ遺伝子であったものが進化過程で分化したと考えられている．そのため，1型2色覚と2型2色覚が知覚する色はかなり似通っているが，1型2色覚は700nm以上の波長を持つこい赤が見えないことが大きく異なる点である．3種類の錐体には，それぞれ異なった周波数の光に反応する視物質が含まれているが，S-錐体にある青オプシンをコードする遺伝子は第7染色体に，L-錐体にある赤オプシンとM-錐体にある緑オプシンをコードする遺伝子はX染色体に存在する（図9）．

女性は，X染色体を2本持っているが，男性は1本しか持っていない．そのため，女性は両親のどちらから引き継がれたX染色体に異常があっても，もう片方のX染色体によって遺伝子の発現がなされ，視物質が生成される可能性が高い．その場合は色覚異常のキャリア（保因者）となり，子に遺伝子が引き継がれる可能性があるが，自身は色覚異常とはならない．女性に色覚異常者が少ないのはそのためである[2]（図10）．

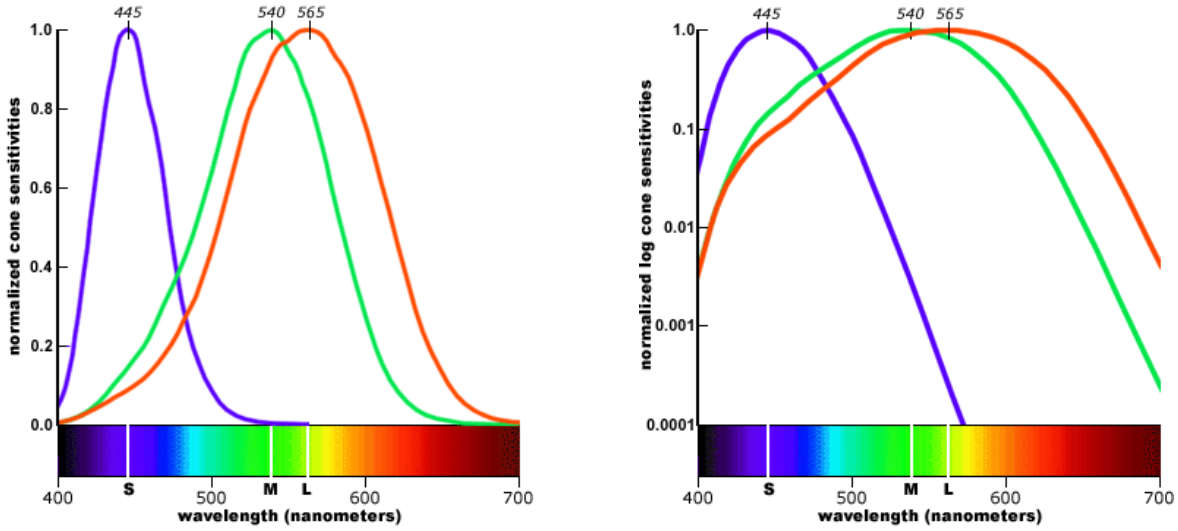


図8　標準観測者のS，M，L-錐体の受光感度[10]．青はS-錐体，緑はM-錐体，赤はL-錐体．右は縦軸を対数にしたもの．受光感度には個人差があることがわかっている．

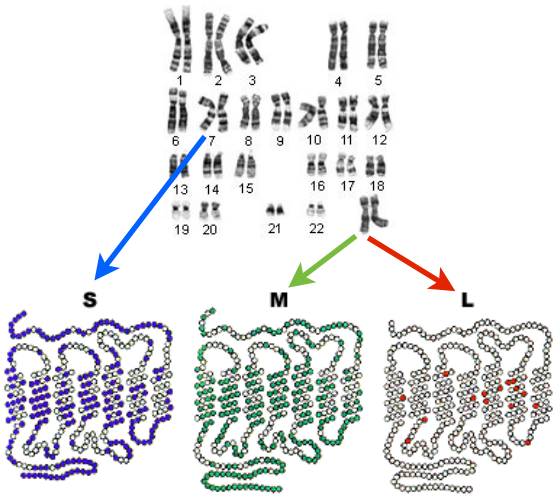


図9　SMLオプシン遺伝子がある染色体（上）と構造（下）．（文献[10]の図を改変）

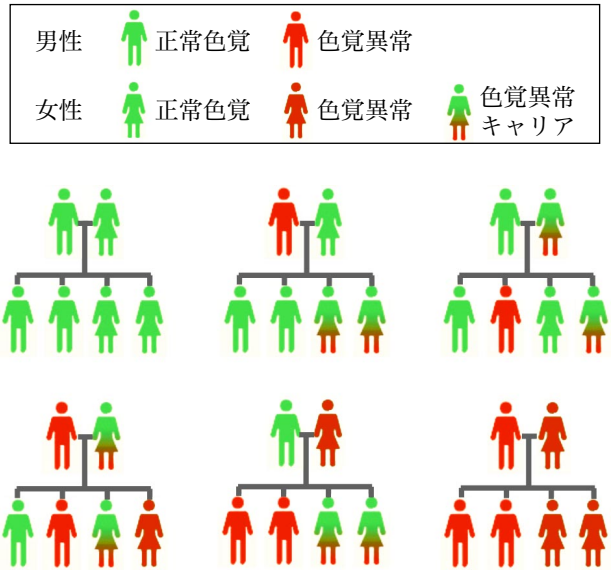


図10　色覚異常の遺伝．色覚異常キャリアの母を持つ子は色覚異常になる場合とならない場合がある．

2.2.　色覚異常者の見え方

色覚異常者はどのように色が見えるか，またどのような色の弁別特性を持っているかを考察する．正常色覚者が見えるスペクトル光の色を波長順に並べたものと，それをBrettelらの提案するシミュレーション手法[12]を用いた色覚体験ツールを使用して2色覚シミュレーション画像に変換したものを列記し，図11に示した．

- 1型2色覚
  青から緑の範囲の色は正常色覚と同様に微妙な色を認識することができる．
  青紫（420nm）付近を中心とした青～紫の領域はすべて青に見える．
  黄緑（545nm）付近を中心とした赤～緑の領域では左右の色が混同する．
  こい赤（720nm）付近より波長が長い色を見ることができず黒となる．

- 2型2色覚
  緑から青の範囲の色は正常色覚と同様に微妙な色を認識することができる．
  青紫（420nm）付近を中心とした青～紫の領域はすべて青に見える．
  黄緑（545nm）付近を中心とした赤～緑の領域では左右の色が混同する．

- 3型2色覚
  黄付近および青付近の領域の色が見分けにくい．
  緑付近およびうすい青付近の領域の色が見分けにくい．

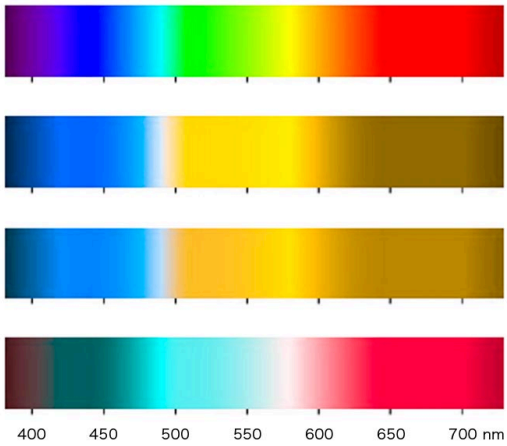


図11　スペクトル光の色知覚．スペクトル光の知覚色を波長順に並べた．上段：正常色覚，2段目：1型2色覚，3段目：2型2色覚，4段目：3型2色覚．

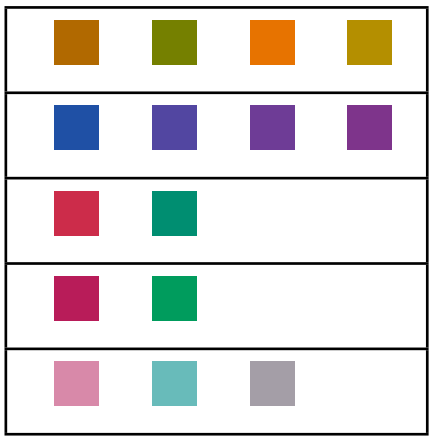


図12　1型色覚，2型色覚共に混同しやすい色の例．同じ段の色は混同しやすい．

1型2色覚および2型2色覚が見分けにくい色の組み合わせは無数にあるが，以下に一部の例を列挙する[13]．括弧内はPCCS（日本色研配色体系，Practical Color Co-ordinate System）[14]での色の表記である．

・明るい茶（dp6）－黄緑（dp10）－橙（v5）－濃い黄（dp8）
・青～紫（v19・v20・v21・ｖ22）
・赤と緑（1型：v2－v13，v3－v12，2型：v1－v12）
・ピンク（lt24）－水色（lt14・lt16）－灰色（Gy-6.5）

これらの色は同じ色味に見えるが，明度が異なれば見分けることができる．図12に上記の色の例を表示する．

図13は，シミュレーション手法を使用して2色覚者が見るであろう画像を作り，正常色覚者が見る画像と比較できるよう示した図である．正常色覚者はシミュレーション画像を見ることによって，正常色覚者と2色覚者は人工物においても自然物においてもかなり色の感じ方の差があること，2色覚者には周辺の色との組み合わせで見えにくいものがあることなどがわかる．

図13　色覚異常の見え方の例．上段がオリジナル．下段が2型2色覚のシミュレーション画像．左：牛肉，中央：シャツとネクタイ，右：緑の葉と赤い花．

2.3.　色の混同のメカニズム

3種類の錐体がすべて正常に機能している正常色覚者と異なり，2色覚者は2種類の錐体からの信号のみを使って色を認識している．そのため，正常色覚者が弁別することができるいくつもの色がすべて同じ色に見えてしまう．あるひとつの色と同じに見えてしまう色（混同色という）をすべて選び出し，それらをCIEXYZ表色系のxy色度図またはCIELUV表色系の$u'v'$色度図上に並べると一本の直線上に配置される．その直線は混同色線と呼ばれる [4,11,15]．他の色にも同様に多くの混同色があり，それらは別の混同直線を成す．

混同色線は，混同色中心と呼ばれる一点を交点として無数に存在する直線である．色度図上での混同色中心の座標や，混同色線の傾きは，色覚異常のタイプすなわちどの錐体の機能が失われているかによって異なっており，また，測定データによって異なることがある．

図14に示すように，混同色線は，xy色度図上でひとつの交点を持つ直線群となることは広く知られているが，それがどのような理由によるものかは解説している文献も少なく，あまり知られていない．2色覚では，1種類の錐体の機能が失われているが，それ以外の部分は正常色覚者と同様に機能している（神経やそれが脳に伝わる部分などは正常色覚者と同じ）と仮定すると，機能が失われた錐体が受ける刺激に関わらず，他の2種類の錐体が受ける刺激が等しい色ならば，それらはすべて同じ色へと知覚されることになる．3色覚者が3次元で色を見ているとすれば，2色覚者は2次元で色を見ていることになる．

したがって，混同色線は，錐体の刺激エネルギーを表すLMS空間内では機能が失われた錐体の軸と平行となる[16]．1型の混同色線はL軸と，2型はM軸と，3型はS軸と平行な直線であり，それぞれの色覚型の混同直線群も互いに平行となる．LMSとCIEXYZは線形変換可能であるので，混同色線はCIEXYZにおいても直線で，混同直線群も互いに平行を保つ[16]．色空間内のユークリッド距離を人の知覚となるべく合致させた均等色空間の代表的なものにCIELUVがある．混同色線は，CIELUVにおいてはやはり直線となるが，それぞれの混同直線はもはや平行ではない[16]．図15にそれぞれの色空間での混同色線を示す．xy，$u'v'$，LMS，CIEXYZおよびCIELUVの計算は5章で述べる式による．xy色度図上での混同色中心の座標は，LMSとCIEXYZの変換行列の違いにより，図14と図15では若干異なっている．

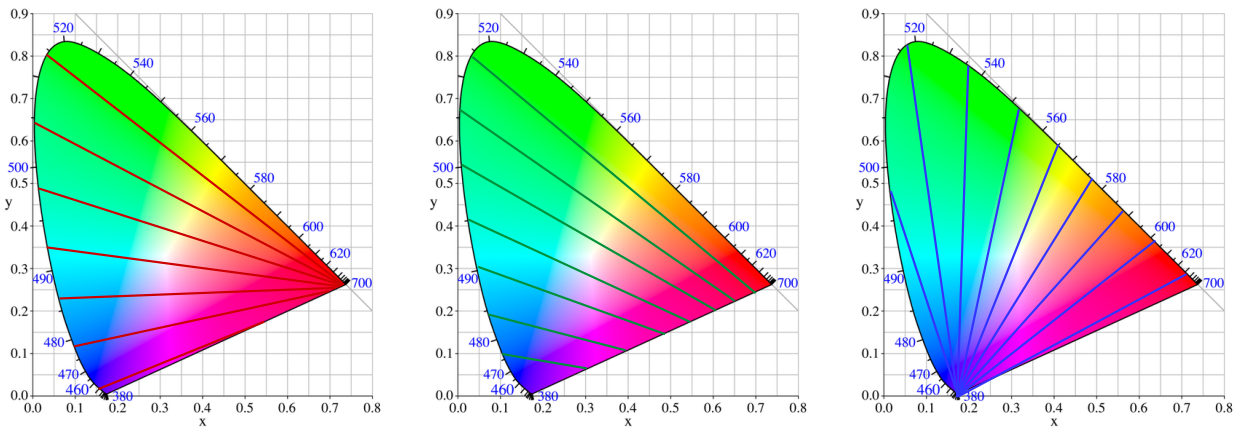
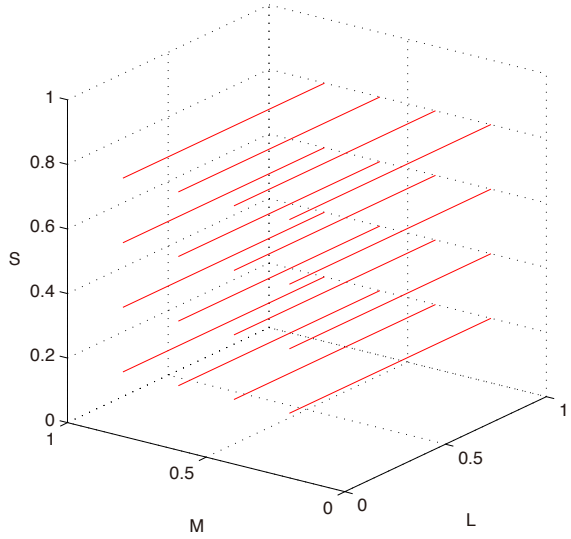
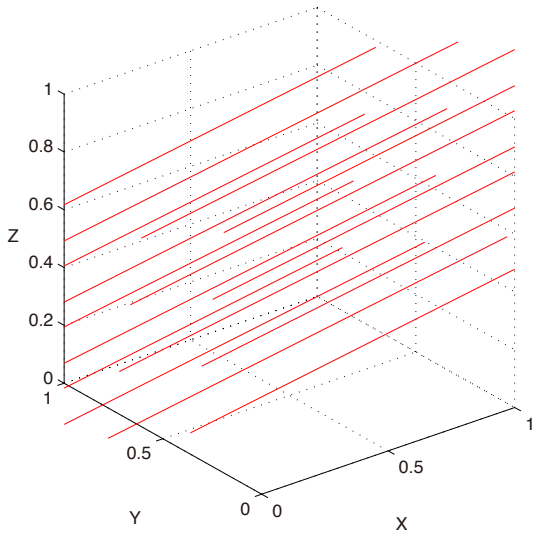


図14　xy色度図上の混同色線．混同色中心を交点とした直線群となる．左：1型色覚，赤線が混同色線．中央：2型色覚，緑線が混同色線．右：3型色覚，青線が混同色線．

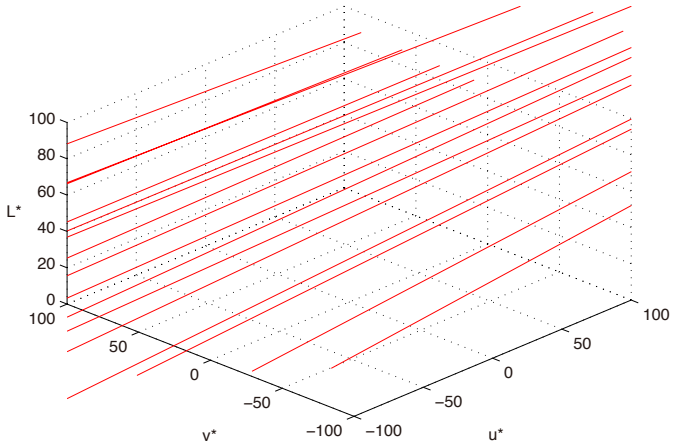
色覚異常者が特定の画像を見た場合，その画像中に混同色の組み合わせが存在するかどうかは，同一の混同色線上に異なる複数の色が存在するか否かを判定することにより検出が可能である．



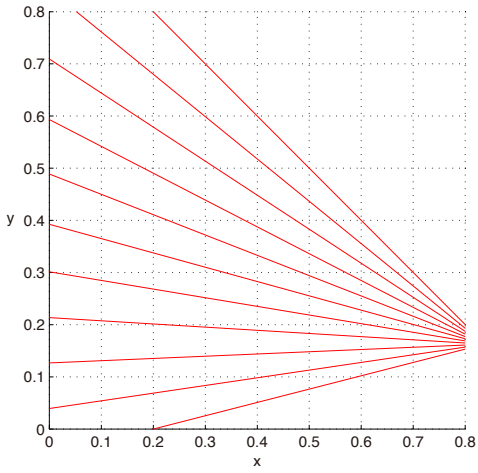
a)



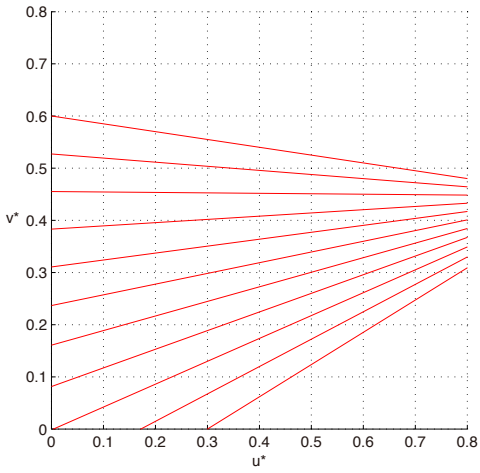
b)



c)



d)



e)

図15　各色空間における1型色覚の混同色線（赤線）．a) LMS空間，b) CIEXYZ空間，c) CIELUV空間，d) xy色度図，e) $u'v'$色度図．各色空間間の変換は5章で述べる式による．

2.4.　2色覚者の色の知覚シミュレーション

Brettelらは，1型および2型の2色覚者が知覚する色は，LMS空間の黒点（原点）と，LMSの3錐体の刺激が等しくかつ最大になる点（白色点）を結ぶ線分を含み，スペクトル色475nmの点（青）および575nmの点（黄）を通る折れ平面（以下「色射影面」と呼ぶ）上にあるとした[12]（図16）．これは，片眼が2色覚でもう片眼が3色覚の被験者実験で，これらのスペクトル光が両眼共に同じ色に見えたというJuddらの報告[17]などに基づいている．3型の2色覚者の場合は，475nmを660nm（赤）に，575nmを485nm（青緑）に置き換えた折れ平面となる．

正常色覚者の錐体刺激値を，それが属する混同色線（1型はL軸と平行，2型はM軸と平行，3型はS軸と平行な直線）に沿って色射影面上に射影した点が，2色覚者の知覚色となる．この色射影面は，2色覚者であっても，正常色覚者と同様な色として知覚することができる色の集合であるとも言うことができる．2色覚者は，可視色すべてをこの色射影面上の何れかの色として知覚していることになる．

Viénotらは，折れ平面である1型および2型の色射影面を，475nmの点の代わりにsRGBの青の刺激，575nmの代わりにsRGBの黄の刺激，黒の代わりにsRGBの黒の刺激，錐体の刺激が等しく最大になる点の代わりにsRGBの白の刺激を使用することによって，1平面に近似し簡素化した手法を提案している[18]（図17）．

色射影面は，LMS，CIEXYZ，CIELUVの各色空間において平面となる[16]．それぞれに色空間における色射影面を図18に示す．

これらの手法により，ひとつの色が与えられたとき，それを2色覚者がどのような色として知覚しているかを予測することが可能となる．

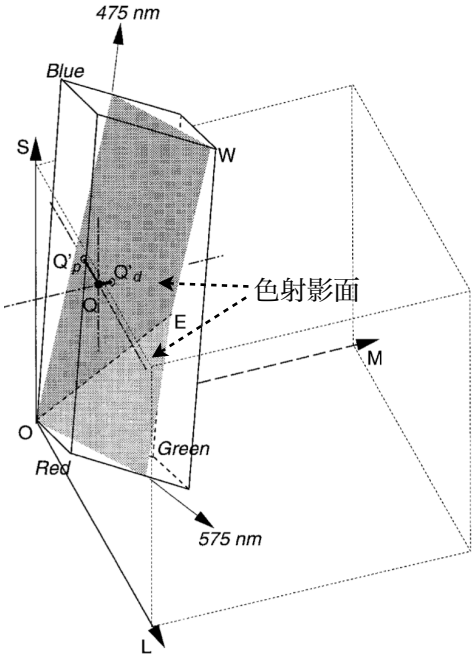


図16　Brettelらの2色覚シミュレーション[12]．EはLMSの3錐体の刺激が等しくかつ最大になる点．

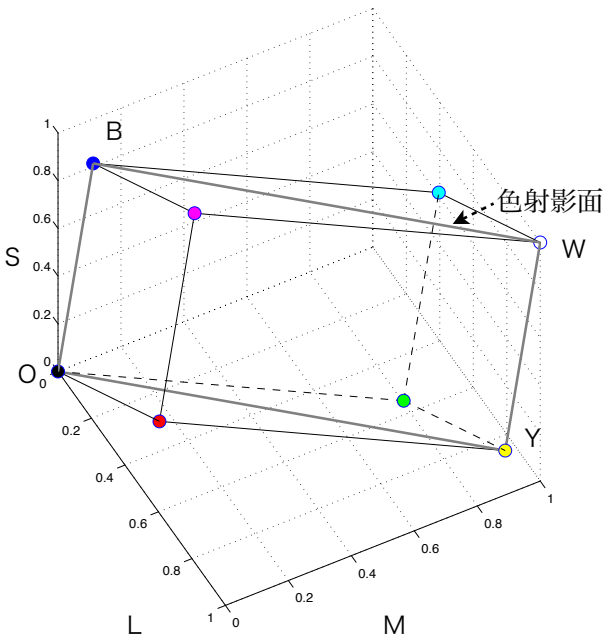


図17　Viénotらの2色覚シミュレーション．黒(O)，白(W)，青(B)，黄(Y)の刺激を含む1平面を色射影面とする．

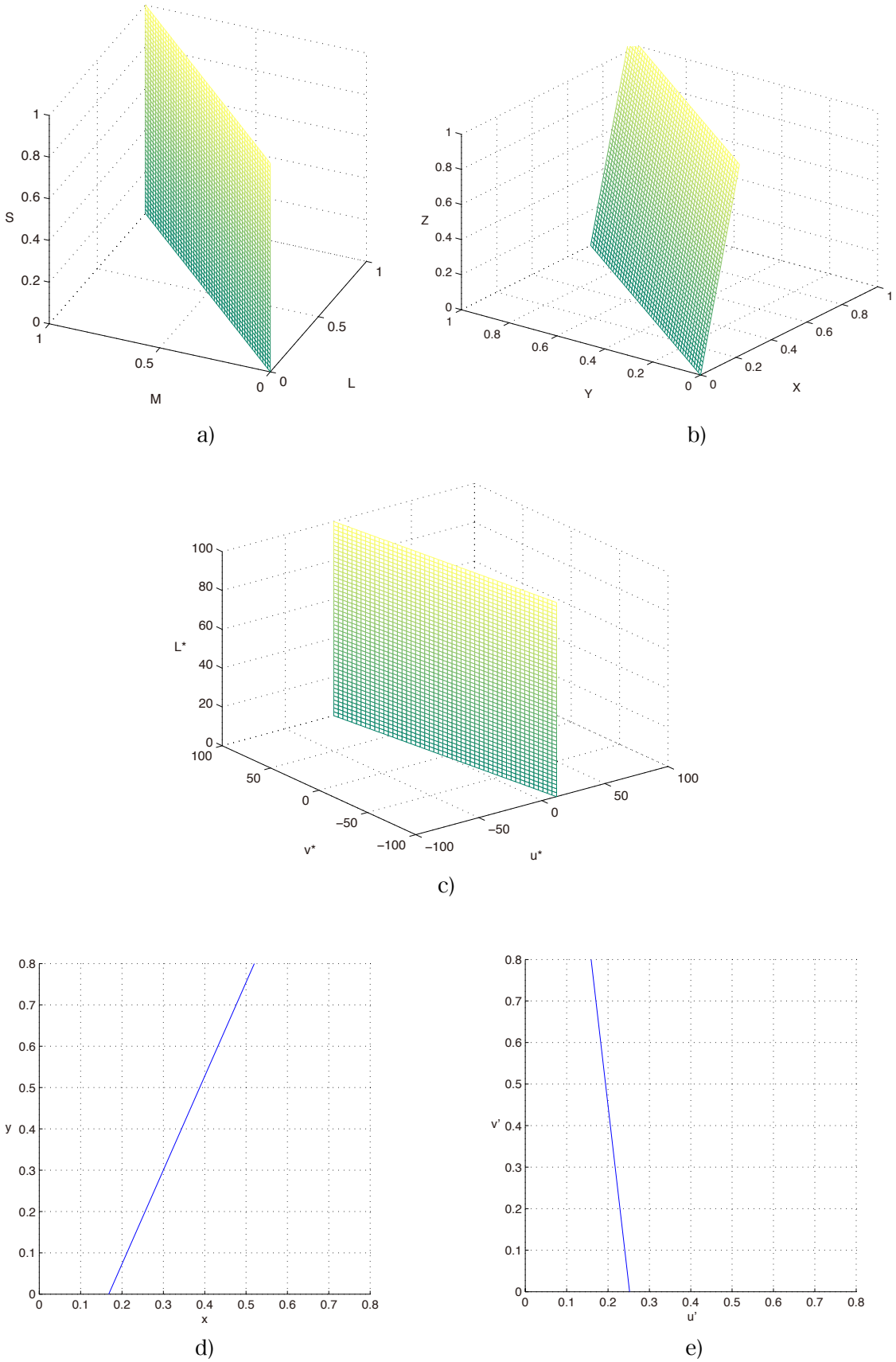


図18　各色空間における1型色覚および2型色覚の色射影面．a) LMS空間，b) CIEXYZ空間，c) CIELUV空間，d) xy色度図，e) $u'v'$色度図．各色空間間の変換は5章で述べる式による．

3. 関連研究・関連製品とサービス

色覚異常者の利便性を高めるための先行研究，製品やサービスについて述べる．

3.1. 色覚異常者向けの色変更手法

色覚異常者向けの色変更は，元画像の色の一部を変換し，色覚異常者が見やすいような新たな画像を作ることを目的としている．すべての色を色覚が正常な人と同様に弁別できるようにすることは不可能であるので，その画像を何のために見るのか，どのような場合に見えたらいいのかなどの目的を定め，その条件に適う色変更手法を検討することになる．見る対象が風景であるのか，それとも印刷物やプレゼンテーションであるのかなど対象物の種類，全体が把握できればいいのか，それとも画像中の何か特定の物を見分けることが重要なのかなどの目的，使用されている色の傾向などの要素によってさまざまな色変更手法が考えられる．

これまでに提案された色覚異常者向けの色変更手法の主なものを表5に紹介する．

Ichikawaら[19]はウェブページの色を色覚異常者に見やすい色に変更する手法について提案した．まず，ページの色領域の階層に分解し，それらの色空間上の位置関係により変更を行うべき色対を決定する．それぞれの色の変化を最小にしつつ色空間上の距離を一定以上に保つように色を変更する．これを遺伝的アルゴリズムを用いて実現した．この方法は，画像中で使用している色数が限定されている場合には向いているが，多くの色が使用されている場合は，一度色数を減らすなどの工夫が必要であり，自然物の写真などには向いていない．また色変更のために多くの計算量と時間が必要となる．

Rascheら[20,21]は，線形変換と非線形共役勾配法を使用して，カラーの画像をグレイスケールなどより次元の低い画像に変更する際に元画像の情報量をなるべく保つことができる手法を応用し，色覚異常者に見やすい画像への変更法を提案している．この手法は，自然物の写真など色数の多い画像にも有効で，外部よりパラメータを指定する必要がない．しかし，画像解析と変更には多大な時間がかかる上，一枚の色変更画像で多くの混同色が弁別可能になるとは限らない．

石田ら[22]は，シミュレーションにより元画像の2色覚者の見え方を求め，隣接する色が色覚異常者に見分けにくい色対を検出した上で，それらの色を黒，白，赤，緑，黄，青，茶，紫，ピンク，オレンジ，灰色の11個の基本カテゴリーに分類し（図19），同じカテゴリカルカラーの中に属する色でもっとも色差が大きくなる色を探し，その色に変更す

表5　これまでに提案された色覚異常者向けの色変更手法の例．

文献	内容
Ichikawaら (2003) [19]	遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) を使用して複数の色を弁別しやすい色の組み合わせに変える手法
Rascheら (2005) [20]	使用されている色を調べ線形変換と非線形共役勾配法によってダイナミックレンジを拡張する手法
Rascheら (2005) [21]	多次元尺度構成法 (MDS) に基づいた次元圧縮による色変換手法
石田ら (2010) [22]	CIELAB空間内から，同じ色カテゴリカルカラーに属する色を選択する方法

る手法を提案している．この手法は，人工物など色数が少ない画像では使用可能だが，色数が多いおよびグラデーションを多用する画像には向いていない．またひとつの色の変更によって新たな混同色を生み出してしまう可能性があるため，すべての変更を終えるのに時間がかかる．

これら先行研究においては，色数が限定された画像にしか向いていない，静止画にしか対応していない，パラメータの設定が複雑である，変換に時間がかかる，持ち運びに適していないなどの理由で，色覚異常者が日常生活で容易に使用することができる色覚補助ツールでの使用に適しているものは見られなかった．

3.2. 色覚異常者向けのデジタルツール

色覚異常者向けのツールでは，パソコンや携帯機器向けにいくつかのソフトウェアが有償または無償で公開されている（表6）．このうち「Color Oracle」，「配色」，「Color Vision tool」は色覚シミュレーション．「色の色の色」，「iSpectrum」，「GetColorAR」は文字にて色コードや色名の表示を行うソフトウェアである．このうち「iSpectrum」，「GetColorAR」，「ColorAttendant」は携帯機器上で動作する．

色覚異常者に見えやすい色に変更する機能を伴う製品は，「eyePilot」，「Daltonize」，「Color Blind Aid」の3つである．「eyePilot」はパソコン上に表示されているものに対する複合的な色覚ツールで，パソコン上での作業を行う際に限って色についての簡単な補助を行うことができるが，日常生活の中で使用するためのものではない．

「Daltonize」のアルゴリズムは論文として公開されていないが，ウェブ上にはその原理の説明がある．赤と緑の間の色相のコントラストを拡大し，青と黄の間の色相の輝度とコントラストを調整することによって色覚異常者が見やすい画像に変更する．これらのパラメータはユーザが設定する． 静止画にのみ対応しており，適切なパラメータが設定されれば見やすい画像が得られることもあるが，画像によっては混同色が解消できない．画像中の色の分布の傾向によって，適切なパラメータを設定するのが難しい．

iPhoneで動作する「Color Blind Aid」は，AR技術を使用してほぼリアルタイムで色を変更することができるツールである．携帯機器で動作し，リアルタイム性を持たせた初の製品であり，優れたコンセプトを持っている．携帯機器のカメラから取り込んだ静止画像

黒	白	赤
緑	黄	青
茶	紫	ピンク
オレンジ	灰色	

図19　カテゴリカルカラー．

図20　富士通の色を教えてくれるケータイ ColorAttendant. http://jp.fujitsu.com/about/design/ud/ca/ より引用.

を赤や緑の特定の色領域に属するすべての色を単色に塗りつぶし，動画像の合間に表示する．色領域の抽出は設定したパラメータに応じて2値により固定されるため，無数に存在する混同色を弁別できるわけではない．

富士通の携帯電話の一部に搭載されている「ColorAttendant」は，携帯電話のカメラで撮影した画像を元に，指定した部分の色名を表示し，更に音声で読み上げたり数値を色を表示することができる．色を知りたいときに一度対象を撮影しなければならず，また知りたい色の上にカーソルを合わせるのに時間がかかるなど若干の操作はあるものの，色覚異常者が持ち運びどこでも使用することができる優れたツールである（図20）．

表6　色覚関係のデジタルツールの主なもの．

ツール名	内容
Vischeck	画像編集ソフト PhotoShop またはウェブ上で，1型，2型，3型の色覚異常シミュレーションを行う．http://www.vischeck.com/
Color Oracle	パソコンのデスクトップ全体を，1型，2型，3型の色覚異常シミュレーションで表示する．http://colororacle.cartography.ch/
eyePilot	パソコン上のフローティングウィンドウ内で見えにくい色の変換を行う．http://colorhelper.com/
色の色の色	パソコンの画面に表示される文字や図形や写真の色の色名を表示する．http://www.hikarun.com/w/
ワッツカラー	パソコン画面上の任意の点の色を取得して，色コードを表示や色の調節を行う．http://www5a.biglobe.ne.jp/~dinah/dwothers/downcol.htm
Daltonize	赤緑方向のコントラスト，明度，色を変えることにより，1型，2型に見やすい画像に変換するソフトウェア．http://www.vischeck.com/daltonize/
配色	iPhoneの内蔵カメラで撮影した画像を変換し，1型，2型，3型とU型の色覚異常者の見え方をシミュレーションする．http://itunes.apple.com/jp/app/coloring/id327447422?mt=8
iSpectrum	iPhoneに保存またはカメラ撮影した画像の任意の場所の色の色名をスクリーンに表示する．http://itunes.apple.com/jp/app/id302957110?mt=8
GetColorAR	iPhoneの内蔵カメラの映像をタッチするとその場所の色の色コードを表示する．http://itunes.apple.com/jp/app/getcolorsar/id351136016?mt=8
Color Blind Aid	iPhoneの内蔵カメラの映像から定期的に静止画像を取り込み，赤と緑の色域を検出し青と黄に塗りつぶした静止画像を一定時間表示する．それを定期的に繰り返す．http://itunes.apple.com/jp/app/color-blind-aid/id351425486?mt=8
Color Vision tool	あらかじめ用意された10数枚の静止画像を，1型，2型，3型の2色覚，異常3色覚および1色覚の色覚異常のシミュレーションで表示する．http://www.idea.org/vision-demo.html
ColorAttendant	携帯電話のカメラを通じて撮影した画像の特定部分の色を色名や数値で表し，音声や文字でユーザに知らせるiアプリ．http://jp.fujitsu.com/about/design/ud/ca/

3.3.　色覚異常者向けの携帯ツール

色覚異常者が色を見分けるための，特殊な眼鏡やレンズなどの道具が商品化され，いくつか市販もされている[3]（図21）．

色覚補正レンズと呼ばれる商品は，特定の波長付近（赤など）の光の透過率のそのままに，他の色の透過率を下げる光学フィルタ機能を持つことにより，特定色を強調して見るためのレンズである．光学的なフィルタを使用しているため，光量を制限する方向にしか補正を行えず全体が暗くなる．また一枚のレンズでは特定色の強調ができるのみであり，多色を強調したければそれに合わせてたくさんのレンズを持たねばならない．また，特殊な構造である上，個人によって異なる色覚特性に合わせる必要があるためか高価である．

「カラートーク」という商品は，持ち運びができる測色器で，センサー部を何色か知りたい物体に当てスイッチを押すと，その部分の色名を音声にて読み上げる機能がある．色名はJIS規格を採用している．眼で見て色の識別ができなくても，その装置を当てることによって色を知ることができる．色覚異常者は，同じ色に見えてしまう複数の色を別の色としてみた経験がないので，それらが何色であるか色名がわからない．色名でコミュニケーションする場合などに有効なツールである．このツールも高価であり，色を知りたい物体にセンサーを直接当てる必要があるため，離れた物体や触ることができない物体などには使用できない．また，測色には時間がかかるため，多くの色を素早く知りたいときには向いていない．

非常に安価で小さく薄く持ち運びに便利であり，赤と緑の弁別に高い効果が高いのが，赤緑フィルターである．目的物の色が赤なのか緑なのかわからないときに，これを通して見る．赤フィルターをかざせば消えて，緑フィルターで消えなければその物体は赤であるというように，両フィルターを通して見たときの視差を利用して判定する．赤と緑の物しかわからないことと，光学フィルターなので全体が暗くなってしまうという欠点がある．この原理を利用した眼鏡型フィルターもある．

図21　色覚異常者向けの携帯ツールの例．
左：色名を読み上げる「カラートーク」，中央：赤緑フィルター，右：眼鏡型フィルター．

3.4.　カラーユニバーサルデザイン活動

色に関する不便さを解消しようと，さまざまな色覚の人に共通して十分な情報が伝えられるようにするための色の使い方やデザインに関する指針，いわゆるカラーユニバーサルデザインを啓蒙普及しようという社会活動が行われている[3,23,24]（図22）．これは，使用する色を万人に見やすい色に限定するなどの配色への配慮を行うことによって色覚異常者に優しい社会を作ろうとする活動である．熱心な活動が功を奏し，徐々に成果が上がってきており，公共の施設や交通機関，TV放送などは多くの色覚の人が見やすい色使いをするように変わってきた．しかし，まだまだ広く一般の人にまで理解され，普及しているとまでは言い難い．

カラーユニバーサルデザインの普及活動をしている団体のひとつに，特定非営利活動法人 Color Universal Design Organization がある．ここでは，色覚の精密検査を受けた1型と2型の2色覚者および異常3色覚者をモニターとして登録しており，企業や自治体などに対して，色覚異常者の目から見た配色やデザインのコンサルティングを提供している．製品がカラーユニバーサルデザインを満足していると認めた場合，その印としてカラーユニバーサルデザインマーク（図23）を発行することも活動の一環として行っている．同じような活動を行っている団体に，特定非営利活動法人北海道カラーユニバーサルデザイン機構がある．

カラーユニバーサルデザインは，色覚異常の啓蒙活動として非常に有意義であり，このような努力を通じて多くの人が色がコミュニケーションに与える影響について考えるきっかけとなっている．

しかし，このような活動が世の中に広く普及したとしてもそれは万能ではなく，人工物には有効であるものの，自然物を見る場合，過去の制作物などカラーユニバーサルデザインを留意せずに制作された人工物を見る場合，色に関する表現を行う場合に生じる不便さは解決することができない．

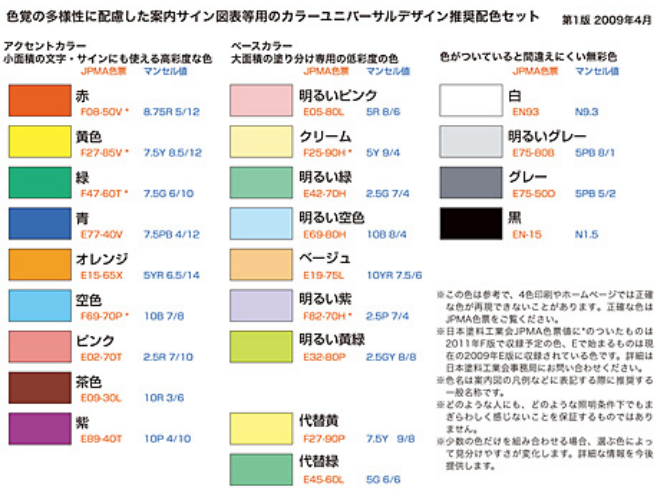


図22　特定非営利活動法人Color Universal Design Organizationが提唱するカラーユニバーサルデザイン推奨配色セット[24].

図23　特定非営利活動法人Color Universal Design Organizationの認証マーク[24]．実際の色覚異常者による見え方のチェックを行い，誰にとっても見えやすい製品やサービスに対して認証を行っている．

4. 目的

色覚異常者のQOLを向上させるため，色覚異常者が色の視認性や弁別性を高めるために使用する色覚補助ツールを開発すること，および多くの人に色覚異常者の色の見えの特性を理解してもらうために色覚の体験ツールを開発すること，またそれらを社会に向けて公開し多くの人に使ってもらうことがこの研究の大きな目的である．先行研究や先行事例を参考にして，それらのツールが満たすべき要件について検討する．

4.1. 色覚補助ツール

いつどのような場面で使用する色覚補助ツールをつくるべきだろうか．パソコンでウェブページを見ているとき，手元にある物体の色を色名で知りたいとき，赤を見つけたいときなど，特定の場面での利用に限定し，大きく効果を発揮することができる色覚補助ツールを作ることは可能であり，そのようなソフトウェアや携帯ツールもいくつか公開されている．しかし，色覚異常者が日常生活の中で，色が原因で不便な思いをするシーンは数多く存在し，それらに共通して使用できるツールはほとんど存在しない．近視の人には眼鏡という便利なツールがあり，自らの身体とともに持ち運び，日常生活で遭遇する多くの物を見るシーンでその補助を行い，ユーザの視力を補っている．

本研究では，色覚異常者が日常生活の中で遭遇する色の認識や弁別が必要とされるさまざまなシーンで使用することができるツールの開発を目指す．そのために，本研究で開発する色覚補助ツールが満たすべき要件について検討する．日常生活の中で，色に関して不便さを感じる典型的な場面は，大きく次の3つに分類することができる（図24）．

(1) 人工物を見る
パンフレットなどの印刷物，街頭や建物内の看板やマークなどのサイン，パソコン内のドキュメントやインターネットのウェブサイトなどを見る場合．

(2) 自然物を見る
緑の葉の中の赤い花を見る，熟したトマトと未熟のトマトを見分ける，焼肉屋で生肉と焼けた肉の区別をするなど，風景，動植物などを見る場合．

(3) 色を用いた表現を行う
シャツの色に合うネクタイを探す，プレゼンテーション書類を作る，色を使った表現を行う場合．

図24　色覚異常者が日常生活の中で色に関して不便さを感じる場面の例．
左：人工物を見る場合，中央：自然物を見る場合，右：色を使って表現を行う場合．

開発する色覚補助ツールは，これら3つのいずれの場面においても利用できる必要がある．日常生活の中で，これらの場面が発生する場所や時間を限定することは難しいので，いつでもどこでも使用できなければならない．したがって，ツールはユーザが持ち運びできるものでなければならない．見る対象が (1)の人工物の場合と (2)の自然物の場合では，見る環境も変化する．目に飛び込んでくる光は光源の色に依存して大きく変わるので，室内か屋外か，白熱灯照明か蛍光灯照明か，昼間の強い光か，夕方の赤く弱い光かなど，さまざまな照度と光源に対応できなければならない．遠くの物を見るときも手元の物を見るときもあり，その両方に対応できなければならない．それは (3)についても同様である．

(3)の場面で高い有効性を発揮するためには混同色が弁別できるだけでは不十分であり，見ている色が正常色覚者にとってどのように見えている色なのか，その目安がある程度わかる必要がある．

(1)，(2)，(3)に共通して，日常生活で便利に利用できるためには，直ちに使用できてすぐに効果が上がるものでなければならない．さまざまな色覚的特徴を持つ色覚異常者が使用することが可能なユーザカバー率が高いツールであることが望ましい．

以上に鑑み，以下の4点に留意した1型2色覚者および2型2色覚者のための色変更手法を考案し，その手法を搭載した携帯可能な色覚補助ツールの実現を目指す．

- 携帯性：肌身離さず持ち運べる携帯機器上に実装可能なこと．
- リアルタイム性：静止画像だけではなく，動画像をリアルタイムに色変更可能なこと．
- インタラクティブ性：使用する対象や環境，利用者の色覚特性に応じて対話的に調整が可能であること．
- 汎用性：一部の色だけでなく，正常色覚者が知覚する色域全体に渡って色の認識および混同色の弁別が行えること．

このような色覚補助ツールを開発し，およびそれを公開して色覚異常者に使ってもらうことによって彼らのQOLを向上させることを本研究の目的とする．

4.2. 色覚体験ツール

色覚に関して理解を深めるための色覚体験ツールも，色覚補助ツールと同様に，色覚異常者が不便を感じると想定される(1)，(2)，(3)のすべての場面において，色覚異常者の色の見えを体験できることが望ましい．したがって色覚補助ツールに倣い，以下の要件を満たしたツールの実現を目指す．

- 携帯性：肌身離さず持ち運べる携帯機器上に実装可能なこと．
- リアルタイム性：動画像をリアルタイムでシミュレーション可能なこと．
- 汎用性： さまざまな色覚特性のシミュレーションが可能なこと．

このような色覚体験ツールの開発し，およびそれを色覚補助ツールと同時に公開を行うことで，人々の色覚異常への理解を深め，色覚異常者が日常生活で大きな困難に遭遇するのことない優しい社会を構築するための一助となることを本研究の目的とする．

5.　手法

色覚補助ツールで使用する色変更手法，色覚体験ツールで使用するシミュレーション手法について提案する．

5.1.　色変更手法

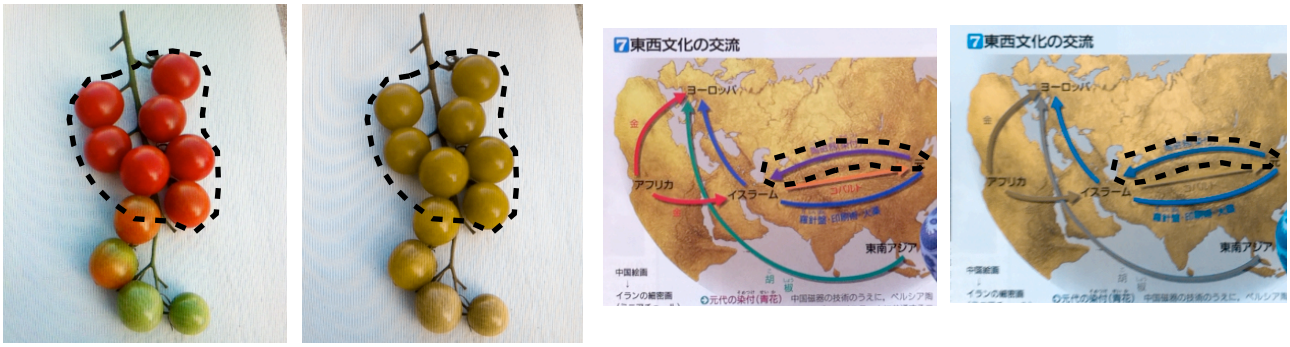
2色覚者は，正常色覚者にとっては異なる色として知覚される色同士であっても，それらが同一混同色線上にあれば同じ色として知覚し，混同する．2つの混同色は，片方の色を変更すれば弁別が可能となる．混同色が複数存在している場合は，1色を除く残りすべての色を変換する必要がある． また，不可視色は，可視色に変換することで認識可能となる．

対象が人工物の場合は，色数はある程度限定されるので，混同色対をすべて探し出し混同しないように変更することができるが，その計算量は多く処理に時間がかかる．対象が自然物の場合は多数の混同色対が存在し，それらすべてを一度に弁別可能な画像を作成することは困難である．そこで，一度にすべての混同色を変更するのではなく，色の範囲を限定して色の変更を行うことを考える．

画像中の物やパターン等（以下「標的物」と呼ぶ）を認識しようとする場合，標的物は画像内のひとつの領域を占め，領域内において類似した色を持っていることが多い．例えば，熟したトマトとそうでないトマトを見分ける場合であれば，熟したトマトは概ね全体が赤く，未熟なトマトは概ね緑であるので，赤と緑は大きく弁別する必要があるが，1個のトマト中の微妙な色の変化は弁別できなくてもさほど困らない（図25）．

類似色全体を画像中の他の部分にある混同色と異なる色に変更すれば標的物を認識可能となる．つまり，類似色を含む色空間内の領域（以下「色ゾーン」と呼ぶ）の色を一斉に変更する色変更法が考えられる．

色ゾーンを限定して色変更を行う手法には多くの長所がある．日常生活のさまざまなシーンを考えると，標的物は刻々と変わり，その色は予めわからず，周辺部との混同のため標的物の存在自体に気付かないこともある．ひとつの色ゾーンの大きさは限られていて



a)　　a')　　b)　　b')

図25　一般に標的物は画像内の連続した領域において類似した色を持つ．a) 熟したミニトマトは点線の内側で連続した領域を占める． b) イラスト内の矢印は点線内側で連続した領域を占める．a')，b')はそれぞれの2型2色覚シミュレーション画像．2色覚者は他の部分と混同することがわかる．
（b図は，「グローバルワイド最新世界史図表 三訂版，第一学習社，2010」より引用．）

も，画像の色域全体に渡って色ゾーンを順次シフトすることにより，標的物がどのような色であっても色変更を行うことができる．また，この手法は画像中の混同色の有無の検出，混同色の同定，画像中の混同色の位置に応じた色の変更の何れも必要ない．そのため計算量が少なく，高速に色変更を行うことが可能となる．そして，色変更をリアルタイムで行うことができれば，色ゾーンを連続してシフトする過程で得られる画像の視差によって標的物を浮かび上がらせる効果が得られ，標的物を予め指定する必要がない．更に，色ゾーンを数値等の指標で色覚異常者に知らせることにすれば，正常色覚者の知覚する色が何であるかの理解の目安になる．この手法は一度に変更する色を限定することから，標的物に色ゾーンの大きさや位置を合わせるための時間が必要となる場合があり，インタラクティブ性の高い実装法を行った上で使用するのが適している．

5.1.1. 色空間の設定

本研究で扱う色空間を図26に示す．実装する携帯機器のカメラ映像信号の詳細な特性は機種によるもの，個々の機器のバラツキによるものの両方において不明だが，sRGBと見なしても差し支えないと考え，sRGBとして取り扱う．それをCIEXYZに変換して使用する．

色覚異常者の混同色や色知覚については，錐体の刺激エネルギーを表すLMSにて検討を行う．LMSとCIEXYZとの変換は，CIE測色用標準イルミナントD_{65} [9]（以下「D_{65}光源」と呼ぶ）に対してL, M, Sの値が1となるEstévez-Hunt-Pointerの錐体応答[14,15]によるものとする．

色差を扱う計算においては，色空間上のユークリッド距離を人間の知覚的色差と一致させた均等色空間のひとつであるCIELUVを用いた．一部の演算については，計算量を減らすために，文献[25]に倣って，一次分数変換を行うことによりLMS空間の均等性を高めた空間（以下「L'M'S'」と呼ぶ）にて行った．

それぞれの変換は以下の式にて行った．

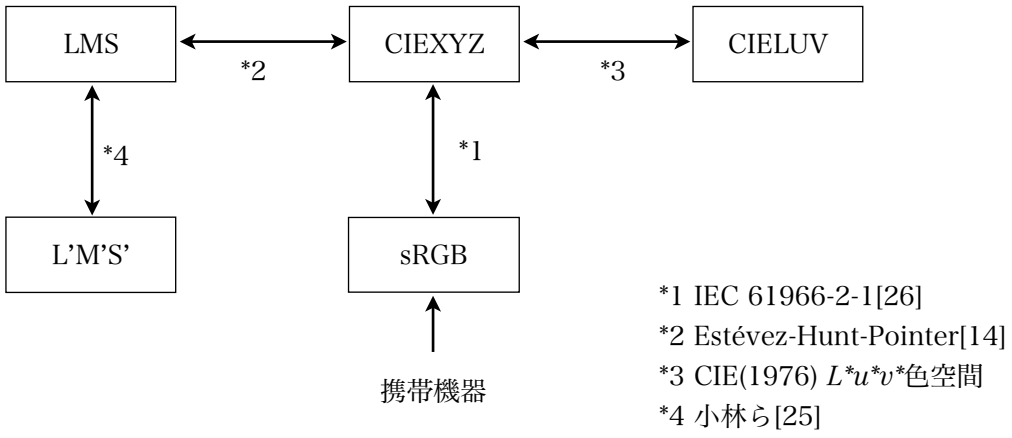


図26　本論文で扱う色空間と各空間間の変換法．

• sRGBからCIEXYZへの変換

$$
\begin{aligned}
R'_{\mathrm{sRGB}} &= \frac{R_{8\mathrm{bit}}}{255} \\
G'_{\mathrm{sRGB}} &= \frac{G_{8\mathrm{bit}}}{255} \\
B'_{\mathrm{sRGB}} &= \frac{B_{8\mathrm{bit}}}{255}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

もし，$R'_{\mathrm{sRGB}}, G'_{\mathrm{sRGB}}, B'_{\mathrm{sRGB}} \le 0.04045$ ならば,

$$
\begin{aligned}
R_{\mathrm{sRGB}} &= \frac{R'_{8\mathrm{bit}}}{12.92} \\
G_{\mathrm{sRGB}} &= \frac{G'_{8\mathrm{bit}}}{12.92} \\
B_{\mathrm{sRGB}} &= \frac{B'_{8\mathrm{bit}}}{12.92}
\end{aligned}
\tag{2}
$$

もし，$R'_{\mathrm{sRGB}}, G'_{\mathrm{sRGB}}, B'_{\mathrm{sRGB}} > 0.04045$ ならば,

$$
\begin{aligned}
R_{\mathrm{sRGB}} &= \left(\frac{R_{8\mathrm{bit}} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \\
G_{\mathrm{sRGB}} &= \left(\frac{G_{8\mathrm{bit}} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4} \\
B_{\mathrm{sRGB}} &= \left(\frac{B_{8\mathrm{bit}} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}
\end{aligned}
\tag{3}
$$

そして,

$$
\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{\mathrm{sRGB}} \\ G_{\mathrm{sRGB}} \\ B_{\mathrm{sRGB}} \end{pmatrix} \tag{4}
$$

• CIEXYZからsRGBへの変換

$$
\begin{pmatrix} R_{\mathrm{sRGB}} \\ G_{\mathrm{sRGB}} \\ B_{\mathrm{sRGB}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2406 & -1.5372 & -0.4986 \\ -0.9689 & 1.8758 & 0.0415 \\ 0.0557 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \tag{5}
$$

もし，$R_{\mathrm{sRGB}}, G_{\mathrm{sRGB}}, B_{\mathrm{sRGB}} \le 0.0031308$ ならば,

$$
\begin{aligned}
R'_{\mathrm{sRGB}} &= 12.92 R_{\mathrm{sRGB}} \\
G'_{\mathrm{sRGB}} &= 12.92 G_{\mathrm{sRGB}} \\
B'_{\mathrm{sRGB}} &= 12.92 B_{\mathrm{sRGB}}
\end{aligned}
\tag{6}
$$

もし， $R_{\mathrm{sRGB}},G_{\mathrm{sRGB}},B_{\mathrm{sRGB}} > 0.0031308$ ならば，

$$
\begin{aligned}
R'_{\mathrm{sRGB}} &= 1.055R_{\mathrm{sRGB}}^{\frac{1.0}{2.4}} - 0.055 \\
G'_{\mathrm{sRGB}} &= 1.055G_{\mathrm{sRGB}}^{\frac{1.0}{2.4}} - 0.055 \\
B'_{\mathrm{sRGB}} &= 1.055B_{\mathrm{sRGB}}^{\frac{1.0}{2.4}} - 0.055
\end{aligned}
\tag{7}
$$

そして，

$$
\begin{aligned}
R_{8\mathrm{bit}} &= 255R'_{\mathrm{sRGB}} \\
G_{8\mathrm{bit}} &= 255G'_{\mathrm{sRGB}} \\
B_{8\mathrm{bit}} &= 255B'_{\mathrm{sRGB}}
\end{aligned}
\tag{8}
$$

- CIEXYZからLMSへの変換

$$
\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.40024 & 0.70760 & -0.08081 \\ -0.22630 & 1.16532 & 0.04570 \\ 0 & 0 & 0.91822 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \tag{9}
$$

- LMSからCIEXYZへの変換

$$
\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.85995 & -1.12939 & 0.21990 \\ 0.36119 & 0.63881 & 0 \\ 0 & 0 & 1.08906 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \tag{10}
$$

- CIEXYZからCIELUVへの変換

u^* と v^* は ± 100，$0 \le L^* \le 100$ とする．

$$
L^* = 903.3\frac{Y}{Y_{\mathrm{n}}}, \qquad \frac{Y}{Y_{\mathrm{n}}} \le 0.008856 \text{ のとき} \tag{11}
$$

$$
L^* = 116\left(\frac{Y}{Y_{\mathrm{n}}}\right)^{\frac{1}{3}} - 16, \qquad \frac{Y}{Y_{\mathrm{n}}} > 0.008856 \text{ のとき} \tag{12}
$$

$$
u^* = 13L^*(u' - u'_{\mathrm{n}}) \tag{13}
$$

$$
v^* = 13L^*(v' - v'_{\mathrm{n}}) \tag{14}
$$

$$
u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \tag{15}
$$

$$
v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \tag{16}
$$

ここで，$Y_{\mathrm{n}},u'_{\mathrm{n}},v'_{\mathrm{n}}$ は完全拡散反射面の三刺激値Yと色度座標であり，Y_{n} =100と規格化する．

- CIELUVからCIEXYZへの変換

$$u' = \frac{u^*}{13L^*} + u'_{\mathrm{n}} \tag{17}$$

$$v' = \frac{v^*}{13L^*} + v'_{\mathrm{n}} \tag{18}$$

$$Y = \frac{Y_{\mathrm{n}} L^*}{903.3}, \qquad L^* \le 8 \text{ のとき} \tag{19}$$

$$Y = Y_{\mathrm{n}} \left(\frac{L^* + 16}{116} \right)^3, \qquad L^* > 8 \text{ のとき} \tag{20}$$

$$X = Y \frac{9u'}{4v'} \tag{21}$$

$$Z = Y \frac{12 - 3u' - 20v'}{4v'} \tag{22}$$

ここで，$Y_{\mathrm{n}}, u'_{\mathrm{n}}, v'_{\mathrm{n}}$ は完全拡散反射面の三刺激値Yと色度座標であり，Y_{n} =100と規格化する．

- LMSからL'M'S'への変換

$$L' = \frac{3L}{1 + 2L}$$

$$M' = \frac{3M}{1 + 2M} \tag{23}$$

$$S' = \frac{3S}{1 + 2S}$$

- L'M'S'からLMSへの変換

$$L = \frac{L'}{3 - 2L'}$$

$$M = \frac{M'}{3 - 2M'} \tag{24}$$

$$S = \frac{S'}{3 - 2S'}$$

5.1.2.　色ゾーンの決定法

2章で述べたように，2色覚者が知覚する色は，LMS内の色射影面上に射影した点の色となる．混同色線は，1型2色覚者はL軸と平行な，2型2色覚者はM軸と平行な直線群である．2色覚者は，混同色線上のすべての色は混同色となり，色射影面に射影されたひとつの色として知覚する．もし，色射影面との距離が小さな色なら，正常色覚者が知覚する色と2色覚者が知覚する色はさほど変わらないが，色射影面からの距離が大きな色は，両者が大きく異なることになる．また，色射影面を挟んで両側に離れた色同士は，正常色覚者にとっては大きく異なる色だが，2色覚者にとっては同じ色であることもある．

混同色線群を分断し，それらを短く分割するような空間を占める色ゾーンを採用すれば，多くの混同色を分離することができる．また，その色ゾーンを色射影面からの方向と距離に応じて決定することで，2色覚者と正常色覚者の知覚する色差の大小に応じて色空間を分割することが可能となる．

そのような条件を満たすために，本研究では，色射影面と平行な複数の平面群（以下「色射影面平行平面」と呼ぶ）を作り，2つの色射影面平行平面に挟まれる空間を色ゾーンとすることにする．色変更における色射影面は，計算を簡単にするためにViénotらの方法を採用する（図27）．2つの色射影面平行平面，すなわち色ゾーンの位置は標的物に合わせて自由に設定できるようにする．

LMS空間において，1型と2型の2色覚者が知覚する色はViénotらの色射影面を使用した場合，以下の計算で求めることができる．

色射影面は，黒の刺激 $\begin{pmatrix} L_K & M_K & S_K \end{pmatrix}$，白の刺激 $\begin{pmatrix} L_W & M_W & S_W \end{pmatrix}$，青の刺激 $\begin{pmatrix} L_B & M_B & S_B \end{pmatrix}$ を通る平面であり，

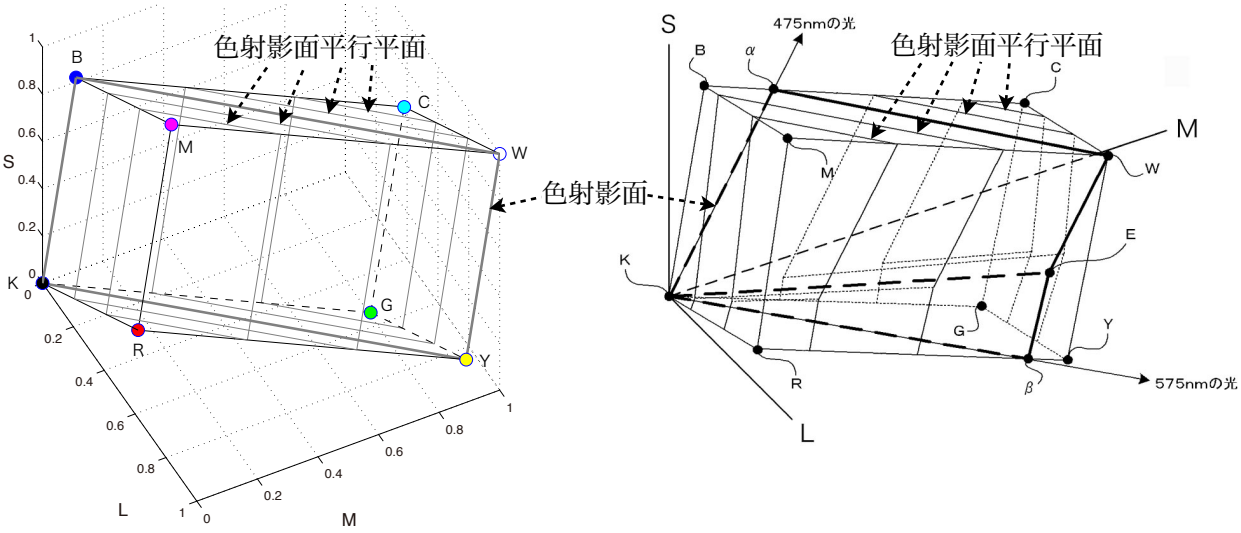


図27　LMS空間上での色射影面と色ゾーン．左：Viénotらの色射影面と平行な平面に挟まれた空間を色ゾーンとする．右：2色覚シミュレーションではBrettelらの折れ平面を使用する．記号は，黒(K)，白(W)，赤(R)，緑(G)，青(B)，黄(Y)，シアン(C)，マゼンタ(M)，LMS等刺激白色点(E)，475nmスペクトル光(α)，575nmスペクトル光(β)の刺激を表す．

その式は,

$$\alpha L + \beta M + \gamma S = 0 \tag{25}$$

で表され,

$$\alpha = M_{\mathrm{W}} S_{\mathrm{B}} - M_{\mathrm{B}} S_{\mathrm{W}} \tag{26}$$

$$\beta = S_{\mathrm{W}} L_{\mathrm{B}} - S_{\mathrm{B}} L_{\mathrm{W}} \tag{27}$$

$$\gamma = L_{\mathrm{W}} M_{\mathrm{B}} - L_{\mathrm{B}} M_{\mathrm{W}} \tag{28}$$

である.

1型2色覚の知覚に使用される錐体の応答値 $\begin{pmatrix} L_{\mathrm{p}} & M_{\mathrm{p}} & S_{\mathrm{p}} \end{pmatrix}$ のうち，機能が失われたL-錐体の応答値の値は,

$$L_{\mathrm{p}} = -\frac{\beta M + \gamma S}{\alpha} \tag{29}$$

2型2色覚の知覚に使用される錐体の応答値 $\begin{pmatrix} L_{\mathrm{d}} & M_{\mathrm{d}} & S_{\mathrm{d}} \end{pmatrix}$ のうち，機能が失われたM-錐体の応答値は,

$$M_{\mathrm{d}} = -\frac{\alpha L + \gamma S}{\beta} \tag{30}$$

で求められる.

Estévez-Hunt-Pointerの錐体応答の行列を使用した場合，黒の刺激 $\begin{pmatrix} L_{\mathrm{K}} & M_{\mathrm{K}} & S_{\mathrm{K}} \end{pmatrix}$，白の刺激 $\begin{pmatrix} L_{\mathrm{W}} & M_{\mathrm{W}} & S_{\mathrm{W}} \end{pmatrix}$，青の刺激 $\begin{pmatrix} L_{\mathrm{B}} & M_{\mathrm{B}} & S_{\mathrm{B}} \end{pmatrix}$ はそれぞれ,

$$\begin{pmatrix} L_{\mathrm{K}} \\ M_{\mathrm{K}} \\ S_{\mathrm{K}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{31}$$

$$\begin{pmatrix} L_{\mathrm{W}} \\ M_{\mathrm{W}} \\ S_{\mathrm{W}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \tag{32}$$

$$\begin{pmatrix} L_{\mathrm{B}} \\ M_{\mathrm{B}} \\ S_{\mathrm{B}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.40024 & 0.70760 & -0.08081 \\ -0.22630 & 1.16532 & 0.04570 \\ 0 & 0 & 0.91822 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0.0465 \\ 0.0867 \\ 0.8728 \end{pmatrix} \tag{33}$$

であるので，式26-33により，1型2色覚の錐体応答値は,

$$\begin{pmatrix} L_{\mathrm{p}} \\ M_{\mathrm{p}} \\ S_{\mathrm{p}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1.05119 & -0.05115 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \tag{34}$$

2型2色覚の錐体応答値は,

$$\begin{pmatrix} L_{\mathrm{d}} \\ M_{\mathrm{d}} \\ S_{\mathrm{d}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0.95131 & 0 & 0.04866 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} \tag{35}$$

となる.

3型2色覚の1平面による色射影面は，Viénotらの文献には記載されていないが,
660nmの点の代わりにsRGBの赤，485nmの点の代わりにsRGBのシアンを使用することによって求めた.

色ゾーンの位置の変化量や色空間内で色ゾーンが占める割合を知覚と合致させるため,
色ゾーンの決定は均等色空間において計算されるべきである．しかし，均等色空間の多くは明度の大小によって色度が取り得る範囲が変化することから，色射影平面からの方向と距離によって単純に色ゾーンを決定すると，昼間の屋外など照度が高い環境下と室内などの照度が低い環境下とで，類似した色度の色が異なった色ゾーンに属してしまう現象が発生する．ユーザが特定の赤い服を見る場合は，それを見る環境が屋外であっても室内であっても，同じ色ゾーンを指定すればその服の赤い色が変更されるほうが便利である．環境の変化に左右されずに，同じ物体色を持つ標的物がなるべく同じ色ゾーンに属するためには，均等色空間内における色射影面との距離だけで色ゾーンを決定する方法では実現することができない.

そこで，実際に色ゾーンを決定する計算は，均等色空間CIELUVにおいて明度が一定のときの色度を表す$u'v'$色度図上で行うこととする．色射影面および色射影面平行平面は,
$u'v'$色度図上ではひとつの交点（以下「色射影面平行平面交点」と呼ぶ）を持つ直線群をなす．色射影面とひとつの色射影面平行平面が$u'v'$色度図上でなす角をθ，色ゾーンの幅を$\Delta\theta$とするとき，θから$\theta+\Delta\theta$の間の楔形領域が色ゾーンとなる（図28）.

本研究では元画像データはsRGBであるので，θの取り得る範囲は，sRGBの赤から緑の間である．θをsRGBの赤から緑の区間で正規化した値を$s\theta$としたとき，$s\theta$の計算方法を以下に示す.

$u'v'$色度図でsRGBの赤をR，sRGBの緑をG，色射影面平行平面交点をCとする.
Rの色度を$\begin{pmatrix} u'_{\mathrm{R}} & v'_{\mathrm{R}} \end{pmatrix}$，Gの色度を$\begin{pmatrix} u'_{\mathrm{G}} & v'_{\mathrm{G}} \end{pmatrix}$，Cの座標を$\begin{pmatrix} u'_{\mathrm{C}} & v'_{\mathrm{C}} \end{pmatrix}$とし,
RおよびGのθを，θ_{R}，θ_{G}としたとき,
色pの$u'v'$色度を$\begin{pmatrix} u'_{p} & v'_{p} \end{pmatrix}$とすると,

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{u'_p - u'_C}{v'_p - v'_C}\right) \qquad \text{ただし，} \theta_G < \theta_p < \theta_R \text{ または } \theta_R < \theta_p < \theta_G \text{ の値に限定する．} \tag{36}$$

$$s\theta_p = \frac{\theta_p - \theta_R}{\theta_G - \theta_R} \tag{37}$$

となる．これにより，$s\theta_p$ は，$0 < s\theta_p < 1$ の範囲となる．

任意の色が色ゾーンに属しているか否かを判定する計算方法を以下に示す．
色ゾーンの開始位置を $s\theta_{start}$ ，色ゾーンの幅を $\Delta s\theta$ とすると，色 p が色ゾーンに属しているか否かの判定は，

色 p が色ゾーンの範囲内：

$$s\theta_{start} < s\theta_p < (s\theta_{start} + \Delta s\theta) \tag{38}$$

色 p が色ゾーンの範囲外：

$$(s\theta_p < s\theta_{start}) \text{ or } ((s\theta_{start} + \Delta s\theta) < s\theta_p) \tag{39}$$

となる．

色ゾーンの開始位置 $s\theta_{start}$ ，色ゾーンの幅 $\Delta s\theta$ は画像中の色変更を行いたい標的物に合わせて随時変更を行いながら使用する．

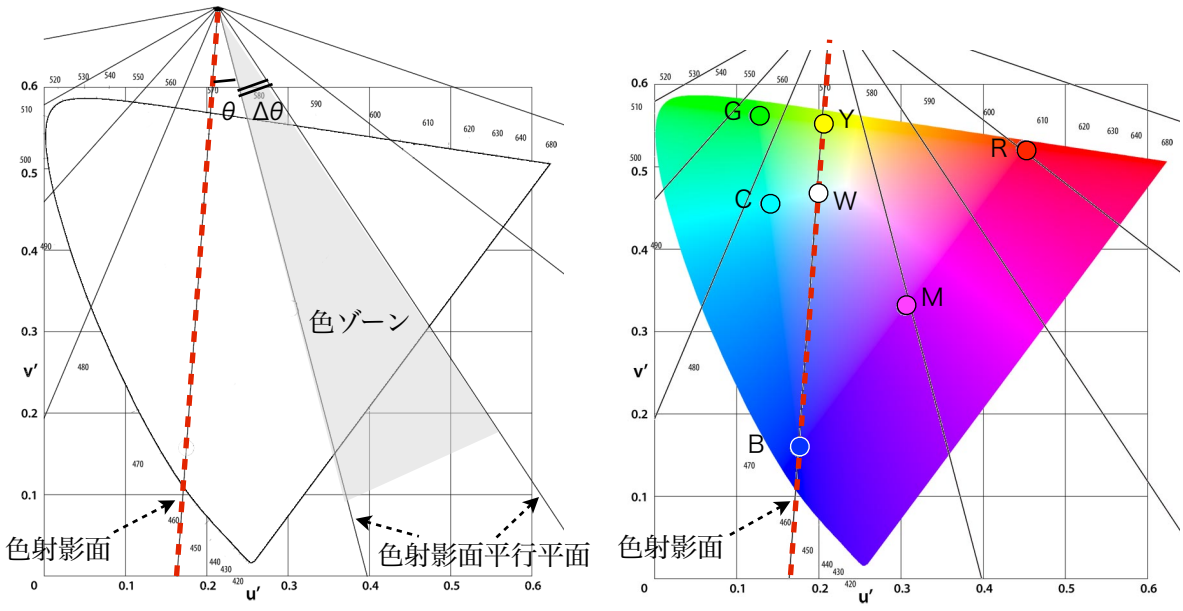


図28　$u'v'$色度図上での色ゾーン分割．色射影面と色射影面平行平面に挟まれる色ゾーンで色空間を分割する．右は$u'v'$色度図に色を付け，白(W)，赤(R)，緑(G)，青(B)，黄(Y)，シアン(C)，マゼンタ(M)の位置を表示したもの．

5.1.3. 混同色の変更法

色ゾーンに属する色の変更にあたっては，元画像の色を大きく変更すると不自然になるので，元の色が属する混同色線から少しだけ離れた色に変更することを考える．色覚異常者にとっても正常色覚者にとっても自然な画像が得られるよう元画像の印象を保ちつつ，混同色を弁別することができる色変更の方法として，次の2通りを考える．

・色度一定・明度変更法

CIELUV空間で元の色の色度を変えずに明度のみを変える（図29）．混同色線は同一明度のときに色が混同してしまう線であり，混同色は色度が変えなくても一定以上明度が変えれば見分けることができるようになる．太田らの研究[27]において，色の変化の認知は，色度の変化よりも明度の変化に敏感であるという報告もなされている．

ある色 p のCIELUVの座標を $\begin{pmatrix} L^*_p & u^*_p & v^*_p \end{pmatrix}$，色の変更量を ΔL とすると，変更後の色 p' の座標は，

$$\begin{pmatrix} L^*_{p'} & u^*_{p'} & v^*_{p'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L^*_p + \Delta L & u^*_p & v^*_p \end{pmatrix} \tag{40}$$

となる．

・明度一定・色度変更法

LMS空間で元の色の明度を変えずに色度のみを，混同色線と垂直な方向に変える．

明度一定面は，CIEXYZの Y 値が一定の面に対応するので，LMS空間では Estévez-Hunt-Pointerの錐体応答の行列を使用した場合，以下の式で表すことができる．

$$0.36119L + 0.63881M = k \quad (k\text{は定数}) \tag{41}$$

これはS軸に平行な平面であり，この面上で混同色線と垂直な方向は，1型および2型の2色覚のいずれにとってもS軸の方向となる．したがって，S 成分のみを変更すれば良く，計算が簡単になる（図30）．

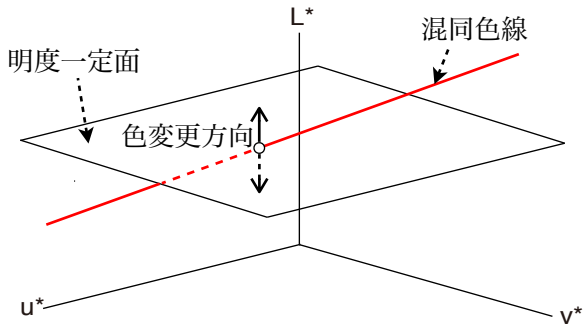


図29　色度一定・明度変更法．色度を一定に保ち，明度を変化させる．明度一定面と垂直な方向を色変更方向とする．

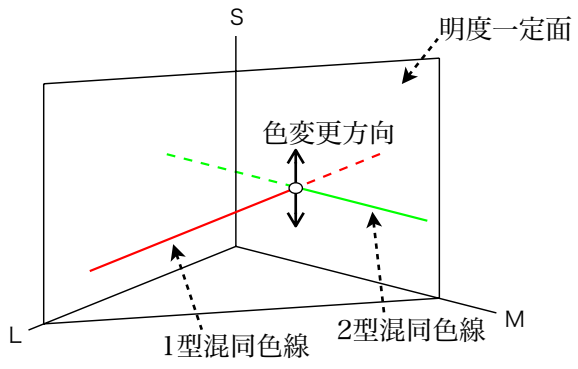


図30　明度一定・色度変更法．明度を一定に保ち，色度を変化させる．明度一定面上で，混同色線に垂直な方向を色変更方向とする．

3型色覚の色変更の場合は，明度一定面上で，S軸と垂直な方向に色を変える．

元の色 p のLMSの座標を $\begin{pmatrix} L_p & M_p & S_p \end{pmatrix}$，$L$成分の色の変更量を$\Delta l$ とすると，変更後の色 p’ の座標は，

$$\begin{pmatrix} L_{p'} & M_{p'} & S_{p'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_p + \Delta l & M_p + \frac{0.36119}{0.63881}\Delta l & S_p \end{pmatrix} \tag{42}$$

となる．

1型および2型色覚向けの色変更でも，3型色覚向けの色変更でも，色の変更量を決定する際は，錐体刺激値であるLMSをそのまま使用せず，知覚値になるべく近づけるために一次分数変換を使用したL’M’S’にて計算を行う．LMSとL’M’S’の変換法は式23,24で示した．

ある色 p のS座標の値を S_p，色の変更量をΔs とすると，変更後の色 p’ のS座標の値 $S_{p'}$ は，

$$S_{p'} = \frac{\frac{3S_p}{1+2S_p} + \Delta s}{3 - 2\left(\frac{3S_p}{1+2S_p} + \Delta s\right)} \tag{43}$$

となる．3型色覚の場合に，L座標，M座標を変更する場合においても同様とする．

5.1.4. 色ゾーンのシフト法

標的物がその周辺の色と混同して見分けにくいというシーンでは，ユーザは標的物の存在そのものに気付いていない可能性が高い．標的物がどこかに存在することがわかっていてもその画像上の位置がわからない場合もある．多くの場合，標的物は類似した色を持っているとしても，それらをすっぽり覆うような色ゾーンの幅 ($\Delta\theta$) は予めわからない．しかし，標的物は輪郭の内側において色が連続的に変化している．したがって，色空間上の色ゾーンの位置は連続的に変化させることによって，色ゾーンの幅の大小に関わらず標的物の位置を明らかにすることができる．そのため，本研究では，色ゾーンを現在の位置からプラス方向またはマイナス方向に相対的にシフトを繰り返すことにより，その位置を動かすこととする．通常（あまり高速に色ゾーンをシフトしない場合）はシフト後の新たな色ゾーンは，直前の色ゾーンとその領域の大部分が重複するような動き方になる．

色ゾーンのシフトは，インタラクティブにユーザが指定して行う手法のほか，時間と共に色域全体に渡って自動的にシフトする手法にて行う．これにより，ある一瞬においては弁別することができない混同色が存在しても，動画像を色変更を行いながら一定時間見続けるうちに何れかの混同色の色が変更され，弁別が可能となる．

5.2. シミュレーション手法

2色覚シミュレーションにおける色射影面は，シミュレーションをなるべく正確に行うためにBrettelらの折れ平面（図27）を採用する．Viénotらの文献には，2色覚のシミュレーションの具体的計算法が記されているが，sRGBとCIEXYZ空間間の変換はIEC 61966-2-1のドラフト版に記載されている変換式が使用されており，またCIEXYZとLMS空間間の変換にはSmith and Pokornyら提案の等色関数[14]が使用されLMS空間において正規化されていない．

本研究では，IEC 61966-2-1の正式版およびEstévez-Hunt-Pointerの錐体応答の行列を使用するように改良し，Brettelらシミュレーション手法およびViénotらの色射影面に適用する．具体的には，sRGBのガンマ補正部分を式1-3および式6-8とし，LMSとCIEXYZ色空間間の等色関数を式9,10とする改良を施した．本改良により輝度が低い色の色変更の精度が向上する．

改良後のViénotらの色射影面の決定の演算については前節で述べたが，射影以外の部分はBrettelらの折れ平面によるシミュレーションでも同様である．

改良後のBrettelらの折れ平面によるシミュレーションにおいて，シミュレーション後の色を求める手順について述べる．

LMS空間において，
白，黒，575nmのスペクトル光の刺激の3点を含む平面を，plane1,
白，黒，475nmのスペクトル光の刺激の3点を含む平面を，plane2,
白，黒，660nmのスペクトル光の刺激の3点を含む平面を，plane3,
白，黒，485nmのスペクトル光の刺激の3点を含む平面を，plane4 とする．
元の色 p の刺激を，$\begin{pmatrix} L_p & M_p & S_p \end{pmatrix}$ とすると，
シミュレーションを行う色覚の型に応じて，以下のアルゴリズムで色射影面を選択する．

1型2色覚： $\frac{S_p}{M_p} < 1$ ならば plane1 さもなくば plane2 (44)

2型2色覚： $\frac{S_p}{L_p} < 1$ ならば plane1 さもなくば plane2 (45)

3型2色覚： $\frac{M_p}{L_p} < 1$ ならば plane3 さもなくば plane4 (46)

選択した色射影面に元の色 p を射影し，シミュレーション後の色 p’ の刺激を求める．

更に，本シミュレーション手法では，正常色覚者が見ている色（シミュレーションなし画像）と2色覚者が見ている色（2色覚シミュレーション画像）の中間の見え方をサポートし，両者の比率をシミュレーション強度と名付けた．シミュレーション強度による正常色覚と2色覚の線形変換による中間画像を作る手法を付加した理由は，異常3色覚の見えのメカニズムはまだ解明されていないが，正常色覚と2色覚の中間画像を作ることで，その

見えをある程度近似できるのではないかと考えたためである．

LMS空間においてシミュレーション強度 k の刺激 Q_{a} の計算方法は以下の通り．

正常色覚者の知覚する刺激をQ_{t}，2色覚者の知覚する刺激をQ_{d}，シミュレーション強度 k が $0<k<1$ とすると，

$$Q_{\mathrm{a}}=(1-k)Q_{\mathrm{t}}+kQ_{\mathrm{d}} \tag{47}$$

なお，正常色覚者が知覚する色と2色覚者の知覚する色の中間の色を求め，それを異常3色覚の色の見えとする手法は，太田ら[27]などによって提案されている．本研究では，この線形変換による中間画像を異常3色覚のシミュレーションとは呼ばず，あくまでも異常3色覚と似たような画像が得られる簡易的な近似手法として採用する．

6. 実装

提案手法を実装する手法について述べる．

6.1. 実装対象

前述の色変更手法をApple Inc.の携帯機器iPhone 4，iPhone 3GS（図31）および第4世代のiPod Touchに実装し，色覚補助ツールおよび色覚体験ツールを作成した．色数はRGB各256階調，解像度は320×480ピクセル，1秒につき15枚の画像を内蔵カメラから取り込み，リアルタイムで色変更を行った上でディスプレイに表示するようにした．色ゾーンの始まりの角θや幅$\Delta\theta$，明度や色度の変化量は，使用者がインタラクティブに指定できるようにした．また，あらかじめ定めた時間内に，色域全体に渡って色の変更を行う色ゾーン自動シフト機能も搭載した．更に，正常色覚者が2色覚者の色知覚を体験できるように，Brettelらの手法によるシミュレーション機能を付加した．面倒な調整作業をなるべく軽減するためキャリブレーションは行わないこととし，ホワイトバランスとフォーカスは携帯機器に標準で搭載されている機能を利用して自動調節とした．

また，色覚体験ツールは，ウェブアプリケーション版も作成した．インターネットブラウザ上で動かすために，Adobe Flex 4.0フレームワーク上でオブジェクト指向言語ActionScript 3.0およびイメージプロセッシング言語Adobe Pixel Bender上に実装した．

6.2. 高速化手法

色覚シミュレーションおよび色の変更においては，複数の色空間を切り替えながら多くの計算を行うことが必要となるため，1画像あたりの計算量は膨大になる．本研究では，動画像を必要としており，静止画像を連続して取得，加工，表示を行うことが必要であるので，1単位時間のフレーム数をf，1フレームあたりのピクセル数をp，1ピクセルあたりの計算量をcとした場合，1単位時間あたりの計算量Cは，

$$C = f \cdot p \cdot c \tag{48}$$

となる．

色空間内の2色覚シミュレーションにおける1ピクセルあたりの主な計算の手順と演算（cの部分）は図32，色変更手法においては図33の通りとなる．

これらをすべて携帯機器上のCPU（Central Processing Unit）にて計算を行った場合，リアルタイムの動画像処理が不可能であるため，これらの色空間を切り替えながらの連続した演算を高速に行うことができる実装手法が必要となる．本研究では，3次元（3D）グラフィックス描画を高速に行うために携帯機器内にCPUと独立して搭載されているGPU（Graphics Processing Unit）に着目し（図34），それを色空間上の計算に使用することによって処理続度の大幅な高速化を実現した．

一般に，GPUのアーキテクチャは，3Dモデルの頂点データを与えて幾何学計算によって形状を与えるためのVertex Shaderと，ピクセル単位で描画するするためのFragment Shaderから構成されている．本研究では，図32および図33のすべての計算をFragment Shader上に実装して実行した．グラフィックスAPIとしてOpenGL ES 2.0，GPUを利用し

た演算処理の本体の記述は，Adobe Pixel Benderおよび並列化プログラミング言語OpenCLの2種類を使用し，両バージョンを作成した．

また，色変更手法において，色変更後の画像に対し2色覚シミュレーションを行う場合は更に図32の演算が必要となり，全体としては色変更だけ行う場合の2倍近くの計算量が必要となる．色変更と2色覚シミュレーションを同時に実行する場合は，ガンマ補正（式1-3および式6-8）や一部の色空間間の変換は一度で済ませることができる．

iPhone 4上で，320×480ピクセル，RGB各256階調のオリジナル画像から，図32の手順で2色覚シミュレーション画像を作成する場合，GPUを使用せずに機器本体のCPUのみ

図31　色変更手法とシミュレーション手法を実装した携帯機器．左：iPhone 3GS，右：iPhone 4．

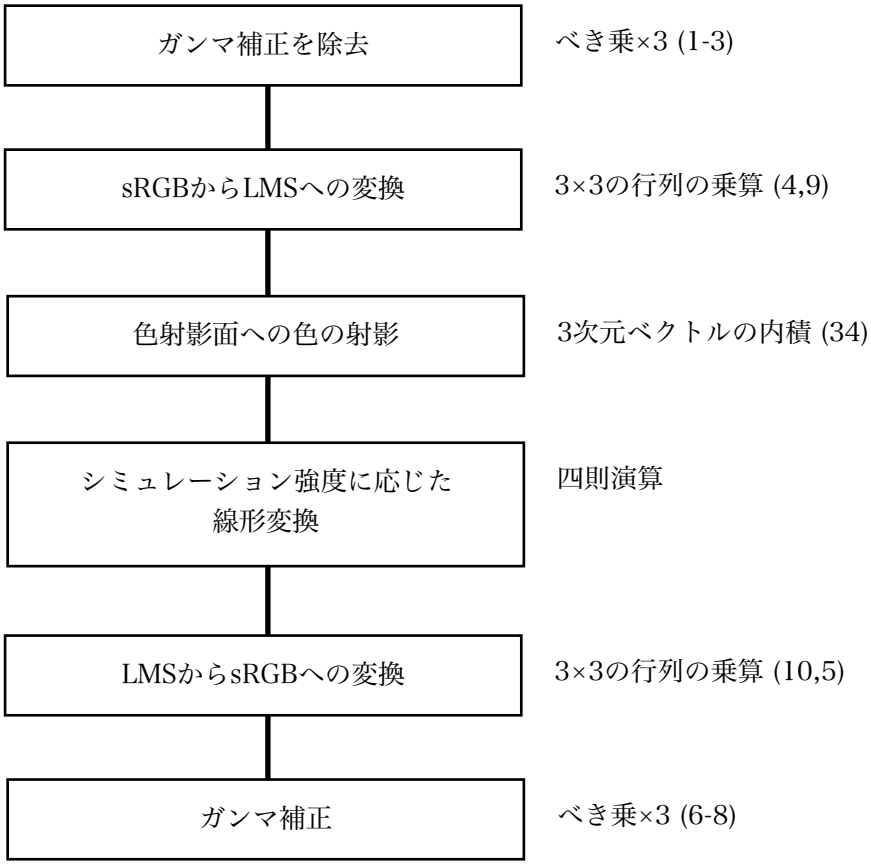


図32　色覚シミュレーションにおける1ピクセルあたりの主な手順と演算．括弧内は対応する本論文中の計算式の式番号．

で計算を行ったところ，1フレームにつき約813.5msの処理時間が必要だった．GPUを使用した高速化手法では，処理時間が1フレームにつき約47.9msに短縮され，約17倍高速化された．シミュレーションに加えて色変更を行う場合は更に差が拡大する．

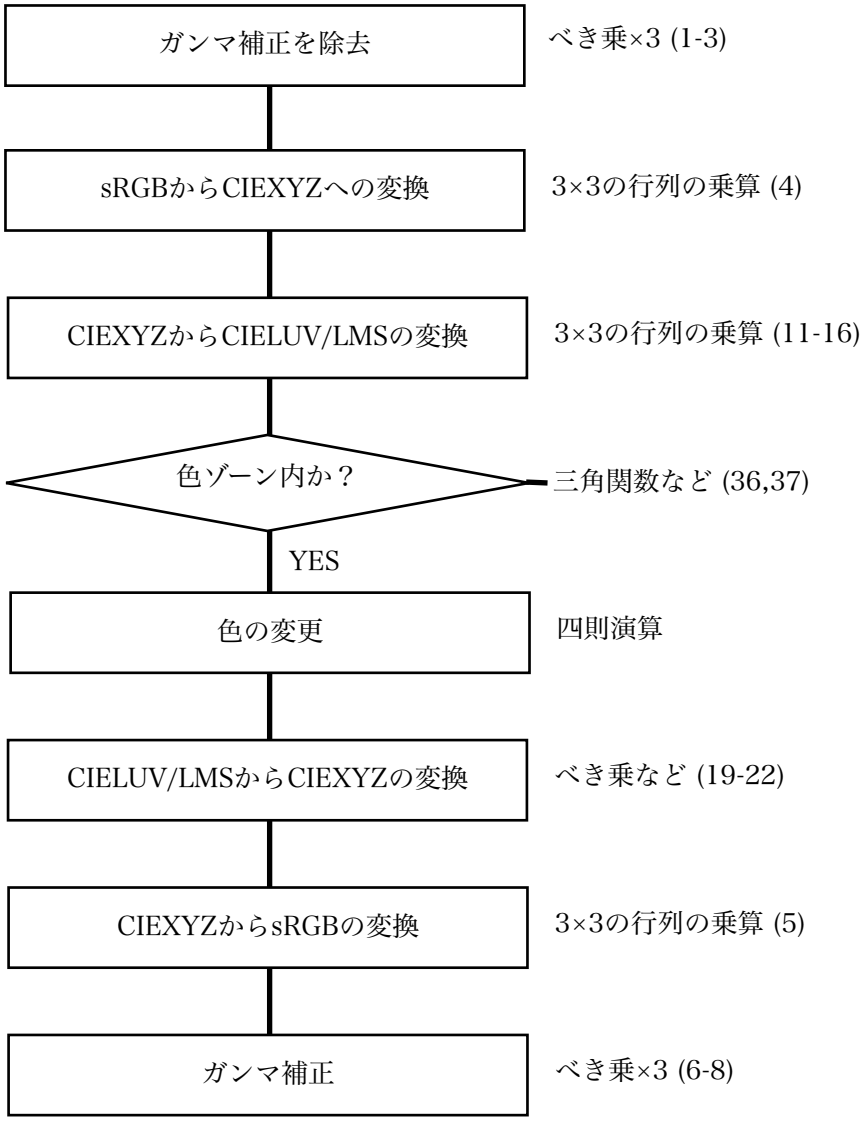


図33　色変更における1ピクセルあたりの主な手順と演算．括弧内は対応する本論文中の計算式の式番号．

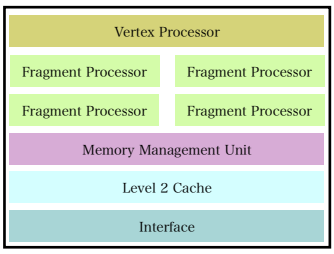


図34　GPUのアーキテクチャの一例．

6.3.　色変更の方向と無変更域

色ゾーンの開始位置，色ゾーンの幅，色の変化量，色度一定・明度変更法と明度一定・色度変更法の選択をユーザインタフェイスを通じてユーザが設定できるようにする．中でも，色ゾーンの開始位置はどの色を変更するかを決定する重要なパラメータであるので，メイン画面にスライダーとして大きく配置する．

色ゾーンの開始位置をシフトし決定する際には，スライダーの位置と画面上部に数値で表示された θ を見ることによっておおよその色がわかる．ユーザに具体的な色をより一層わかりやすくするために，色度によって色変更の有無と方向を変える工夫を行った．

色射影面より赤側に色ゾーンが存在する場合には，現在の色を，ユーザが設定した色の変更量だけ，明度を正方向に，色度は青方向に変更し，色射影面より緑側に色ゾーンが存在する場合には，明度を負方向，色度を黄方向へと逆方向に変更する（図35）．これにより，例えば，赤やピンクなら明度が高まり，緑や水色なら明度が低まることで変化に差ができ，ユーザは具体的な色がよりわかりやすくなる．

色射影面は，白，黄，青を結ぶ面となり，無彩色も色射影面上にある．白い紙に印刷した広告などを見る場合，大きな面積を占めるバックグラウンドの部分は白であることが多い．光の加減などでこのバックグラウンドの部分にグラデーションがかかったり，ほのかに色付いている場合に，この部分の色が変更されると，色ゾーンが色射影面を通過する際に画像全体の色が大きく変わり，印象が崩れて見づらくなる．それを避けるために，色射影面を中心とした一定区間は，明度と色度の変更を行わないこととする．具体的には，色変更を行う色域（本研究においては，sRGBの赤から緑まで）の幅（θ）を基準とした場合，色射影面を中心とした前後5%（合計10%）のゾーンに属する色は色変更を行わない．

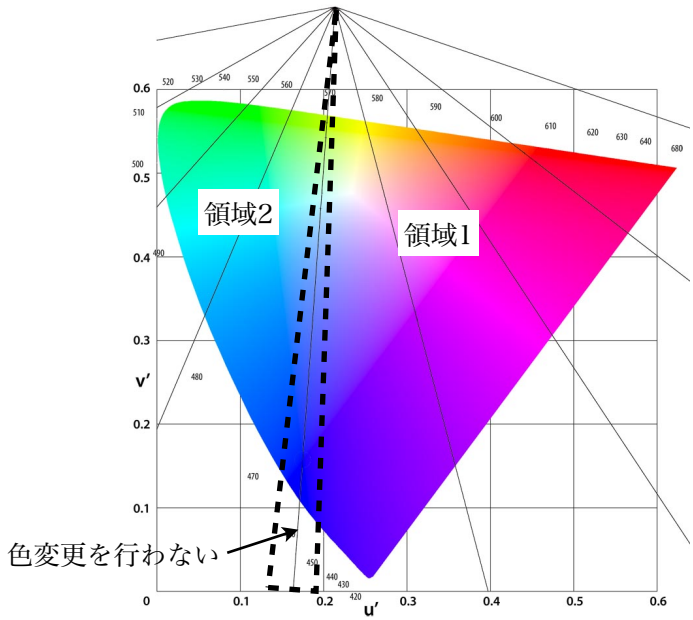


図35　色変更の方向．ユーザが設定した色の変更量に対し，点線内は色変更を行わない．領域1は正方向に色を変更．領域2は逆方向に色を変更する．

6.4. 色覚補助ツールのユーザインタフェイス

色覚補助ツールのユーザインタフェイスは図36の通りとする．それぞれのパーツの意味は以下の通りである．

(1) ステータス

メイン画面上部に，色変更の対象色ゾーン，色の変化手法と変化量，自動モードの周期の情報が表示される．

(2) 色ゾーンスライダー

下部の色領域スライダーを調整すると， 対象となる色ゾーンが変わり，その色ゾーンに属する色が変化する．映像の下部に表示される色ゾーンスライダーを調整すると，対象となる色ゾーンが変わり，その色ゾーンに属する色が変化する．色覚タイプが1型，2型の場合は，スライダーの左端が赤，右端は緑を，色覚タイプが3型の場合は，スライダーの左端が緑，右端が青の領域を示す．スライダーが無彩色（白・灰色・黒）の位置より左にある場合は色の変化量がプラスに（赤の明度が上がるなど），右にある場合は色の変化量がマイナスに（緑の明度が下がるなど）なる．

(3) カラーガイド

スライダーの周辺に，対象色領域のガイドを表示することができる．ガイドとして表示する色はあくまでもおおよその目安である．設定画面またはスライダーのサムをダブルタップすることによってON/OFFすることができる．

(4) 自動ボタン

下部左の自動ボタンを押すと， 色領域スライダー が自動で動き，注目する色ゾーンが刻々と変わる．もう一度押すと止まる．

(5) プリセットボタン

下部中央のABC3つのプリセットボタンで，設定パラメータをワンタッチで切り替えることができる．初期設定では，Bボタンには赤を素早く見つける，Cボタンには緑を素早く見つけるのに向いたパラメータをあらかじめ割り当てた．

(6) 設定ボタン

設定画面を表示する．

(7) 色覚タイプ（1/P, 2/D, 3/T）

色覚タイプを設定する．1型 Protanopia / Protanomaly，2型 Deuteranopia / Deuteranomaly，3型 Tritanopia / Tritanomaly をサポートしている．

(8) シミュレーション（ON, OFF）

色覚シミュレーションのON/OFFを設定する．ONが選択されると，選択されている色

覚タイプのシミュレーション映像を表示する．

(9) 強度（0～100%）

シミューレーションON時に，シミュレーションの強度を設定する．数字が大きくなるほど強度が高くなる．0%はシミュレーションなし，100%は2色覚シミュレーション画像となる．

(10) 色の変化手法（色度, 明度）

対象色領域の色を変化させる手法を設定する．「色度」は，明度一定・色度変更法により選択された色覚タイプの人が認識しやすい色度に変化させる．「明度」は，色度一定・明度変更法により色度を変化させずに明度の増減を行う．

(11) 色の変化量（-0.5～0.5）

対象色領域の色を変化させる相対量を設定する．数字の絶対値が大きくなるほど色が大きく変わる．おおよその傾向として，色覚タイプが1型，2型の場合は，マイナスになるほど青く，プラスは黄色くなる．色覚タイプが3型の場合は，マイナスになるほど緑に，プラスは赤くなる．

(12) 色変化の周期（1.0～10.0秒）

自動ボタンが押され，自動モードの際の，色領域を変化させる周期を設定する．4に設定されていれば，4秒周期ですべての色が変わる．

(13) 変化領域の幅（-0.5～0.5）

対象色領域の幅を設定する．0.15に設定されていれば，すべての色の15%が対象色領域となる．

図36　色覚補助ツールのユーザインタフェイス．

(14) カラーガイド（ON, OFF）
色領域スライダーの周りに，色領域の色の目安となるカラーガイドを表示するかしないかを設定する．カラーガイドは，色領域スライダーのサムをダブルタップすることによってON/OFFすることもできる．

(15) 初期設定に戻す
下部左のボタンを押すと，選択されているプリセットボタンの設定パラメータを初期設定に戻すことができる．

(16) ヘルプ
下部右のヘルプボタンを押すとヘルプ画面を表示する．

6.5. 色覚体験ツールのユーザインタフェイス

色覚補助ツールのユーザインタフェイスは図37の通りとした．それぞれのパーツの意味は以下の通りである．

(1) ステータス
選択されている色覚タイプとシミュレーションの強度を表示する．

(2) 色覚タイプボタン（C, P, D, T）
シミュレーションしたい色覚タイプを，一般（C）型，1（P）型，2（D）型，3（T）型の中から選択する．Cを選んだ場合はオリジナル画像になる．

(3) 強度スライダー（0〜100%）
P，D, T型選択時に，シミュレーションしたい色覚タイプの強度を設定する．0%はC型と同じ，100%は2色覚画像となる．

最後に操作してから10秒間が経過すると，(1), (2), (3)がフェードアウトして全面シミュレーション映像になる．画面をタッチすると元に戻る．

図37　色覚体験ツールのユーザインタフェイス．

7. 公開

開発した色覚補助ツールと色覚体験ツールは，「色のめがね」，「色のシミュレータ・ウェブ版」，「色のシミュレータ」と名付け公開した．その公開方法について述べる．

7.1. 色覚補助ツール「色のめがね」

本研究で提案する色変更手法を携帯機器上に実装し，色覚異常者が普段の生活の中で持ち運びながら使用することができる色覚補助ツールを開発し，そのソフトウェアを公開した．色変更機能には，リアルタイムで 静止画像およびカメラから取り込んだ映像の色変更画像を作る基本機能の他，画像上の注目したいエリアに限って色変更を行う機能，色の変更量などのパラメータをインタラクティブに調整する機能，ユーザの色覚特性に合わせてパラメータを設定し保存・切り替えを行う機能などを盛り込んだ．

また，上記の色変更機能の他，色覚シミュレーション機能も搭載し，さまざまな色覚タイプの人の色の見えを体験することができる（図38）．

さまざまな国の人々が使用可能であるように日本語および英語に対応し，多くの色覚異常者に使ってもらうことができるよう無償にて提供することとした．

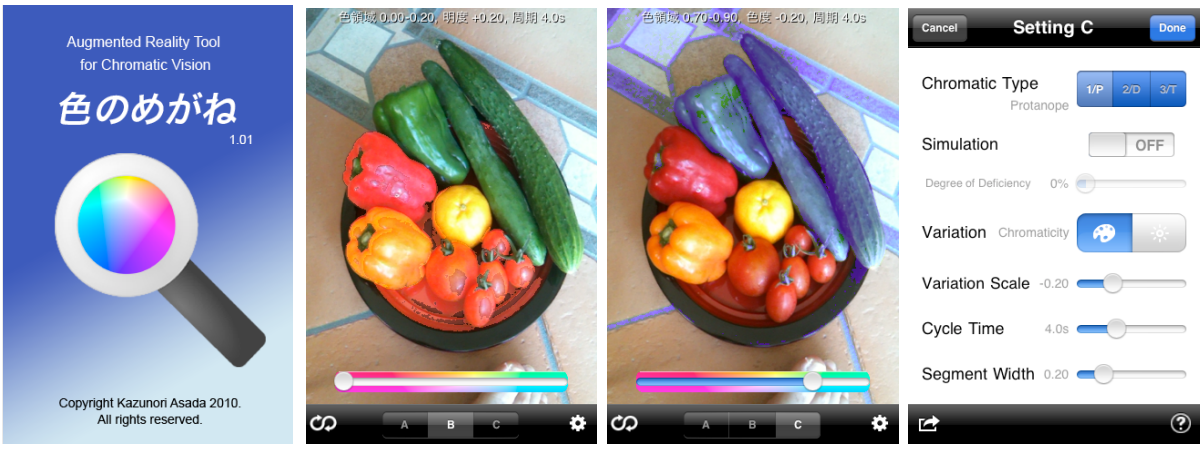


図38　色覚補助ツール「色のめがね」．左から順に，立ち上げ画面，メイン画面（赤付近の明度を上げた），メイン画面（緑付近の色度を変えた），設定画面（英語版）．

「色のめがね」配布サイト Apple iTunes Store : http://itunes.apple.com/jp/app/chromatic-glass/id388924058?mt=8
「色のめがね」ウェブサイト : http://asada.tukusi.ne.jp/chromaticglass/
Twitter公式ID : @irono_
Facebook Fan Page : http://www.facebook.com/pages/Chromatic-Glass-Chromatic-Vision-Simulator/107133666013288

図39　色覚補助ツール「色のめがね」のウェブサイトと関連URL.

2010年8月23日に Apple Inc.のiTunes Storeに登録申請を行い，2010年8月30日深夜に承認され，同日世界中のユーザに向けて配布が開始された．また，本ソフトウェアのウェブサイト（図39）を日本語および英語で作成し，ソーシャルメディアTwitterに公式アカウントを，Facebookにファンページを設け関連情報を公開している．

7.2. 色覚体験ツール「色のシミュレータ・ウェブ版」

本研究のシミュレーション手法を実装した色覚体験ツールは，ウェブアプリケーションとしてウェブブラウザで動作するソフトウェアと，携帯機器上で動作するソフトウェアの2種類を開発し，公開した．

「色のシミュレータ・ウェブ版」は，ウェブブラウザ上で動作し，静止画像を指定した2色覚シミュレーションとパソコンに接続したウェブカメラの映像をリアルタイムでシミュレーションする機能を搭載した．正常色覚と2色覚の画像を線形補間するシミュレーション強度も設定できるようにした．

色変更は，Adobe Pixel Benderで記述したマイクロコードをGPUのFragment Shaderで実行し，リアルタイムで3動画像同時にシミュレーションが可能である．その他の部分は Adobe Inc.のActionScript 3.0で記述した．Adobe Flashが組み込まれたブラウザがあれば，パソコンや機器の機種に関わらず動作する．

このソフトウェアは，2010年６月4日にインターネットで一般公開した（図40）．

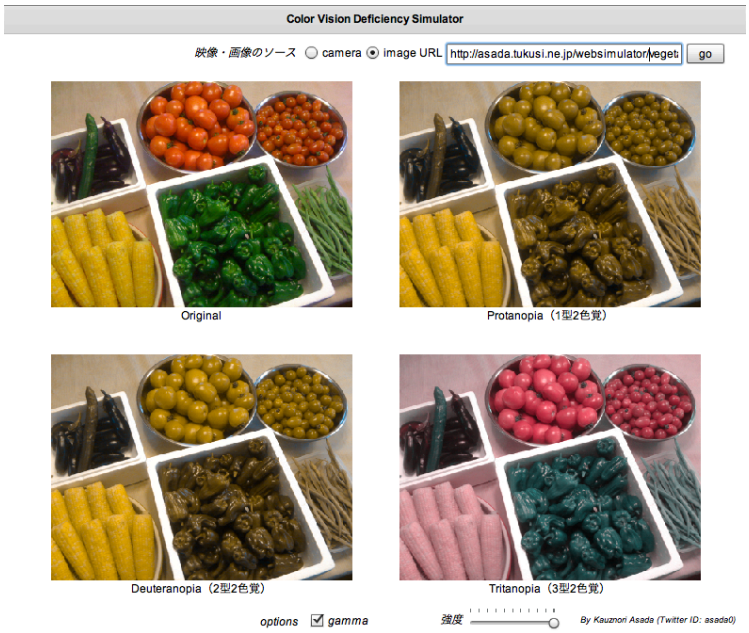


図40　色覚体験ツール「色のシミュレータ・ウェブ版」．画像ファイルの静止画像またはウェブカメラの動画像から，リアルタイムで，1型色覚，2型色覚，3型色覚のシミュレーション画像を作成し，同時にすべて表示することができる．
http://asada.tukusi.ne.jp/websimulator/

7.3.　色覚体験ツール「色のシミュレータ」

本研究のシミュレーション手法を携帯機器上に実装した色覚体験ツール「色のシミュレータ」を開発し，そのソフトウェアを公開した（図41）．さまざまな国の人々が使用可能であるように日本語および英語に対応し，多くの人々に色覚に関する興味を持ってもらうため無償で提供することとした．

2010年8月25日に，Apple Inc.のiTunes Storeに登録申請を行い，2010年９月1日に承認され，同日世界中のユーザに向けて配布が開始された．また，本ソフトウェアのウェブサイト（図42）を日本語および英語で作成し，ソーシャルメディアTwitterに「色のめがね」と共通の公式アカウントを，Facebookにも「色のめがね」と共通のファンページを設け関連情報を公開している．

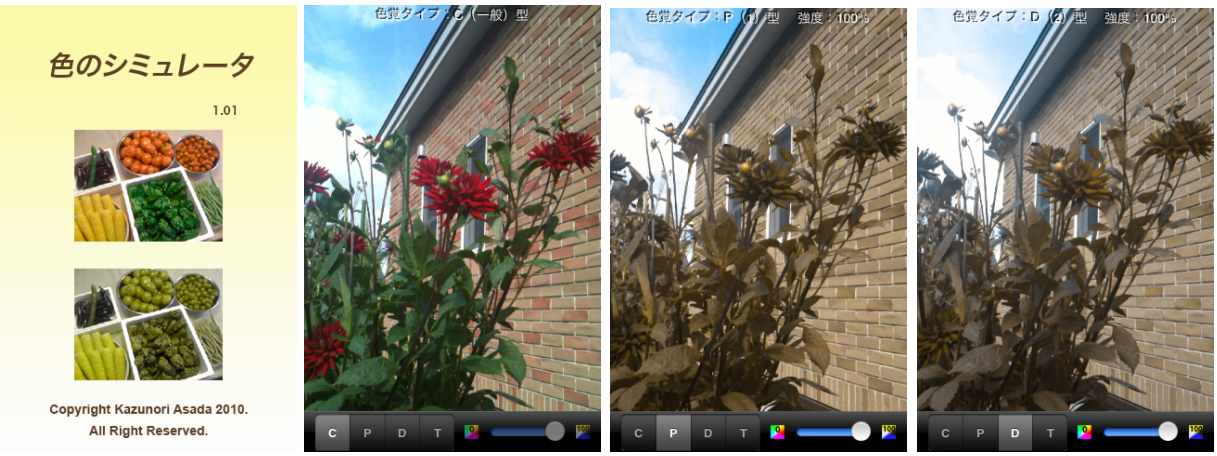


図41　色覚体験ツール「色のシミュレータ」．左から，立ち上げ画面，正常色覚（オリジナル）の画像の表示画面，1型色覚のシミュレーション画像の表示画面，2型色覚のシミュレーション画像の表示画面．

「色のシミュレータ」配布サイト

Apple iTunes Store :
http://itunes.apple.com/jp/app/id389310222?mt=8

「色のシミュレータ」ウェブサイト：

http://asada.tukusi.ne.jp/cvsimulator/

Twitter公式IDとFacebook Fan Pageは
「色のめがね」と共通

図42　色覚体験ツール「色のシミュレータ」のウェブサイトと関連URL.

8. 実験と評価

色覚異常者にとって識別困難な対象に対し提案した色変更手法が正しく機能するか，および提案手法を搭載した色覚補助ツールが期待される効果を発揮するかを確認するため，実験と評価を行う．また色覚補助ツール，色覚体験ツールの社会性を評価する．

8.1. 画像による効果の確認

色覚補助ツールを生活現場で利用するシーンを想定して，現実の対象物がどのように見えるか確認した．対象物は，人工物と自然物とし，人工物は石原式色覚検査表（以下「石原表」と呼ぶ）を，自然物は花壇の花（以下「花壇」と呼ぶ）を選択した．

画像による実験で対象として選んだ石原表は，色覚異常を持っているか否かの簡易検査に数多く利用されており，有効性が高いとされている．石原表に書かれている文字が判別できるかどうかは，提案手法の効果を確認する良い方法であると考える．室内で人工的な印刷物を見るシーンは日常生活の中でも数多く存在し，実験対象として適当であろうと考え選択した．また，花壇の花は，1型および2型の色覚異常者にとって混同しやすい赤と緑の組み合わせを含んでいることから，緑の葉が繁る中で咲いている赤い花は，屋外で見る混同しやすい自然物の例として適当であろうと考え選択した．

8.1.1. 実験1：シミュレーション画像による実験

まずはシミュレーション機能を使って，提案手法の効果を確認した．石原表は自然光の入る明るい室内，花壇は日中曇りの屋外で実験を行った．携帯機器に色変更機能を実装した色覚補助ツールを使用して， 内蔵カメラを通じて両対象の色変更前の画像，色変更後の画像およびそれぞれの2色覚シミュレーション画像を得た．

図43に石原表に対する結果を示す．上段は正常色覚者の見る画像，下段は2色覚者の見るであろう（2色覚シミュレーションによる）画像である．上段，下段とも，左から色変更前の画像，赤付近の色ゾーンの明度変更画像，同じ色ゾーンの色度変更画像である．2色覚シミュレーション画像から，2色覚者は，石原表の色変更前の画像の文字が判別できないであろうこと，また色変更後は2色覚者も正常色覚者と同様に文字が判別できるであろうことがわかる．

図44に花壇に対する結果を示す．図43と同様，上段は正常色覚者の見る画像，下段は2色型色覚者の見るであろう画像である．上段，下段とも，左から色変更前の画像，赤付近の色ゾーンの明度変更画像，緑付近の色ゾーンの明度変更画像，および赤付近の色ゾーンの色度変更画像である．花壇においても石原表と同様，2色覚者はオリジナル画像では赤い花と周辺の緑がすぐには判別できないが，色変更後は判別可能であろうことがわかる．

8.1.2. 実験2：色覚異常の被験者による実験

つぎに，1型2色覚，1型異常3色覚，2型2色覚，2型異常3色覚の各1名，合計4名の被験者（何れも色覚精密検査を行った者）による実験を行った．本研究の色変更手法は2色覚者の知覚に基づいたものであるが，異常3色覚者に対する効果をも知るため，異常３色覚者を被験者に含めた．

石原表および花壇の色変更前の画像に対し，室内蛍光灯照明のもとで，実際に色覚補助ツールを使用して色変更を行いそれを被験者に見てもらった．

実験の結果，石原表ではすべての被験者において，シミュレーション結果と同様の結果が得られた．花壇では1型と2型の2色覚者の2名は，色変更前は赤い花と周辺の緑が混同し花が見えにくかったが，色変更後ははっきりと見えた．1型と2型の異常3色覚者の2名は，色変更前も赤い花は見えたが，色変更後はよりはっきりと見えた．

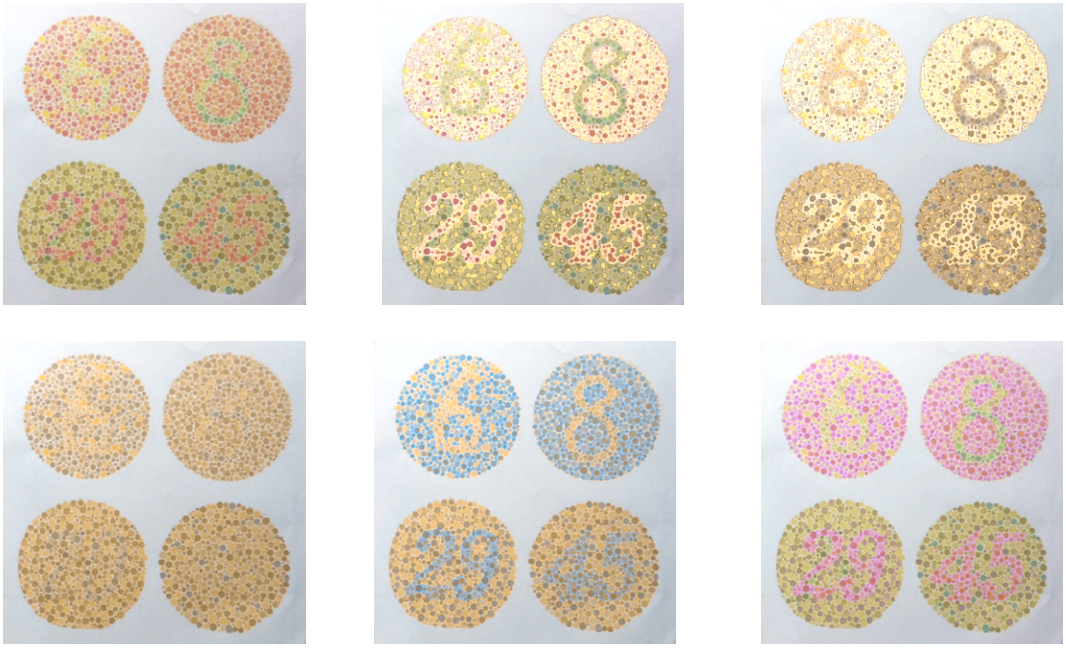


図43　実験1，実験2で使用した石原式色覚検査表の画像．上左：オリジナル．上中央：赤付近の色ゾーンの明度を高めた．

図44　実験1，実験2で使用した花壇の花の画像．上左から右方向にそれぞれ，オリジナル．赤付近の色ゾーンの明度を高めた．緑付近の色ゾーンの明度を高めた．赤付近の色ゾーンの色度を変えた．下段は，上段の画像の2色覚シミュレーション画像．

8.2. 色票による効果の確認

1型2色覚，1型異常3色覚，2型2色覚，2型異常3色覚の各1名の合計4名の被験者（何れも色覚精密検査を行った者）による3つの色弁別実験を行った．被験者には，事前に色覚補助ツールの基本原理と操作方法を説明し，理解してもらった．実験中の色覚補助ツールの操作はこちら側で行った．実験には，財段法人日本色彩研究所が発行する特殊印刷色紙199色組「新配色カード199a」（図45）を使用した．「新配色カード199a」の主な色票の色は付録Aの付表1に示す．

8.2.1. 実験3：カテゴリカルカラーへの分類

人間は網膜にある3種類の錐体の出力を脳に伝え，最終的に脳内において色を知覚していることは2章で述べた．色は大脳中枢でおおまかにいくつかのグループにまとめられ，カテゴリーを形成している．このような知覚をカテゴリカル色知覚といい，カテゴリーの色はカテゴリカルカラーという．このような生理学上の仕組みにより，異なるカテゴリーの色は弁別がしやすいという特徴がある．言語や文化が違う多くの人が共通に持っている基本色は，白，黒，赤，緑，黄，青，茶，紫，ピンク，オレンジ，灰色の11色であることが知られている[15]．

そこで，これらの11色のカテゴリカルカラーに対し，提示された色がどのカテゴリカルカラーに属するか分類する実験を行った．実験は室内において，D_{65}光源の照明の元で行った．照度は500lxであった．「新配色カード199a」を3cm四方に切った正方形の色票を使用した．色票は，白，黒カテゴリーは各1種類，その他の9カテゴリーはそれぞれ色相，明度，彩度が異なる4色が印刷された各4種類の合計38種類を使用した．使用した色票を表7に示す．

各カテゴリカルカラーに属する色の色票の中から，彩度が高い1色を選び，カテゴリカルカラーの代表色とした．代表色を上下13cmの間隔を空けて貼った白い紙を作業シートとした．

被験者に，作業シート上で色票を分類する作業を行ってもらった．代表色も含む全38枚の色票をランダムに並べたものを渡し，代表色と同じカテゴリカルカラーと感じられる色票を代表色の近くに並べてもらった．

まず1回目は色覚補助ツールを使用せずに普段通りの見え方で実験を行い，2回目は色覚補助ツールを操作しながら1回目に分類した色票の場所で誤っていると思われる箇所の修正を行ってもらった．

結果を表8に示す．実験の結果，色覚補助ツールを使用せずに色票をカテゴリカルカラーへの分類を行うと，1型2色覚者および2型2色覚者は，多くの色のカテゴリーを誤分類した．1型2色覚者は，明度が低い灰色をピンクに，こい赤と茶は灰色と分類し，2型2色覚者は，茶を緑に，オレンジを黄に分類しているのが目立った．

提案手法を実装した色覚補助ツールを使用すると，2色覚者の誤分類は大幅に減少し，1型2色覚者は23個から7個に，2型2色覚者は12個から2個になった．3色覚者でも誤認識が減少し，すべての被験者でカテゴリカルカラーへ分類の精度が高まることがわかった．

全被験者に共通して，やわらかい赤とうすい紫をピンクに分類，明るい黄赤を黄に分類する誤分類が見られた．

図45　実験3，4，5で使用した色票．新配色カード199aを一辺が3cmの正方形に切って使用．

表7　実験3で使用した色票とカテゴリカルカラーへの分類．

カテゴリー	1		2		3		4	
赤	dp2		v1		v2		sf2	
緑	dp12		v13		v12		lt12	
黄	v7		v8		b8		lt8	
青	dp18		v18		v17		lt18	
茶	BR-7		BR-5		BR-2		BR-4	
紫	dp20		v21		v22		lt22	
ピンク	PI-4		PI-7		PI-6		PI-1	
オレンジ	v4		v5		v6		b6	
灰色	Gy-3.0		Gy-4.5		Gy-6.0		Gy-7.5	
白	W							
黒	Bk							

表8　実験3の結果．被験者が分類を誤った色票が，どのカテゴリカルカラーに分類されたかを示す．

色覚型	1型2色覚		1型異常3色覚		2型2色覚		2型異常3色覚	
カテゴリー	色覚補助ツール		色覚補助ツール		色覚補助ツール		色覚補助ツール	
	不使用	使用	不使用	使用	不使用	使用	不使用	使用
赤								
緑	sf2 v4 BR-4				BR-7 BR-5 BR-2 Gy-4.5			
黄	lt12	b6			v4 v5 v6		b6	b6
青	lt22 PI-4	dp20	dp20	dp20				
茶	Gy-3.0 dp12							
紫	v17 v22 dp18	PI-4	v12		dp18			
ピンク	Gy-4.5 Gy-6.0 Gy-7.5	sf2	sf2 lt22	sf2 lt22	sf2 lt22	sf2 lt22	sf2 lt22	sf2 lt22
オレンジ	v12 v7	v4	v7	v7				
灰色	dp2 v1 v2 BR-7 BR-5 BR-2	dp12			PI-4			
白								
黒					Gy-3.0		Gy-3.0	
誤分類数	22	6	5	4	12	2	4	3

8.2.2. 実験4：混同色の弁別

実験2，3と同じ4名の被験者による混同色の弁別実験を行った．まず「新配色カード199a」の中から，1型および2型の2色覚者が混同する可能性がある色の対を各13対選んだ．それらの色対を表9に示す．選択した色合計26枚の配色カードを3cm四方に切り取った色票を用意し，混同色対ごとに白い紙に10cmの間隔を空けて左右に貼った実験用紙を作成した（図46）．それら1型と2型各13枚の実験用紙を，室内でD_{65}光源の照明下で，被験者から80cm離れた場所から見てもらった．照度は500lxであった．

まず，色覚補助ツールを使用せずに実験用紙の2枚の色票を見比べ，2枚がどの程度同じに見えるかを，(1)まったく同じに見える，(2)ほとんど同じに見える，(3)とても似ている，(4)はっきりと違って見える の4段階で答えてもらった．次に，提案手法を実装した色覚補助ツールを使用して同じことを行った．

結果を表10に示す．実験の結果，色覚補助ツールを使用した場合，2型異常3色覚の被験者でこい青とこい紫みの青の弁別に効果が見られなかった1点以外は，すべての被験者がすべての混同色を弁別できるようになった．

2色覚では色覚補助ツールを使用ない場合と使用した場合で，大きく結果が異なった．1型2色覚者では，13個の混同色対において，そのすべてが (1)まったく同じにみえる または (2)ほとんど同じにに見える だったのが，色覚補助ツールを使うとすべて (4)はっきりと違って見える になった．2型2色覚者では，13個の混同色対中の10個において (1)まったく同じにみえる または (2)ほとんど同じにに見える だったのが，色覚補助ツールを使うとすべて (4)はっきりと違って見える となった．

表9　実験4で使用した混同色対.

色覚	番号	混同色1：色名	混同色１：記号	混同色2：色名	混同色2：記号
1型	1-01	明るいピンク	PI-2	明るい灰みの青緑	ltg16
	1-02	明るい紫	lt22	明るい青緑	lt16
	1-03	うすい黄緑	p10	うすい黄赤	p6
	1-04	うすい緑	p12	うすい黄みの赤 (肌色)	p4
	1-05	あざやかな黄	v8	あざやかな黄緑	v9
	1-06	やわらかい黄緑	sf10	やわらかい黄赤	sf6
	1-07	暗い灰みの黄赤 (こげ茶)	BR−7	暗い赤 (茶)	dk2
	1-08	暗い青緑	dk14	こい赤紫	dp24
	1-09	あざやかな黄赤	v5	こい黄	dp8
	1-10	明るい青緑	b16	明るい紫	lt20
	1-11	明るい青	b18	明るい紫	b20
	1-12	こい青	dp18	こい紫	dp22
	1-13	くすんだ青	p18	ピンク	PI-1

色覚	番号	混同色1：色名	混同色１：記号	混同色2：色名	混同色2：記号
2型	2-01	あざやかな黄赤	v4	こい黄	dp8
	2-02	明るい紫	lt22	明るい灰みの青緑	ltg16
	2-03	あざやかな青紫	v19	あざやかな青	v18
	2-04	こい紫	dp20	こい青	dp18
	2-05	あざやかな黄緑	v11	灰みの黄赤（黄土色）	d6
	2-06	あざやかな緑	v12	灰みの黄赤（赤みの茶）	d4
	2-07	こい緑	dp12	灰みの赤紫	d24
	2-08	明るい黄赤（肌色）	lt6	明るい黄緑	lt10
	2-09	明るい黄赤（オレンジ）	b6	明るい黄緑	b10
	2-10	あざやかな赤みの黄	v7	あざやかな緑みの黄	v9
	2-11	うすいピンク	PI-1	うすい青緑	p14
	2-12	明るい青緑	lt16	明るい紫	lt20
	2-13	こい赤紫	dp24	灰みの黄赤（こげ茶）	BR-2

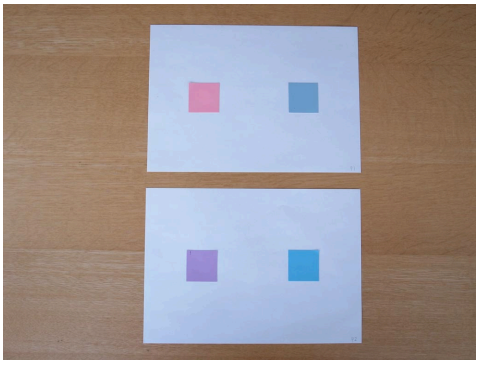


図46　実験4で使用した実験用紙.

表10　実験4の結果.　1「まったく同じに見える」を ◎, 2「ほとんど同じに見える」を ○, 3「とても似ている」を △, 4「はっきり違って見える」を ×として表示.

1型混同色対	1型2色覚		1型異常3色覚		2型混同色対	2型2色覚		2型異常3色覚	
	色覚補助ツール		色覚補助ツール			色覚補助ツール		色覚補助ツール	
	不使用	使用	不使用	使用		不使用	使用	不使用	使用
1-01	○	×	×	×	2-01	○	×	×	×
1-02	○	×	×	×	2-02	◎	×	×	×
1-03	◎	×	○	×	2-03	◎	×	×	×
1-04	◎	×	△	×	2-04	◎	×	△	△
1-05	◎	×	△	×	2-05	◎	×	△	×
1-06	◎	×	△	×	2-06	△	×	×	×
1-07	○	×	○	×	2-07	○	×	×	×
1-08	◎	×	△	×	2-08	○	×	×	×
1-09	◎	×	×	×	2-09	△	×	×	×
1-10	◎	×	△	×	2-10	○	×	△	×
1-11	◎	×	○	×	2-11	×	×	×	×
1-12	◎	×	△	×	2-12	○	×	×	×
1-13	◎	×	×	×	2-13	○	×	×	×

8.2.3.　実験5：混同色と色名の関連づけ

実験3，4と同じ4名の被験者により，混同色と色名を関連づける実験を行った．実験対象の混同色は実験4と同じとした．実験用紙は実験4で使用したものを再度利用した．実験は室内のD_{65}光源の照明下で行った．照度は500lxであった．

まず被験者に，これから見せる2色の混同色は何色と何色であるのかを色名で知らせてから，実際に混同色対が貼られた紙を80cm離れた場所から見てもらった．色名を知らせる順番はランダムとし，2枚の色票の内どちらが何色であるかをあらかじめ察することができないようにした．

色覚補助ツールを使用しながら左右に2枚の色票が貼られた実験用紙を見て，あらかじめ知らせた2つの色名がそれぞれ右であるか左であるかを示してもらった．

結果を表11に示す．実験の結果，1型異常3色覚者の暗い赤紫と黄みの暗い灰色，2型2色覚者のこい青とこい紫みの青が言い当てられなかった以外は，すべての被験者において，色票と色名の対応を正しく言い当てることができた．

表11　実験5の結果．色表の色が言い当てられた色対は ○，言い当てられなかった色対は ×を表示．

1型混同色対	1型2色覚	1型異常3色覚	2型混同色対	2 型2色覚	2型異常3色覚
1-01	○	○	2-01	○	○
1-02	○	○	2-02	○	○
1-03	○	○	2-03	○	○
1-04	○	○	2-04	○	×
1-05	○	○	2-05	○	○
1-06	○	○	2-06	○	○
1-07	○	×	2-07	○	○
1-08	○	○	2-08	○	○
1-09	○	○	2-09	○	○
1-10	○	○	2-10	○	○
1-11	○	○	2-11	○	○
1-12	○	○	2-12	○	○
1-13	○	○	2-13	○	○

8.3. モニター実験による所感

8.3.1. 色覚補助ツール

1型2色覚者1名，2型2色覚者2名，1型異常3色覚者2名，2型異常3色覚者1名の合計6名（何れも色覚精密検査を行った者）の被験者に，日常生活の中で3日間自由に色覚補助ツールを使用してもらった後，アンケート調査を行った．

表12　色覚補助ツールのモニター実験で得られた所感（抜粋）．

色認識や色弁別の向上など	
人工物	テレビの天気番組の黄緑と黄色の色分けがわかった．
	黒地に赤で書かれているロゴマークや，映画ポスターに描かれている赤い炎がよく見えた．
	絵画を見たときに自分には見えていなかった色が含まれていることを知った．
	シャツのストライプ柄に色が多く使われていることを知った．
	魚や昆虫など図鑑を見たときに色が判別できてうれしかった．
	広告などの緑と赤の文字やマークが見分けられた．
	絵画を見たときに黄土色と黄緑とオレンジや薄いピンクや水色，淡い色使いなどがわかった．
	絵画を見たときに自分には混同して見えていない色が含まれているのを知った．
	洋服店で，いつもは見分けられない緑と茶色の服を見分けて買うことができた．
	バス路線図を見て，色分けがされていることに気付いた．これまではまったく気付かなかった．
自然物	道を歩いていて，これまで黒い雨だれだと思っていたものが赤サビだったとわかって驚いた．
	赤に見える植物の葉が，本当は赤でないことがわかった．
	緑の芝生の中で，どの部分がより濃い緑かがわかった．
	同じに見えていた自然を撮影したカラー写真2枚に含まれる色の差が読み取れた．
	これまで見分けられなかった熟したトマトと未熟なトマトの色の差がわかるようになった．
問題点など	
畳や木の色の微妙な違い，オレンジと茶色の差がよくわからない．	
夕方の街頭で，黄緑とオレンジの違いがわからない．	
黄色い服の陰の部分がオレンジと混同する．	
「色が違う」という認識はできるが「何色なのか」はわからない．	
元々判別のつかないグラデーションを「色のめがね」を用いて見た場合，変化している部分が実際に何色なのかわからないため，何が変化しているのかを理解できず悩んだ．	
気付いた点，感想など	
街の中の色づかいは，想像していた以上に赤を多用していることを知り，とても驚いた．	
自分が植物，特に葉が好きなのは，もしかしたら2型だからかもしれないと改めて思った．	
見分けられなかった色がわかるようになって，更に多くの物の色を見てみたいという欲望が芽生えた．	
「色のめがね」（と「色のシミュレータ」）を使って人と色のコミュニケーションが図れたのは本当にうれしかったし，色弱を友人知人が理解してくれたことに感動した．こんなに色について友人と話せたのは初めてだった．	
世の中に見えている色が自分の意識以上に多く，また思っていた色が実際と違うことがわかったのは大きな変化だった．うれしい反面，こんなにも彩られた世界を見れていなかったのかと思うと，知ってしまったことが少し残念だった．でも自分自身が色に対して前向きに接することができるようになれたと思う．	

その結果（抜粋）を表12に示す．被験者の所感から，おおむね期待通りの効果があることがわかった．また，黄付近で混同色の弁別には不十分な部分がある，環境光によってはうまく色弁別できないことがあるなど，若干の問題点も見つかった．

8.3.2. 色覚体験ツール

デザインや印刷に関わる正常色覚者4名に色覚体験ツールを使用してもらい，アンケート調査を行った．

その結果（抜粋）を表13に示す．全員が，正常色覚者とは異なる色の見え方をする人が存在することについて知識を持ち合わせていたが，色覚体験ツールを使用して色覚異常者の色の見えを体験したところ，事前の想像とは見え方が大きく異なっていたという人が多かった．また，全員が，今後はこのようなツールを使用して色を確認しながら制作活動を行いたいと回答した．

表13　色覚体験ツールのモニター実験で得られた所感（抜粋）.

グラフィックデザイン全般（色を多用したパンフレット・チラシ・ダイレクトメール・ポスター等）とその印刷を手がけている. とても手軽に簡易チェックができ大変便利で汎用性が高い．クライアントと打ち合わせをしている時など，気になるところをその場で確認したり，人へ説明する時などに使用している. 色覚異常者の見え方は想像はしていたものの，画像でリアルタイムに表現できてより理解が深まったように思う．特にシミュレーション強度を設定し，2色覚者と正常色覚者の中間の見えを表示する機能は他のツールにはなく便利.
服飾雑貨，バッグなどのデザインを手がけている. 商品の素材，カタログ，ウェブサイトのデザインなどで多様な色を組み合わせて使っている. 全く異なった色の見え方をしている人が少なからずいることを忘れがちなデザイナーは多い．携帯機器で動作し，いつでも手元にあってすぐに使えるツールは便利. 色覚異常者の見え方は理解はしていたものの，実際には体感したことがなかった．実際にこのツールで見ると想像とはかなり違っていた．色覚異常の強度によっても見える世界は随分違うことを確認した. もし今後大量に生産される商品のデザインを手がけることがあれば，必ずこのツールで色の見え方の確認を行いたい. 全ての色覚タイプに対応できるように色をデザインすることはとても難易度が高く，自由度が低くなってしまう．もし，「日本人に多いのはこのタイプ」などの傾向があるならばデザインに反映したい.
化粧品会社の肌診断機のソフトウェア・ハードウェアのデザインや政府機関や美術館のウェブデザインなどを手がけている. 色彩を扱う職業に携わる者にとって，異なる視点と気づきを与えてくれる啓蒙ツールだと思う．このツールで自分が制作した作品がどう見えるかのチェックしたが，1型や2型では見え方が大きく異なる部分を発見し非常に参考になった．多くの情報を色差によって同時に見せなければならなかった作品では，コントラストの変化により色覚異常者が見ても情報が識別できるであろうことがわかり安堵した. サインのようにあらゆる人が即座に認識できなければならないものから，微妙な色彩バランスそのものが重要な意味を持つコンテンツまで，情報伝達のためのデザインにも幅広い目的・対象がある．後者は微妙かつ精緻な色彩バランスが必要であると共にクライアントから求められるハードルも非常に高いため，現時点では色覚異常を考慮して色彩計画に変更を加えることは難しい．しかしデザイナーがこのような見え方があることを認識しておく必要性に疑いの余地はなく，非常に重要なツールになり得ると思う. 色覚異常については聞いたことはあったが，実際にどのように見えるのかは解らなかった．他者の不自由を想像するだけではやはり理解に限界があり，啓蒙という観点でもこのようなツールの果たす役割や意義は大きい. 色覚異常者が見てもほとんど変化や支障がないタイプのデザインが可能なこと，コントラストがひとつのキーであることはわかり大変参考になった.
主にウェブデザインを手がけている. 普段多色は使用せず，3色程度に絞ることが多いが，イメージ画像を作成するときにグラデーションを用いるので結果的に多色になる．また，女性向けのウェブサイトは多色にすることが多い. このツールを使用して世界観が広がった．ウェブデザインにはユーザビリティが必要であり，特に商品などを扱う場合は重要な観点のひとつだ. 色覚異常者の見え方は，自分の想像とかなり差があったというよりも，想像を超えていた．色の認識がこれだけ違うと，「遠近感が掴みにくい」，「物が識別がしにくい」，「色の変化による気分のコントロールがしにくい」ことに気付いた. 取り扱う商品によって色の重要性も異なるが，このツールは非常に貴重なツールになると思う．BtoCウェブサイトでは特に重要である.

8.4. 関連研究・関連製品との比較

本研究の関連研究・関連製品についての詳細は3章で述べたが，改めて本研究で提案する色変更手法，色覚補助ツール，色覚体験ツールを関連研究・関連製品と比較する．

8.4.1. 色変更手法

表14に提案する色変更手法と他の関連研究との比較を示す．提案手法は，計算量が他の手法よりも少なく，それに応じて速度も群を抜いて速いことが大きな特徴となっている．また，利用できる画像の種類に制限がなく，色変更後の画像の自然さを保つことができるというメリットがある．反面，混同色が存在するか否かの判定，および混同色の同定を行わず，色変更前の画像と色変更後の画像（または，他のゾーンの色変更画像）の視差を利用するため，作成した複数の画像を順次見るための操作と時間が必要になる．また，色変更した結果を印刷するなど，最終的に静止画像を得たい場合には使用することができないというデメリットがある．

表14　色変更手法の関連研究との比較.

	提案手法	Ichikawaら[19]	Rascheら[20]	石田ら[22]
効果が得られる画像の種類	人工物と自然物	色数が限られた人工物	人工物と一部の自然物	色数が限られた人工物
色変更の計算量または速度	画素数に比例した時間がかかるのみ．計算はピクセルごとに独立しているので計算量が少なく高速.	使用する色数に依存．ニューラルネット構築のため非常に多くの計算が必要.	使用された色すべての距離の計算が必要で計算量が多い．（速度：317色画像で6.91秒，11,231色画像で8,617秒．2.8- GHz Xeon使用時）	クラスタリングのために全ピクセルのスキャンが必要．更に1ピクセルの色変更する毎に周囲のピクセルの混同色の検出が必要なため多くの時間が必要.
色変更後の画像の自然さ	高い	不定	不定	高い
他の手法と比較した場合の利点（上記以外）	正常色覚者にも色覚異常者にも違和感が少ない. 見たい部分にフォーカスを当てた色変更が可能.	色数が少なければ一枚の画像で多くの混同色が識別できる.	色数が少なければ一枚の画像で多くの混同色が識別できる.	正常色覚者と色覚異常者の双方に違和感が少ない画像を作成可能.
他の手法と比較した場合の欠点（上記以外）	視差を利用するため，複数の画像が必要．それらを見る時間が必要. 混同色が存在しないときでも色変更してしまう.	混同色が多ければ，一部しか識別できない.	混同色が多ければ，一部しか識別できない.	色変更不可能な画像がある.

8.4.2. 色覚補助ツール

表15に提案する色変更手法を搭載した色覚補助ツールと他の関連製品との比較を示す．各ツールの詳細は表6参照のこと．提案する色覚補助ツールは，色名や数値で色の認知を行うことができず，色覚異常者が知覚する色とスライダーの位置で色を予測しなければならない点が他の製品より劣っている．幅広い画像種や色域に対応すること，変更後の画像の自然さ，ターゲットの選択性，カスタマイズ性や対話性の高さなどの点では他の製品より優れている．中でも，さまざまな場所に持ち運ぶことができる携帯性とリアルタイムに色を変更し直ちにユーザに色を知らしめるリアルタイム性に優れていることが大きな特徴と言える．

表15　色覚補助ツールの関連製品との比較．

	提案ツール	Color Blind Aid	Daltonize	ColorAttendant
対象	1型，2型，3型の2色覚者と異常3色覚者	1型，2型の2色覚者と異常3色覚者	1型，2型の2色覚者と異常3色覚者	すべての人
色変更可能な画像	動画像	動画像	静止画像	色変更機能なし
色変更可能な色域	動画像に含まれるすべての色	赤と緑の色相付近の色のみ	静止画像に含まれるすべての色（ただし一枚の画像では一部の混同色しか変更できない）	色変更機能なし
色弁別の効果	高い	ベタ色に塗りつぶすため高い	画像に依存	色変更機能なし
色変更画像の自然さ	自然	不自然	不自然	色変更機能なし
色変更ターゲットの選択性	高い	低い	低い	色変更機能なし
携帯性	高い（携帯機器で動作）	高い（携帯機器で動作）	低い（パソコンで動作）	高い（携帯機器で動作）
リアルタイム性	非常に高い（15 fps※ 以上）	高い（1 fps）	なし（約12秒/画像）	少ない（5〜10秒程度）
ユーザ特性や使用環境に応じた設定が可能か？	可能	色領域の幅のみ可能	ダイナミックレンジの変更量のみ可能	色名表示方法のみ可能
色名や数値で色認識が可能か？	ある程度可能	不可能	不可能	文字と音声で可能
色混同により認識していない対象の発見が可能か？	可能	対象の色が赤か緑なら可能な場合がある	場合によっては可能	不可能
設定の保存，呼び出しが可能か？	可能	不可能	不可能	可能
価格	無償	無償	有償	無償

※frame per second

8.4.3. 色覚体験ツール

表16に提案する色覚体験ツールと他の関連製品との比較を示す．各ツールの詳細は表6参照のこと．携帯性に優れた色覚体験ツールは他に類がなく，本ツールの大きな特徴である．携帯可能であることで日常さまざまなシーンで色覚を体験することができる．また，動画像をリアルタイムで色覚シミュレーション可能な製品も他には見当たらず，新規性が高い．更に，他の製品では，シミュレーション画像の作成に10秒以上かかるものもあり，1/15秒以下で画像作成が可能な本製品の速度は抜きん出ている．

また，他の製品に，本提案手法でサポートしてない異常3色覚や1色覚のシミュレーションが可能と表示しているものがあるが，異常3色覚のシミュレーションは本提案のシミュレーション強度によるものと同等の手法であろうと推察される．また，異常3色覚はその色の見えの程度がさまざまであるに対し，これらの製品では1種類の画像を表示するのみであり，本提案のシミュレーション強度のような細やかなパラメータ設定は行うことができない．

表16　色覚体験ツールの関連製品との比較．

	提案ツール	Vischeck	ColorOracle	Color Vision tool
シミュレーション可能な色覚タイプ	1型，2型，3型の2色覚（強度設定により他のツールの異常3色覚と同等）	1型，2型，3型の2色覚	1型，2型，3型2色覚と異常3色覚	1型2型共通，3型の2色覚と異常3色覚．1色覚．
対象	カメラから取り込んだ動画像（ウェブ版は画像ファイルも可）	画像ファイルまたはウェブサイト	パソコンのデスクトップ（静止画像のみ）	あらかじめ決められた画像10数枚
速度	15 fps以上	約12秒/画像	ほぼリアルタイム	約12秒/画像
携帯性	高い（携帯機器で動作）	低い（パソコンで動作）	低い（パソコンで動作）	低い（ウェブ上で動作）

9.　社会との関わり

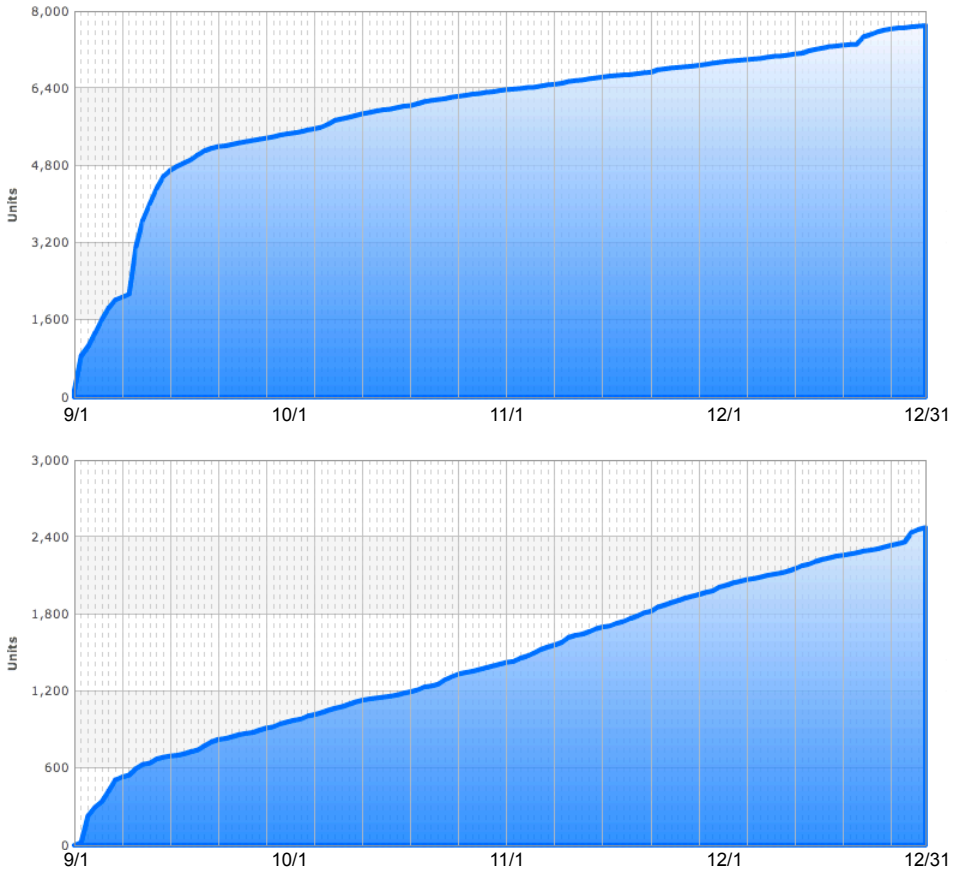
公開した色覚補助ツールと色覚体験ツールの社会との関わりについて述べる．

9.1.　ダウンロード数

色覚補助ツールおよび色覚体験ツールの公開日（「色のめがね」は2010年8月31日，「色のシミュレータ」は2010年9月1日）より2010年12月31日までの4ヶ月間に，ソフトウェアを公開しているiTunes Storeからダウンロードされた数の推移を図47に示す．公開直後には一番多くのダウンロードがあり，その後は徐々に減少しているが，コンスタントに一定量のダウンロードがあることはわかる．また，Twitterなどのソーシャルメディアやイベントやマスコミ等で紹介された日にはダウンロード数が上がっている．

主に色覚異常者が使用する「色のめがね」の方がダウンロード数が多いが，公開から日が経つにつれて，主に正常色覚者が使用する「色のシミュレータ」のダウンロード数が伸びてきていることがわかる．

2010年12月31日までのダウンロード数は，「色のめがね」が7,698本，「色のシミュレータ」が2,465本であった．この両方を合算した10,163本という数字は，当初想像していたよりかなり多い．



国	DL数
日本	8,191
米国	623
中国	353
香港	125
フランス	109
イタリア	95
ドイツ	73
イギリス	72
スペイン	59
オーストラリア	49
カナダ	42
台湾	34
シンガポール	22
ブラジル	18
ロシア	16

図47　色覚補助ツールと色覚体験ツールのダウンロード数．
左上：色覚補助ツール「色のめがね」，左下：色覚体験ツール「色のシミュレータ」，右：ダウンロード数が多い上位15カ国の国別ダウンロード数（「色のめがね」と「色のシミュレータ」の合計数）．

9.2. 投稿されたレビュー

色覚補助ツールおよび色覚体験ツールのユーザから，Apple Inc.のiTunes Storeに投稿されたレビュー（2010年12月31日まで）を表17と表18に示す．iTunes Storeのレビュー欄以外にも，ツールのウェブサイトやソーシャルメディアなどを通じて，多くの人から直接・間接に感想が寄せられた．全般的に評価が高く，好意的に受け止められている．

表17　iTunes Storeで「色のめがね」に寄せられたユーザレビュー．星による評価は全13個，5つ星：11，4つ星：1，2つ星：1．ポジティブレビュー率（3つ星以上）は92.3%．

色覚に対する正しい認識をもたらす素晴らしいアプリ by **哲嗣 古川** on 31-Aug-2010 version 1.0 更なる進化を期待します
実にすばらしいツールだとおもう by **igachan** on 31-Aug-2010 version 1.0 すばらしい．現実世界のビデオ画面に重なって苦手な色の見分けができるレイヤーがリアルタイムに表示される． この手のツールは 　有料の物が多い．速度が遅い．OSのバージョンアップ対応してくれない 　落ちやすい．役に立たない物もある． というのが問題だった． 無料なので，言いにくいことであるが，長くサポートをよろしくお願いしたい． マニュアルをよく読んで設定を変更すれば，更にすばらしい使い方ができるので，ただいまチャレンジ中です．
素晴らしい!! 色覚異常の方は是非!! by **あんとしあにん** on 02-Sep-2010 version 1.0 私は第二色覚異常で，幼少の頃から赤系の色の見分けができませんでした． 日常生活に支障をきたすまでではありませんが，常に自分の目に映るものは 他人とは見え方が違うのだと，劣等感と似ているような複雑な感情でした． しかし，偶然にもこのアプリに出会い実際に使用してみて，まさに世界が変わりました． 健常な瞳を持っている人からすればあまり意味を成さないかもしれませんが，私のような色弱者が使うと見たものの本当の姿が画面に現れます． これは初めて起動したときには本当に感動しました!! しかも，無料という善良さに心打たれました… 大いに応援しますので，これからも頑張って下さい． 最後に… 私に色をありがとう
テクノロジーの未来の形じゃないでしょうか by **Orbit Rock** on 27-Sep-2010 version 1.01 赤系統の色が見え難いなど色覚に特徴がある方向けに，iPhoneのカメラを通して色の判別がしやすくなる為のツール，ですかね．iPhoneの様な多機能，高性能デバイスをハンディキャップを埋める用途に使うってのは先進的な試みではないでしょうか一つの未来ですよね．

初めて見る色の世界です
by **さぶろウ** on 26-Oct-2010 version 1.01

色覚異常を持っています.
このアプリを入れて山に行きました.
枯葉の中からはえる新芽.
岩と苔のコントラスト.
枝の先の赤い葉.
もちろん一般の人と同じ見え方ではないでしょうけど
初めて見る世界がいっぱいでした．感動しました.

便利です.
by **便利に使ってます** on 30-Oct-2010 version 1.01

赤緑色弱です.
満充電でLEDがオレンジ色から黄緑色に変わる携帯の充電が終わったかどうかの確認に常用してます.
初期設定がよくわかりませんでしたが，色のわかる人に教えてもらいながら設定しました.

ほかのレビューほど
by **いけじ** on 31-Oct-2010 version 1.01

感動しなかった.

今までにはないツール
by **marks_tani** on 06-Nov-2010 version 1.01

先日，何人かの色弱者に見ていただきましたところ,
皆さん，とても驚いていました.

色弱と一言で言ってもそのタイプはさまざまで,
感じ方も個人差があると思います.
このアプリ「色のめがね」は細かく設定もでき,
ご自分に合ったパターンで使用できますし,
とても便利なツールだと思います.

秀逸なAR活用事例
by **oriver_1978** on 12-Nov-2010 version 1.01

モバイルツールという身近な道具で，色覚特性の差異を理解できます．拡張現実ARの社会的システムへの展開として，本当に素晴らしい事例だと感じました.

True augmented reality! Extremely useful for colorblind people!
by **Nils B.** on Oct 31, 2010 version 1.01

Finally a colorblind helper app that does the color modifications in real time! Once I figured out the settings (which are admittedly a bit technical), this app does exactly what I need: it highlights green or red regions in the camera viewfinder in real time! The three presets are also helpful, though I think you have to switch to the settings menu(?) to make changes stick.

表18　iTunes Storeで「色のミュレータ」に寄せられたユーザレビュー．
星による評価は全5個，5つ星：3，4つ星：2．ポジティブレビュー率（3つ星以上）は100%．

これもいい by **igachan** on 31-Aug-2010 version 1.0 作者がtwitterで「色のめがね」と同時に掲載かもと言ってましたので，ふと見たらありました．動作の安定した，より正確な色覚シミュレータもとても有効だと思います．アフターぜひよろしくお願いします．
スゴイね by **カントリー Country** on 08-Sep-2010 version 1.0 同様というか，これよりも劣るであろう専用メガネが結構な値段で売ってることを考えると，これは画期的すぎる CUDOの認証が簡単にとれそうだな．
ユニバーサルデザインを考えるきっかけに by **ハマのbeckn** on 11-Sep-2010 version 1.0 非常に素晴らしいアプリです．星一つ減らしたのは，カメラのみな点です．写真フォルダの画像処理に対応していただけたら，満点です
色彩を扱うすべての方向け by **Orbit Rock** on 27-Sep-2010 version 1.01 色覚に特徴のある方が見てる世界を体験出来るツール，でしょうか．色彩を扱う職業の方やユニバーサルデザインに興味のある方は自分の作品製品を試しにチェックしてみては如何でしょうか
とても便利 by **marks_tani** on 06-Nov-2010 version 1.01 これは最近，最も使用するアプリになりつつあります． iPhoneはいつでも持ち歩くので， 気軽に気になった場面ではよく使用しています． カラーUDを誰かに説明する上でも， その場で簡単にシミュレーションを見せてあげられ， とっても便利です スクリーンショットも嬉しい機能． 必要であれば，撮影した画像をその場でメールにも添付ができます． もう一つ・・ 弱度のシミュレーションもスライダーを動かすだけで， 同様に再現されます． 今までにない画期的なツールだと思います．

9.3. マスコミやネット上での紹介

本研究については，新聞，雑誌等のマスコミやインターネットのblogなどでいくつか紹介された．そのうち，ある程度まとまった記事として紹介されたものを表19に示す．2010年11月9日に記事が掲載された日刊工業新聞では一面で紹介された．

また，色覚補助ツール「色のめがね」と色覚体験ツール「色のシミュレータ」は，Twitterに公式アカウントを，Facebookにファンページを作って情報を発信したこともあり，ソーシャルメディア，blogなどのインターネット上のメディアでも数多く取り上げられ話題となった．

Twitter上での，増井俊之慶應義塾大学環境情報学部教授と私の色覚と色覚補助ツールに関する一連の会話は，有志によりツイートまとめサイトのtogetterに投稿され，2010年9月4日から2010年12月31日までの4ヶ月弱で6,428ビューのアクセスを集めた．

表19　本研究に関する紹介記事（抜粋）．

媒体名	記事名
日刊工業新聞	慶大、多機能電話で色識別できる色覚障害者向けアプリ開発 http://www.nikkan.co.jp/news/nkx0220101109aaao.html
asahi.com	慶大、多機能電話で色識別できる色覚障害者向けアプリ開発 http://www.asahi.com/digital/nikkanko/NKK201011090015.html
月刊ニューメディア 2011年1月号[28]	【今月の表紙】 専門分野であるコンピューター、数学、バイオと今学ぶAR技術、デザイン学を生かして開発 - 浅田一憲 慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科後期博士課程 医学博士
週刊アスキー 2011年2月15日号[29]	え、それってどういうこと？ 第163回
POLAR BEAR BLOG	ARによる色覚サポートツール「色のめがね」 http://akihitok.typepad.jp/blog/2010/09/ar%E3%81%AB%E3%82%88%E3%82%8B%E8%89%B2%E8%A6%9A%E3%82%B5%E3%83%9D%E3%83%BC%E3%83%88%E3%83%84%E3%83%BC%E3%83%AB%E8%89%B2%E3%81%AE%E3%82%81%E3%81%8C%E3%81%AD.html
ソラノイロのブログ	iPhone アプリ「色のめがね」の伊賀流設定 http://hello.igachan.net/?eid=61
日刊目のニュース	札幌在住起業家が作成！「色のめがね」iPhoneアプリ http://www.daily-eye-news.net/news_irAq1HTUR.html
AppBank	色のめがね: 色覚異常をリアルタイムに再現できるAR（拡張現実）カメラ。無料。2674 http://www.appbank.net/2010/09/08/iphone-application/165643.php
iPhone女史	色のめがね｜見えにくかった色弁別をサポートしてくれる色覚ツールアプリをご紹介します☆ http://www.iphone-girl.jp/application-review/72776.html
主に札幌ではたらく株式会社恵和ビジネス社長のblog	盲導犬チャリティーCUDカレンダーと「色のめがね」 http://d.hatena.ne.jp/jwatanabe/20100927/1285590889
拡張現実ライフ	iPhoneアプリ「色のめがね」 http://d.hatena.ne.jp/akio0911/20100902/p3
togetter	iOSアプリ「色のめがね」と色覚に関する会話 http://togetter.com/li/47371

デジタル技術を背景とした新技術や新サービスの専門雑誌「月刊ニューメディア」の2011年1月号[28]は，「色のめがね」を使って花屋で色とりどりの花を見ている写真が表紙を飾り，記事でも「色のめがね」と「色のシミュレータ」を作った動機など浅田一憲のインタビュー内容と共に掲載された（図48）．

また，北海道文化放送のユニバーサルデザインの専門TV番組「石井ちゃんとゆく！」(http://www.uhb.co.jp/program/official/ishiichan/) では，2010年12月23日に「色のめがね」特集，2010年12月30日には「色のシミュレータ」特集が組まれ，2分間の番組枠すべてを使って本研究で開発したツール類の紹介と解説が放映された（図48）．放映後にはツール類のダウンロード数も上がり，多くの人に本研究を知ってもらう契機となった．

「週刊アスキー」の2011年2月15日号[29]には，慶應義塾大学メディアデザイン研究科修士課程出身のアナウンサー，進藤晶子さんとの対談が4ページに渡って掲載され，本研究を行った動機や研究内容，社会的な意義などについて話し合っている様子が詳しく紹介された．

図48　マスコミでの紹介例．
上：月刊ニューメディアでは表紙で紹介された．
左下：TV番組「石井ちゃんとゆく！」では2週に渡り放映された．
右下：週刊アスキーでは開発の経緯などが対談記事として掲載された．

9.4.　「CUD推進支援ツール」として推薦

2010年12月８日，本研究の成果である色覚補助ツール「色のめがね」と色覚体験ツール「色のシミュレータ」の両ツールが，特定非営利活動法人Color Universal Design Organisationと特定非営利活動法人北海道カラーユニバーサルデザイン機構の両機構から，「CUD推進支援ツール」として推薦を受けた（図49）．

両機構が企業や団体からの審査依頼を受けずに自主的にツールを推奨し，無償でCUDロゴマークの使用を認めた初のケースだということである．

特定非営利活動法人Color Universal Design Organisationの伊賀公一副理事長からは，以下の推薦の言葉をいただいた．

「当ソフトウェアのセットは一般色覚者と色弱者がこれまで共有しにくかった視覚情報世界を携帯機器によって簡易に相互理解しあうことに役立つ．一般色覚者にも色弱者にも，お互いにどのような世界を見ているかを疑似体験できることで，分かりにくい色づかいのチェックが可能でCUDを推進することに繋がる．本当に役に立つツールとしての機能を持ちながら利用者にコストを負担させないことは高く評価できる．」

特定非営利活動法人Color Universal Design Organisationは，長年精力的にカラーユニバーサルデザインの啓蒙活動を行い成果を上げている．世界的にも高い評価を受け，カラーユニバーサルデザイン活動の中心的な役割を担っている組織である．2010年12月には内閣総理大臣より「平成22年度バリアフリー・ユニバーサルデザイン推進功労賞　内閣総理大臣表彰」を受賞している．

そのような色覚異常について専門的な知識を持つ組織から評価され，CUD推進支援ツールとして推薦されたことは大変光栄である．

CUD
COLOR
UNIVERSAL
DESIGN
CUD 推進支援ツール
推薦状
浅田一憲　殿
「色のめがね」「色のシミュレータ」
は、特定非営利活動法人 Color Universal Design Organization（CUDO）の定める基準に達しており、CUD 推進支援ツールとして推薦します。
平成 22 年 12 月 8 日
特定非営利活動法人
Color Universal Design Organization
理事長　武者 廉平

図49　拝領したCUD推進支援ツール推薦状．

10. 考察

提案した色変更手法およびそれを実装した色覚補助ツールと色覚体験ツールの有効性，およびそれらが持つ社会性について考察する．

10.1. 色変更手法

実験1と実験2の石原表による実験では，すべての被験者が2色覚シミュレーションによる結果と同じく，字がはっきり読めたと答えており，その見え具合も非常に鮮明だったことに驚いていた．ほとんどの人がこれまでの人生の中で，色覚検査で何度も石原表を見るように言われ，しかし一度も文字が見えたことがなかったので，そこからはっきりと文字が浮き出してくることに最初は驚き，後にそれが感動に変わったようだった．石原表が対象の場合は，提案手法の効果が劇的であることがわかる．赤と緑を多用している石原表は，両者の属する色ゾーンの位置が大きく離れており，色ゾーンの幅を大きくすることにより同じ赤や緑内の細かい色の違いをすべて同じ色ゾーンに包含することができるため，字全体の色あるいは文字以外の部分の色が一斉に変わり，提案手法の効果が得られやすい対象であるためと考えられる．

実験1と実験2の花壇の画像の実験では，被験者によって元画像中の赤の花の見え方が違うようだった．赤い花は見えにくいことは共通していても，ほとんど1型2色覚者はほとんど存在に気付かないのに対して，2型異常3色覚者は花の存在自体は困難なくわかったらしい．色度一定・明度変更法により，赤付近の明度を上げた画像ではすべての被験者がはっきりと赤の花が見えるようになったと答えており，こい赤には効果が高いことがわかった．これはこい赤は波長が長く，L-錐体の機能が失われた1型色覚者には見えにくい色であること，また提案手法では色ゾーンの並びの一番端に赤付近のゾーンが存在するので，他の色とは独立して赤だけで色ゾーンとなること，こい赤の花は元々明度が低めなので，明度を大きく上げると元の色からの変化が大きい色となることなどが理由だと考えられる．

花壇の場合，おなじ色ゾーンを明度一定・色度変更法で色度を青方向に変更すると，色度一定・明度変更法により明度を変更した場合よりも更に赤い花の弁別がしやすくなった．これは赤と緑は1型と2型の色覚異常者にとって似たような色として知覚されるので，赤の明度を上げても画面全体が同じようなトーンとなりさほど目立たないのに対し，色度を青方向に変化させた場合は花の部分が大きく異なった色として知覚され，周辺の色との対比で目出つためではないかと思われる．しかし，色度を変えた場合，花自体の色が大きく変わるため，その対象によっては自然には存在しない色の花となり，不自然に感じてしまうこともある．このように色度一定・明度変更法と明度一定・色度変更法にはそれぞれ一長一短があり，目的に応じて使い分けたり，混合して利用すると効果的だと思われる．

実験3のカテゴリカルカラーへの分類では，1型と2型の2色覚者においては提案手法が非常に効果的であることがわかった．特に，赤，緑，茶，灰色，ピンクなどは混同色との弁別効果が高かった．これは，これらのカテゴリーカルカラーは，色空間上での色ゾーン

の位置が色射影面を挟んだ逆側に存在する別のカテゴリーカルカラーと混同しやすく，そのような場合，本提案手法では色変更の方向を逆にしているため，明度や色度が逆方向に変わり区別が付けやすくなるなるためではないかと考えられる．

異常3色覚者の被験者2名では，カテゴリカルカラーへの分類に一定の効果は見られたものの，本提案手法を使用しても使用しなくてもさほど大きく結果が変わらなかったのは，カテゴリカルカラーに関しては被験者が元々あまり間違うことなく分類を行うことができるからであろうと考えられる．

多くの被験者で，やわらかい赤とうすい紫をピンクに分類，明るい黄赤を黄に分類する間違いが見られたのは，これらの色は，もし正常色覚者が見たとしてもピンクや黄と呼んで不自然ではないくらいに，両カテゴリーの中間の微妙な色であったからであろうと思われる．今回は正常色覚者を被験者に加えた実験を行っていないが，正常色覚者ならどう判断するかを調べたい．

実験4の混同色の弁別実験の結果より，提案手法は，正常色覚者が知覚している色域の広範囲に渡って色の弁別が可能であろうことがわかった．うまく使えば，多くの色を詳細に見分けることが可能になるだろう．

2型異常3色覚者が色覚補助ツールを使用した場合と使用しなかった場合で，色弁別性が向上しなかったこい青とこい紫は，両方とも明度が低い色である．この他にも，こい緑，こい茶など，こい灰色など明度が低い色の混同色が見分けにくい傾向は実験3でも現れた．これは，提案手法では，明度が低い色は，実装した携帯機器の内蔵カメラでを通じて得られた色が無彩色に近いため，混同色の双方が同時に色無変更エリアに属してしまい，色の変更が行われなかったからであろうと考えられる．このような現象は，例えば色覚補助ツールに小さなライトなどを搭載し，明度の低い色を見るときや環境光が暗いときにライトで照らしながら色覚補助ツールを使用することによって解決できる可能性があるだろう．

実験5では，あらかじめ混同色2色が何色と何色の組み合わせであるかを教えれば，どちらがその色であるかを多くの被験者が当てることができたことから，色ゾーンの開始位置を設定するスライダーの位置と，そのときに変化する色の名前を覚えることによって，多くの色の存在を知り，またそれらの色の具体的な色名を知ることができるようになる可能性が示唆された．色覚異常者が見えている色と，その色の色変更が行われるスライダーの位置の2つの情報で色名を導出することが，ツール上の工夫やユーザの訓練で可能になれば，コミュニケーションの一部として，他人に色を伝えたり，色を使った表現を行う場合に威力を発揮するに違いない．

モニター実験では，多くの有用な情報が得られた．色変更手法の有効性に関して，家具などの木の色の細かい違いがわからない，畳の色が見分けられないとの情報があった．今回行った色変更手法の実装では，色射影面に近い領域は，色ゾーン内であっても色変更を行っていない．これは背景色の色変更をしないことで，画面全域に渡って一斉にフラッシュするように色が変わることを避けるためである．この実装より，色ゾーンのシフト中

に画像が混乱したり，見づらい画面になるようなことはなくなるが，その代わりに黄や無彩色付近の細やかな色の弁別ができなくなってしまっている可能性がある．黄や無彩色に近い木の色，畳の色が見分けられないのは，これが原因であるかもしれない．

夕焼けの屋外で，黄と黄緑が見分けられないのは，光源に含まれている波長光の種類が少なかったり偏っているときの現象かもしれない．黄色が強い白熱光の下では，正常色覚者であっても色がうまく見分けられない場合があり，それと類似の原因で発生している可能性がある．これらについては，再現実験を行い原因を追及したい．

色変更手法とそれを使用する際の環境光の関係を述べる．色は光源と物体との相互作用によって決まるため，光源色や照度によって大きく左右する．しかし，人間は，光源の色温度の適合性が高く，昼光や白熱灯，蛍光灯などさまざまに光源が変化しても同じ物体の色を同じ色として捉えることができる．色変更手法を実装した色覚補助ツールにおいても，光源が多少変わっても同じ物体の色は同じパラメータで指定できることが望ましい．本研究では，実装した携帯機器に搭載されているカメラの自動ホワイトバランス機能を使用してこれに対応した．自動ホワイトバランス機能はカメラに一般的に搭載されており，白を正確に白く写せるよう光源の違いに応じて色を補正するものである．これにより多くの環境に対応することができるが，上記の例のように光源色が極端に偏っているような場合にはうまく補正することができない．本研究はユーザが日常生活の中で使用することを想定しているため，例えば暗い場所やトンネル内など特殊な照明下など，肉眼でも物体の色が良く分からないような場合は色は分からなくても構わないという考え方に立っている．しかし，更に多くの環境下で使用可能にするため，ホワイトバランスを自動で行わず，シーン別にプリセットしておいたものを手動で設定するなどの機能を付加することなどが考えられる．

本実験で使用した2色覚シミュレーションがどれくらい正確であるのかの評価は行っていないが，改良して使用したBrettelの手法は多くの研究者に使用され一定の評価を得ている．提案手法を搭載した色覚体験ツールは，1型2色覚および2型2色覚者からは，「オリジナル画像とシミュレーション画像の違いがわからない．」との意見が得られており，一定の精度を持っているのではないかと思われる．本研究の一連の開発で，この2色覚シミュレーション機能を先に開発，搭載したことが，その後の色変更法の開発や実装，評価に大きく役に立った．最初の実験は，実際の現場にて2色覚シミュレーション機能を使用して行い，次に実際の現場を撮影した写真画像を2色覚の被験者に見てもらう実験を行ったが，2色覚者の被験者実験の結果は，2色覚シミュレーションによるものとすべて同じになったことからも，シミュレーション機能の搭載が研究や開発を進める上で効果的であったことがわかる．

他の色覚異常者向けの色変更手法との比較では，本色変更手法が他の手法より速度の点で圧倒的に優れていることがわかった．これは，本色変更手法が，混同色があるか否か，それは何色で画像のどの部分に存在するかを調べることなく，色ゾーン内に属する色を同

時にすべて変更するという計算量が少なくて済む色変更を行っているからである．その高速性があったからこそ動画像に適応し，携帯性とリアルタイム性を確保することができた．そして，リアルタイム性があるために，対話的または時系列で色ゾーンを変更することができ，その結果として視差を利用して標的物を発見するなどの効果を得ることができた．また，携帯性は日常生活のさまざまなシーンで使用することができるという大きな利点を生んだ．本色変更手法が多くの利点を生んだ一番大きなポイントは高速性だったと言うことができる．

本色変更手法では，色を見分けるための標的物は一般に画像中の連続した領域を占め，類似した色を持っていることを利用して色ゾーンを設定している．本研究の実験でも標的物は概ね一種類の類似色を持っていた．標的物が単純に一種類の類似色から構成されていない場合でも本色変更手法が有効であるかの確認を行った．色度が大きく異なる2つの色間を連続して変化するグラデーションの例として夕焼け写真，色度が大きく異なる複数の色をまだら状に持つ例として紅葉途中の緑と赤が混じる楓の画像を対象として色変更の結果を確認した．その結果，夕焼けは色ゾーンの位置の変化によってグラデーション部分が連続して色変更の対象とされ，楓の葉も適切に色ゾーンの位置を設定すれば画像全体がマーブル状に色変更の対象となった．本色変更手法は，色度が変化する対象であっても，画像を確認しながら色ゾーンの位置をインタラクティブに細かく変更することによって有効に動作することがわかった．

10.2. 色覚補助ツールと色覚体験ツール

色変更手法による色の弁別の効果とは別に，それを携帯機器に実装し，装置全体を色覚補助ツールとして利用した場合の効果について考察する．

関連製品との比較評価では，本提案の色覚補助ツールは，対応可能な画像の種類，色変更の速度，携帯性，対話性など多くの点で他の製品より優れていた．しかし，最終的に色変更後の画像を静止画像として得ることができないという欠点もある．日常生活で眼鏡のように，直接物を見るのに適したツールであると言うことができる．また，本提案の色覚体験ツールも携帯性，リアルタイム性の点で他の製品にはない大きな特徴を持っており，これまでシミュレーション画像を見ることが難しかった多くの場所やシーンで使用可能なツールとなった．

モニター実験の結果では，被験者全員から，日常生活の中で色を認識したり弁別する場面で効果が得られたという結果を得た．被験者によって，3日間のモニター期間の中でツールを使用するシーンは異なっていたが，買い物や植物の観察，通勤など，日常生活の中の多くのシーンで効果が得られたことから，提案の色覚補助ツールはかなり広範囲に渡って使用可能であることがわかった．これは，本ツールひとつで，さまざまな目的（何のために色を見るか），対象（何の色を見るか），環境（どんな場所や光の元で見るか）において効果が得られることを意味している．本研究で開発した色覚補助ツールと色覚体験ツールは，簡単に持ち運ぶことができ，ユーザが日常出会うさまざまなシーンですぐに

取り出して使用することができ，その場ですぐに効果を得ることができる．このような有用性を得られたのは，これらのツールが携帯性，リアルタイム性，インタラクティブ性の3つの要素を同時に満たしているためだと考えられる．

目は人間の体の一部であり，私たちは寝ている時以外は絶えず目から入ってくる情報を使いながら生活をしている．色覚異常者は，目を開けている限り絶えず自分の生まれ持つ色覚に応じた自分なりの色を見続けており，日常生活のどの瞬間においても色覚の違いが原因で不便を感じるような場面に出くわす可能性がある．ツールが携帯可能であれば，絶えずそれを自分の近くに持ちおき，必要なときにはいつでも使用して，自分の目だけで見た視覚画像とツールを通してみた視覚画像を比較することができる．随時随所で使用可能な「携帯性」がQOLの向上に大きく貢献すると考えた仮説の正しさが確認できた．正常色覚者にとっての色覚体験ツールも同様である．

また，本研究で開発したツール群が持つ「リアルタイム性」も有用性の向上に大きく貢献した．「何があるのかわからない」，「この色が何であるか知りたい」，「この中に特定の色が存在するかどうかを知りたい」，などの状況に立たされた場合，その答えがその場で直ちに得られるのと，一度写真に撮るなどして一定の操作を行った後に得られるのとでは，使い勝手に大きな差が出る．緑の葉の中の赤い花を見る場合など，標的物の存在そのものに気付いていない場合でも，色ゾーンをその場でシフトさせることによって，前後の視差により花の存在が浮かび上がるような標的物発見効果は，リアルタイムで色変更が可能であることによって実現したものである．必要に迫られて色を調べる場合でなくても，日常のふとしたときに何気なく身近なものを見ているうちに，これまで見えていなかったものを発見することができる．このような世界が広がる喜びはリアルタイム性があるからこそ得られるものである．

携帯性，リアルタイム性に加えて，色ゾーンの位置や，色の変化量の設定などをインタラクティブに変更する「インタラクティブ性」を持たせたことで，目的や対象，環境などのさまざまな要件に対応でき，ツールをさまざまなシーンで利用可能となった．色変更の色彩理論的手法のみならず，実装手法や，同時に搭載した機能を統合的にひとつのソフトウェアにまとめあげる設計手法などを総合的な設計を行うことにより，携帯性，リアルタイム性，インタラクティブ性の3つの要素を同時に満たすことできた．これが，本研究で提案する色覚補助ツールと色覚体験ツールが色覚異常者から高い評価を得られた理由であると考察する．

本研究で開発した色覚補助ツールは，色ゾーンの開始位置，幅，明度一定・色度変更法と色度一定・明度変更法の切り替え，色の変更量などをすべてアプリケーションソフトウェア内のボタンやスライダーで細かく設定可能にしている．これは本研究で使用する色変更法の効果を詳細に確認するためであるが，パラメータの数が多く細かく設定可能であることが操作を煩雑でわかりにくくしている．本ツールを使いこなすためには色変更の理論をある程度はユーザにも理解してもらう必要があるとはいえ，携帯機器の操作に慣れていないユーザにとっては負担かもしれない．

色覚補助ツールについてのモニター実験の被験者と話をした中で，「色が弁別できる」

としたものの，「操作が面倒なのでこのツールを日常生活の中では利用しようとは思わない」と答えた被験者もいた．アンケート項目にはなかったが，後日，被験者の携帯機器の使用経験を聞いたところ，そう回答した被験者は携帯機器の使用経験がなく，それ以外の被験者は普段からiPhoneを使用していることがわかった．普段からiPhoneのようなタッチタイプの携帯機器を使いこなしている人にとっては，色が見えにくいときに機器を取り出して色覚補助ツールアプリケーションを立ち上げて使用することはさほど負担にならないが，そうでない人にとっては，いちいち機器を取り出して操作することの負荷が大きいのではないかと考えられる．このような携帯機器自体の慣れの有無もユーザの印象に影響を与えているようである．

本研究の目的である色覚異常者に優しい社会を作るためのひとつの要素として，自分と違う色覚を持った人の気持ちを理解するということがある．「百聞は一見にしかず」という言葉があるが，自分と違う色覚を持つ人がどのように見えているかを知ることは，語学で言えば他の国の人たちが使っている言葉を理解することと通じるものがある．正常色覚者を日本語を話す人，色覚異常者を英語を話す人に例えると，色覚体験ツールは，日本人が英語を理解するために使う英和辞典の役割だということができる．一方，色覚異常者が，正常色覚者の見ている色を認識し，彼らが知覚する色を弁別するための色覚補助ツールは，和英辞典の役割を持っている．すなわち，色覚補助ツールと色覚体験ツールは，他のグループの人の感覚や気持ちを相互に理解するためのペアのツールなのである．本研究で2つのツールを同時に開発し，公開したことは，双方が同時に互いを理解し思いやろうと意識するための良い方法であったと思う．

遺伝子が原因の先天性の色覚異常者は，生まれてからずっと今の色覚なので，その人にとっては今見えている色が当たり前であり，「色で困ったことなど一度もない」と主張する人も多い．確かに2型ならば視認が困難な色はなく，弁別できない色はあってもそれによって命に関わるような困難に遭遇することはほとんどないと考えられる．人は自分が人と違うことはあまり認めたくはないものであるし，実際に色の視認性や識別性が低くても大きな被害がないのに異常や障害などの言葉で呼ばれるには抵抗があるのは自然なことだと言える．本研究では，色覚異常者の日常生活に少しでも役に立てたらという思いで色覚補助ツールを提案したが，色覚異常者の中には，「色覚の差で困るような場面がないので，そのようなツールは使う必要がない」のようなニュアンスで，使用する以前に拒否の気持ちが働く人もいたようだった．もちろん困っていない人に無理に使用してもらう必要はないし，そのような人たちの気持ちも理解しなければならない．だが，おそらくそのような人たちも，普段出会う風景の中で，色の混同が原因で気付いていない景色や物や模様などが存在しており，もし色覚補助ツールを使用すればそれらに気付く場面も多いのではないかと思われる．

これまで見えなかった物が見えるようになれば，驚きや感動など新たな感情が沸き出てくるだろう．モニター実験のアンケートでは，「こんなにも彩られた世界を見れていなかったのかと思うと，知ってしまったことが少し残念だった．」という複雑な思いも垣間見ることができた．新たな発見により新たな感情が得られることをうれしいと思うのか，

それとも余計なことだと思うのかは，このようなツールの存在意義を計る上で非常に大きな要素であるので，今後慎重に考察していくべきであろう．今回の実験ではそのような部分までは確認することができなかったが，「色が見えるようになって，更に多くの色を見てみたいと思う欲望が湧いた．」という所見が得られたことから，今は必要ないと考えている人たちでも実際に使ってみれば手放せなくなるくらい便利なツールとなる可能性が示されたと言うことができよう．

10.3. 社会性

iTunes Storeのレビューには投稿者がそのソフトウェアを評価するための星を付けることができる．満点は星5つである．色覚補助ツールの「色のめがね」と色覚体験ツールの「色のシミュレータ」はそれぞれ平均で4.6，4.8と高い評価を得ている．ユーザレビューの内容は，大きく2つに分類することができる．ひとつは，色覚異常者がこのツールに出会い，実際に使用してみて何らかの感銘を受けレビューに書き込んだもの．もうひとつは，この分野に詳しい人がツールを使い評価したものである．

ユーザのレビューでは，他の多くの人と色覚の差異を持って生まれ，この世に生を受けたときからずっとその色覚と共に生きてきた色覚異常者たちが，本研究で提案する色覚補助ツールに出逢い，初めて使用したときに感じた驚きと心が動かされる様が現れているように感じられる．紅葉を見に行って枝の先に赤い葉があることに初めて気付いた驚きなどを通じてユーザの感動が伝わってきた．このレビューだけでは投稿してくれた人の色覚異常のタイプや強度は不明だが，おそらく色覚異常の強度が高いほど，色覚補助ツールを使用したときに発見する事柄が多く，驚きや感動も大きいのではないかと思われる．人が日常生活をする上で視覚は絶えず使用され，長い年月の中でその見え方は慣れてしまっているので，これまで見えなかったものが見えるようになるということはこれまでの常識を覆えされたような大きな衝撃であるに違いない．そして，これまで当たり前に見ていた世界も実はまだまだ奥深いかもしれないという発見は，目の前に自分が知らない世界が広がっており，そこに手が届くという高揚感を与えるのかもしれない．

ユーザレビューでは，特にひとりの2型色覚者が iTunes Store に投稿した「最後に…私に色をありがとう」という言葉に感銘を受けた．この言葉を読んで感動し，苦労を重ねてこの研究を行ってきたことが本当に良かったと心から感じた．少しでも人の役に立つことができたことを心よりうれしく思う．これらの好意的な意見がユーザの大多数を代表しているとは思わないが，少なくともある割合のユーザからは高い評価を得られたのだと思う．一方，何に使うのかわからない，他のレビューほど感動しなかったという低い評価もあった．

レビューの中には，おそらく本人は色覚異常ではなく，このようなツールに興味を持って使用したと思われる人の投稿もあった．そのようなレビューにおいても概ね評価が高く，汎用的な携帯機器に実装してマイノリティのサポートをしたこと，AR技術を活用してユーザの生活に密着するツールを作ったこと，そのようなものを作ろうと考え実現した本研究の意義そのものが評価されたように感じられた．

Twitterなどのソーシャルメディアでは，公開したツール類の情報が多く紹介され，この分野の関心の高さが伺えた．増井俊之教授と私のTwitter上での一連のやりとりが多くのアクセスを集めことは，正常色覚者にとっても色覚，色覚異常者のサポートは興味深いテーマであることを示しているのではないだろうか．色覚異常者の中には，トマトが熟しているかどうかわからない，焼き肉が焼けているかどうかわかならい，寿司屋でワサビとショウガの区別がつかない人がいるということをこの会話によって初めて知り，驚いた正常色覚者も多かったようだ．

AR技術に詳しく書籍も書いているITコンサルタント小林啓倫さんの「POLAR BEAR BLOG」では，このような人が生まれ持った特性の枠を超えるためのAR技術の応用例として好意的に紹介された．また，自分が経験することがない他者の世界を覗くための代替現実という側面があると述べられている．同ブログの一部を引用する．

『AR（Augmented Reality，拡張現実）はむしろARGと同様に“Alternate Reality”（代替現実）の略と考えた方がしっくりくる場合が多いように思います．色覚異常者が見ている世界．その逆に，「普通」とされる色覚の世界．または実物大シャア専用ザクが立っている世界や，大人びた美少女と熱海に一泊旅行ができる世界．そういったさまざまな「別の世界」をつくり出すのがARという概念だと捉えれば，もっとさまざまな可能性が広がるのではないでしょうか．』

カラーユニバーサルデザイン活動を続けている伊賀公一さんの「ソラノイロのブログ」では，ツールの作者である私が想定していないパラメータ設定による使い方が紹介された．色ゾーンの幅をサポート色域の半分くらいまで大きく設定する方法で，色ゾーンの開始位置を決めるスライダーを動かさなくても幅広い色の色が変化する．このパラメータだと一定領域の見分けにくい色のペアを一度に見分けることができる一方，その色が具体的に何であるのかがわかりにくい．本人にインタビューしたところ，1型2色覚である彼は，「茶と赤などは見分けられないが，見分けられなくても困らない．緑と赤，ピンクと水色などが見分けられれば良い．」，「その色が何であるのかを知る必要はあまりない．」，「正常色覚者は一目ですべての色がわかるのだから私もそのように使いたい．」ということだった．このようなパラメータの使用法でどのような効果があるかを更に詳細に検討する必要性を感じた．

色覚体験ツールでは，モニター実験の被験者から，『「色のめがね」と「色のシミュレータ」を使って人と色のコミュニケーションが図れたのは本当にうれしかったし，色弱を友人知人が理解してくれたことに感動した．こんなに色について友人と話せたのは初めてだった．』という感想が得られた．色覚体験ツールが友人と色の知覚の話をするきっかけとなったようだ．多くの人が自分とは違う色覚を持つ人がどのように見えているかを理解し，見え方の違いについての会話などを通じて互いの理解が進むのは本研究の狙いのひとつである．色覚異常者には，自分の見えているものは自分しか理解できず，それを他人に説明することは何のメリットにもならず，デメリットばかりであると思い込んでいる人も多い．色覚体験ツールが，正常色覚者と色覚異常者の相互理解のきっかけになることを望む．

色覚体験ツールのアンケート調査の結果から，多くの人の目に触れ使用される製品やサービスのデザイン提供しているデザイナーの多くは，色覚に興味を持ち，それを意識していることがわかった．しかし，実際の業務では，クライアントからさまざまな色覚に配慮したデザインを要求されることはまだ少ないとのことだった．今後，カラーユニバーサルデザイン活動などを通じて人々が色覚に関する知識を持ち，意識が高まってくれば，公共関係のデザインなどを皮切りに，そのような発注要求も増加してくるのではないかと思われる．

バッグのデザインや製造をしているデザイナーは，皮や布の色を選ぶ際にこの色覚補助ツールで色を確認しており，また，ウェブやグラフィックデザイナーも色使いの確認のために使用しているとのことだった．アンケートに回答したすべてのデザイナーが，今後のデザイン活動に色覚体験ツールなどを活用していきたいと答えたことから，制作側からも色覚への配慮が広まってくる可能性がある．

色覚異常者というマイノリティを扱う研究テーマ特有の出来事もあった．色覚異常に詳しい研究者からは，色覚体験ツールの機能と一部として搭載したシミュレーション強度について意見が寄せられた．異常3色覚の色の見えはまだわからないことが多く，そのメカニズムは詳しく解明されていない．色覚体験ツールには2色覚の色の見えと正常色覚の色の見えの線形補間によってシミュレーション強度を設定する機能があるが，「ユーザはそれを異常3色覚のシミュレーションと思い込んでしまう．単純な線形補間では異常3色覚者の正しい色の見えが再現できないのでその機能は削除するべきだ．」という意見だった．同時に，「色覚異常者のシミュレーションと言っている以上，多くの人に色覚異常者はそのように見えているという強い印象を与えてしまう．そのシミュレーション精度が低ければ，そのために誤解を受けてひどい目に遭う人がいるかもしれない．したがって，少しでも正確さに欠けるものは公開するべきではない．」との意見もいただき，深く考えさせられた．この件については慎重に検討していきたい．このような経験から，改めてこの研究テーマの繊細さと奥深さを感じた．今後は，より一層慎重で丁寧な研究を心がけるよう留意したい．

国内外の色覚の研究者からもいくつか反響が寄せられた．色覚異常の研究で世界的第一人者として知られるケンブリッジ大学のDr. John Mollonは，本研究で使用した2色覚者の色射影面やシミュレーション手法の提案者の1人[12,18]であるが，彼からは「色のシミュレータ」に対して，“It's an elegant use of the iphone, and a very good instructional aid.”という感想が寄せられた．異常3色覚のシミュレーションに関しても有用なアドバイスをいただいている．

本研究とその成果の公開によって，多くの人から反響が寄せられた．ソーシャルメディアでは，色覚異常者や関係者からのメッセージも寄せられた．胃潰瘍などでときどき吐血してしまう人は血液の赤い色が見えず，特別な眼鏡をかけないと吐血の判断ができなかったが，この色覚補助ツールでそれが見えるようになるかもしれないということだった．病院に勤務する看護師からは，やはり血液の色が見えないために体調の変化をすぐに察知で

きない入院患者がおり，そのような人たちに使ってもらおうとしているという話があった．子供の頃から色覚のことで辛い思いをし，死も考えたことがあるというユーザは，理髪店の回転灯にある赤の色がはっきり見えて「生きていてよかったと心から思う．」というメッセージを送ってくれた．一般の人からもたくさんメッセージが寄せられた．手元に置いてLEDの色を見分けるのに使っている人，花屋で花を買うときに使うという人などもいた．モニター実験では「道を歩いていて，これまで黒い雨だれだと思っていたものが赤サビだったとわかって驚いた．」という体験が寄せられたが，それと同じように，毎日の通勤中に色覚補助ツールをONにして，道すがらいろいろなものを見ながら駅から職場まで歩いている人もいる．「マンホールの蓋に書かれている薄い赤の字」を発見したり，これまでまったく気付かなかった「道路に描かれた消えかけた赤い歩き煙草禁止のマーク」を発見（図50）して，毎日驚きがあるそうだ．そのようなユーザの声を聞くと更に良いものを作ろうという意欲が沸いてくる．

「これを見て自分も人の役に立つような仕事がしたいと思った」，「素晴らしいプロジェクトに感動した．」など活動そのものに共感していただいた人も多かった．また，自分もこのプロジェクトの役に立ちたいと，アプリケーションソフトウェアのデザインの提供や，他機種への移植を手伝いたいなどを申し出てくれた人もいた．次バージョンでは，それらの協力者との協業も行いたい．

また，このようなツールを公開し，作者としてソーシャルメディアなどで発言していると，この方面に詳しい人と知り合うことができ，更にその紹介などで多くのつながりができる．同じような志を持った人たち何名かと知り合うことができた．今後，必要ならば彼らと連携して研究を進めていく可能性が開けた．研究環境の裾野が広がった．

当初色覚補助ツールを公開した際には，ここまで大きな反響があるとは思わなかった．男性の約5%が色覚異常者だとはいえ，それは全人口の2.5％に過ぎない．100人に本研究を知ってもらっても実際にこれが役に立つ可能性があるのは2.5人である．色覚補助ツー

図50　ユーザが通勤路で発見した路面の消えかけた煙草禁止のマーク．自動色ゾーン変更を使用．左（色変更前）は見えないが右（色変更後）ではくっきりし，点滅しているように見える．

ルや色覚体験ツールが人々の話題を集め，多くの人に知ってもらうことによって，これらを本当に必要としている人にも知ってもらうことができる．そして実際に使用してもらい，一人でも多く人に役立てば良いと思う．多くの話題を集めるべく，活動を続けて行くつもりだ．また，この活動を通じて，個人の色覚の差についての理解が進み，なるべく正確な知識が世の中に広まることで色覚異常者を取り巻く環境が少しでも改善されれば良いと思う．多くの人にとって優しい社会ができることを希望する．

ざまざまなマスコミからの取材の申し込みが寄せられた．新聞や雑誌，TV番組から取材を受け，それぞれのメディアで紹介された．引き続き取材の依頼も来ており，本研究のテーマとアプローチへの関心の高さがうかがえる．今後メディアへの露出が多くなるにつれて，更に多くの人に関心が広がる可能性がある．本研究が社会に与えた影響は非常に大きいとまでは言えないかもしれないが，色覚異常への理解を進める上で一定の効果があったと言うことができよう．

11. 結論

色空間を，正常色覚者と2色覚者の色知覚の差分の大きさによって分割，すなわち色射影面と平行な平面群によって分割した上で，一部の色ゾーンの明度や色度のみをリアルタイムで変化させる色変更手法は，対象が人工物であるか自然物であるかに関わらず，正常色覚者が知覚する色域全体にわたって，1型と2型の2色覚者の色の視認性や識別性を高めるために有効であることがわかった．

1型と2型の2色覚者の色の視認性や識別性を高める手法は，1型と2型の異常3色覚者にも有効である可能性が示唆された．

色変更の対象となる色ゾーンをインタラクティブにかつ時間的に変化させる手法は，若干の操作を必要とするものの，正常色覚者が知覚する色域全体に渡って色の認識や弁別を可能とし，また色覚異常者が知覚している色が何であるかを理解する上での助けになり，色を使用した表現を行う場合に有効であることが確認できた．

また，このような色ゾーンのシフトをリアルタイムで行えば，標的物の色や場所などをあらかじめ指定することなく，色変更前後の画像の視差により混同色を持つ標的物の認識が可能となり，簡易なユーザインタフェイスで大きな効果が得られることがわかった．

更に，この色変更手法は，携帯機器上に実装可能なので，色覚異常者が肌身離さず持ち運び，日常生活の中で利用することのできる有用な色覚補助ツールとなることが確認された．

さまざまな色覚的特性を持つ人の色の見えをシミュレーションすることができ，どこにでも持ち運ぶことのできる色覚体験ツールは，正常色覚者がそれを使用して，自分が今見ているものが色覚異常者にはどのように見えているかを確認し，色覚異常者がどのような場面でどのように不便を感じるかの理解を助けることで，多くの人が色が原因で困ることのない社会の実現について考えるためのきっかけを与えることができた．

また，リアルタイムで色の視認性や識別性を高める色覚補助ツールと，リアルタイムで色覚シミュレーションが可能な色覚体験ツールを同時に公開することにより，正常色覚者と色覚異常者の双方が互いの色覚について理解を深める機会を提供することができた．

これらの結果から，提案した色変更手法，色覚補助ツールと色覚体験ツールは，色覚異常者のQOLを向上させる目的において，一定の効果を与えることができることが示唆された．

12. 今後の展望

色覚異常が起きるメカニズムとその生理学的な特徴を調査し，色彩理論に基づいた色変更手法と最新の携帯機器への実装により開発した色覚補助ツールおよび色覚体験ツールの有効性が確認されたが，研究の過程でいくつかの課題も明らかになった．研究の今後の展望について述べる．

12.1. 機能・性能の向上

色変更手法や色覚補助ツールおよび色覚体験ツールを改良することで，それらの性能の向上を図りたい．

12.1.1. 色弁別能力の向上

モニター実験結果より，2型色覚者の被験者から，黄，茶色，オレンジ付近の弁別が難しいという報告が複数上げられている．現在の実装では，色射影面と近い色を色ゾーンとした場合には，明度や色度の変更を行わない仕様となっているためである可能性がある．

また，報告のひとつは夕暮れの夕焼けの赤身を帯びた環境光下であったことから，正常色覚者であっても色の認識がしづらい状況であった可能性がある．

また，講演会場の赤色が強い白熱灯下で，ピンクと水色の造花の弁別ができなかったことがある．2つの混同色は別の色ゾーンに分けられており，明度や色度の変更を行っているにもかかわらず，色の変化が小さく感じられ，はっきりとその差を知覚できなかった．

後者2つはそもそもの光源に含まれている光に青のスペクトルが足りないために起きている可能性がある．これは別途ライトを用意し照らす手段を用意することで解決できるかもしれない．また，提案した色覚補助ツールでは，個々の機器の色特性のバラツキを補正するためのキャリブレーションを行っていない．これは実装した製品の商品としての性格上，キャリブレーションを行なわなくてもある程度精度が保たれており実用上問題ないだろうと考えたためであるが，より色弁別性能を向上させるためにキャリブレーション機能を搭載することも検討したい．更に採用する色射影面の変更についても検討したい．

これらの対応により，色弁別機能の向上を図りたい．

12.1.2. ユーザインタフェイスの改善

提案した色覚補助ツールのユーザインタフェイスでは，色ゾーンの開始位置（θ に相当）の設定部がメイン画面下部に存在し，色ゾーンの幅（$\Delta\theta$ に相当），明度一定・色度変更法と色度一定・明度変更法の切り替え，色の変化量などの設定部は設定画面上にある．それぞれのパラメータは提案した色変更法において重要な役割を持っているが，色変更の原理を知らずに使用するユーザにとっては，それらが何を意味しているのかわかりづらい．これらのパラメータの妥当性，ユーザインタフェイス上の表現，ユーザインタフェイス上の配置などに関して，利用者の使い勝手が向上するよう改良を行いたい．

提案した色覚補助ツールは，色覚異常者が自由に持ち運び，日常生活の中で遭遇するさまざまなシーンにおいて使用することを想定しているが，人工物を見るのか自然物を見る

のかなどの「対象」，全体の色使いを知りたいのか特定の色の存在を知りたいのかなどの「目的」，昼間屋外の昼光下で使うのか夜室内の照明下で使うのかなどの「環境」などに応じて，パラメータを設定して使用する必要がある．現在の実装では，これらのパラメータを3つのプリセットボタンに保存し，任意にそれらを読み出して使用することが可能だが，このような利用シーンに合わせたプリセットの使用方法について検討し，それらの数や保存方法などを再考したい．また，他のユーザが作成したプリセットパラメータをインターネット経由でダウンロードして使用できるようにするなど，使えば使うほど成長し，便利になるツールとなるよう工夫を重ねたい．

12.1.3. 色名の表示

モニター実験の際に，被験者から，色覚補助ツールの色弁別の有効性は高く，2つの色が異なっていることは良くわかるが，そこまでできるなら次はその色が何であるのかを知ることができるようにしてほしいという要望があった．それが可能になれば，色を使ったコミュニケーションを行う際にも，色名で相手に伝えることができるようになる．内蔵カメラから取り込んだ画像の特定部分をタッチパネルなどで指定し，その部分の色を色名に変換して表示することができる機能を付加したい．色空間上の座標から色名を導く方法はJIS，その他によって定められており（図51），それらを利用することができる．しかし，精度を高めるには，実装する機器の個体差や環境光の違いによる色の違いを補正するなど多くの解決すべき問題がある．キャリブレーションの実施やユーザインタフェイスの設計を工夫して，色名表示を実現したいと考えている．

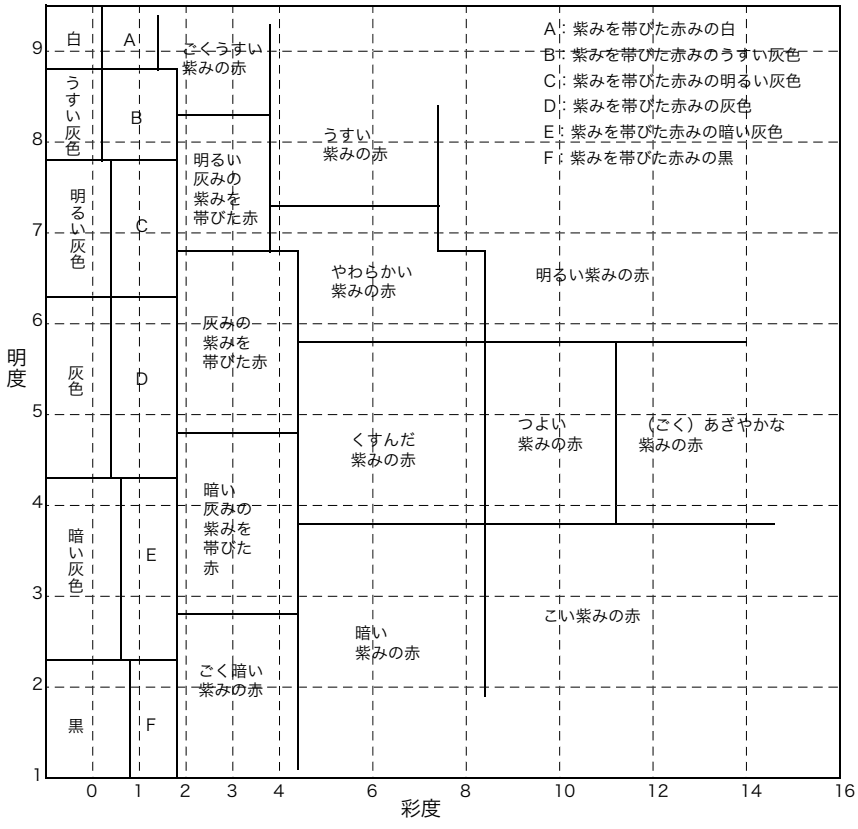


図51　色の3属性による表示と系統色名の関係．文献[9]中のJIS Z 8102（物体色の色名）より，付図1「紫みの赤（7RP〜1R未満）」の一部を抜粋したもの．

12.2. 対象ユーザの拡大と応用

本研究で培った理論や技術を生かして，現在サポートしていないタイプの色覚異常や，対象ユーザの拡大を行いたい．

12.2.1. 異常3色覚の対応

提案した色変更手法は，2色覚者の色の見えに基づいている．3種類の錐体の内2つしか正常に機能しない2色覚の色知覚については研究が進んでいるが，多くの研究者が研究を行っているにもかかわらず，異常3色覚者の色知覚についてはまだ詳しいメカニズムが解明されていない．

色覚異常者がどのように見えるかを体験することができる色覚体験ツールでは，色変更を行わないオリジナル画像と2色覚者シミュレーション画像とを線形に補間し，シミュレーションをどの程度行うかの強度を設定できるようにした．この正常色覚者と2色覚者シミュレーションの中間画像が，異常3色覚者の見え方をある程度は近似している可能性はあるが，誤差も存在すると考えられる．本研究の色変更手法でも異常3色覚者の色認識や色弁別に効果が見られたが，今後は異常3色覚の研究を進め，個人の色覚特性に合わせた更にきめ細やかなパラメータ設定と色変更，シミュレーションを行えるようにしたい．

12.2.2. 後天色覚異常への対応

1章で述べた通り，眼球内の水晶体が黄白色または白色に濁るために，視界が暗くなったり黄白色や茶褐色がかって見える白内障患者も数多く存在する．白内障とまでは診断されなくても，加齢に伴う水晶体の濁りにより青の光の透過率が減少する現象は多くの人に見られる．このような後天色覚異常に対応した色覚補助ツールを開発したい．この新たな色覚補助ツールにおいても提案手法中の実装方法は有効であることが期待される．色変更については，現在の色度一定・明度変更法と明度一定・色度変更法を改良し，水晶体透過光の減少を補うような新たな手法を考えたい．

12.2.3. 3型色覚異常と医学的弱視への対応

提案した色変更手法では，2色覚者が，正常色覚者が知覚している色と同様な色として知覚することのできる色の集合として色射影面に着目し，それを利用して2色覚者と正常色覚者の色の見えの違いに基づいて色変更を行う色ゾーンを決定した．色射影面は，Brettelらの2色覚シミュレーション手法における折れ平面をViénotらが1平面に簡素化したものを利用した．Viénotらの提案における1型および2型の2色覚者の色射影面は，475nmの点の代わりにsRGBの青，575nmの代わりにsRGBの黄を使用しているが，この平面は元の折れ平面と距離が大きく離れる部分はない．S-錐体の機能が失われることが原因で起こる3型2色覚の場合も，1型2型と同じように660nmの点の代わりにsRGBの赤，485nmの点の代わりにsRGBのシアンを使用すれば色射影面を1平面に簡素化することができるが，元の折れ平面との距離が大きい部分が存在する．色覚補助ツールには，このように簡素化した方法で3型2色覚の対応を行い実装済みであるが，本論文では3型の2色覚者を対象とした被験者実験は行っておらず，その有効性は検討されていない．今後，3型の色覚異常の対応を行いたい．

視覚の発達期に視性刺激遮断または異常な両眼相互作用によって視力が低下するなど，眼鏡やコンタクトレンズを使用しても十分な視力が得られない医学的弱視（ロービジョンなどとも呼ばれる）では，2種類の錐体の内，もっとも数が少ないS-錐体が一番大きな影響を受けるために，3型の異常3色覚に近い見え方になることが知られている．1型および2型の異常3色覚は，赤オプシンと緑オプシンを作る遺伝子の相同性が高いために相同組換えにより分光特性が変化するために起こると考えられているが，分光特性には変化がない医学的弱視は，3型異常3色覚とは別の手法が必要な可能性がある．それらの検討を重ねた上で対応を行いたい．

12.2.4. 動作可能機器の拡大

現在，色覚補助ツールおよび色覚体験ツールは，Apple Inc.の携帯機器 iPhone 3GS, iPhone 4, 第4世代のiPodに実装し，iOSアーキテクチャ上で動作する．iOSアーキテクチャを採用した携帯機器を開発・発売しているのはApple Inc.1社のみであるのでユーザが限られる．更に多くのユーザが使用可能にするために，Android Inc.が開発し，Google Inc.が普及に努めるAndroid OS上にこれらを移植したい．Androidを搭載したスマートフォンは世界32カ国で販売され，2010年第3四半期は米国におけるスマートフォンの販売数で43.6%のシェアを持つ．Androidに実装することで，多くの機器で使用することが可能となり，より多くのユーザに色覚補助ツールおよび色覚体験ツールを届けることができる．

また，公開したツールを「色のめがね」と名付けたように，色覚補助ツールは，近視の人にとっての眼鏡やコンタクトレンズと同様に，身体に装着することができ，ユーザ自らが移動する際にごく自然に一緒に移動し，絶えず使用可能であることが望ましい．近年，ウェラブルコンピュータ，ウェラブルディスプレイと呼ばれる身体に装着可能な装置が開発され，徐々に普及し始めている．将来はこれらのウェラブル機器上で動作する色覚補助ツールの開発も考えたい．現在のツールは，色ゾーンやその他の設定のために使用する毎にパラメータを変更しなければならず，そのユーザインタフェイスをどうするか，パラメータ変更の自動化など設定の手間を軽減する方法，色ゾーンを多重化し色弁別までの時間を短縮する方法など検討すべき課題は多いが，ユーザ利便性の向上のために是非実現したい．

12.2.5. シミュレーションの応用

本研究で開発した色覚体験ツールを公開したところ，多くの人から「色覚異常のことは知識としては持っていたが，あまり見え方のイメージがなかった．色の見え方を実際に体験することによって，これまでとは比べ物にならないほど色覚異常に関する理解が進んだ．」という感想が寄せられた．このような体験によって理解が深まるのであれば，他の多くのことの理解するためにもシミュレーションは有用であるだろう．人間は生まれながらにして一人一人違うものであり，その違いが理解できなかったり，受け入れられないことが多くの齟齬を生み，憎しみや哀しみなどの不幸の原因となる．相互理解のために，色覚異常だけはなく，さまざまな疾患や環境について，本研究のシミュレーション実装法などを応用することにより，体験することができるような研究について検討を行いたい．

また，シミュレーション実装法を色覚以外を対象とした新たな補助ツールに応用する研究も考えられる．一例として，医学的弱視の人が快適に読書などを行うことができるように，書籍の文字を拡大し，コントラストを高め，タッチなどで操作できる読書機や，色を見やすく変更しながら風景を拡大して見るための双眼鏡や単眼鏡のようなツールの開発などがある．

12.3. 今後の抱負（本研究を振り返って）

当初，本研究を思いついたときには，色覚異常については一般の人を対象とした書籍で得た知識しか持たず，色彩学についての基礎知識もなく，長年プログラミングなどの実装からも離れ，どこから手を付けていいのか皆目わからなかった．カラーユニバーサルデザインについて詳しく，自らも色覚異常である知人を訪ね，色覚異常者が今置かれている状況や，その分野で活躍している団体や彼らが行っている社会活動，この分野の研究者などの情報を教えてもらった．その情報を元にいろいろな団体や研究者とアポイントメントを取り，次々に会って，「このようなことをしたいがどう思うか」，「何が足りなくて何が求められているのか」などを聞いて回った．そのような活動の中で多くの情報が得られ，基礎知識も付き，徐々に実現したいことが明確になった．またツールの開発においては，パソコンを購入し，デベロッパープログラムに登録するなど開発環境を整えることろから始め，新たなプログラミング言語やOSを一から学習し，徐々にしかしコツコツと自らの手で開発を実現した．

走り回っている中で多くの出会いがあり，多くの人に助けられながら，多くの偶然に恵まれ，研究を進めていくことができた．最後の最後までこの研究が実現できるのかどうかはわからなかったし，何かできたとしてもそれが色覚異常者にとって役に立つものになるのかどうかも確信が持てなかった．途中で何度もこれは実現できないのではないかと弱気になり，不安の念に苛まれた．その度に何か打開策がないかと悩み，もがき苦しんだ．

本研究が幾許かの成果を生み，少しでも人の役に立てたのだとしたら，それはそのようなときに決して手を抜いたり誤摩化したりぜず，諦めずに正攻法でアプローチし続けたからではないだろうか．苦しみながらあちちにぶつかり，こちらにぶつかりしていれば，いろいろな偶然に出会い，思いもかけないところから解決策が見つかるものである．そして困難を乗り超え，ある程度のところまでたどり着くことができれば，今度は実際のユーザが力になってくれる．彼らに励まされながら，更に前進することができた．実際のユーザの手に届き，彼らが喜んでくれて，多くの反応が得られたこと，それこそが本研究の醍醐味であった．

私は慶應義塾大学メディアデザイン研究科（KMD）が発足したと同時に入学したKMD1期生である．後に続く研究者たちにアドバイスを行いたい．ユーザが喜んでくれている，その顔が見えるところまで研究を続けてほしい．もし，ユーザの喜ぶ顔を見ることができたなら，あなたの研究は価値がある素晴らしいものだったと言うことができるだろう．そして，素晴らしい仕事は，また多くの人との出会いや，さらなるテーマに出会う機会を呼び込み，さらなる素晴らしい仕事に出会うきっかけになるだろう．

また，本研究では，人間が色を知覚するメカニズム，色覚異常が発生するメカニズムの理解には，2校目に学んだ北海道大学医学研究科博士課程での研究が役立った．色彩理論は数学，特に代数を多用しており，最初に通った電気通信大学で数理工学を学んだことが大変役に立った．数式の利用や機器への実装手法は計算機科学であり，やはり1校目の大学で情報を情報工学を学び，その後も社会に出ていろいろな製品を開発してきたことが助けとなった．そして，3校目の大学となったこの研究科で専攻したメディアデザイン学において，デザイン手法やAR技術に触れたことが本研究を行うきっかけとなり，研究の直接的なバックグラウンドとなった．アカデミズムは実社会とどう関わり貢献していくべきか，その哲学から大いなる影響を受けた．これまで学んできた多くの分野のひとつひとつが，長くは何十年も経た後にこうして役に立ち，それが結実したのが本研究であったと思う．学問は永遠に役立ち無駄になることがない．そして社会と関わり，社会に学問を活かすことにこそ意義がある．今後も分野を限定することなく，いろいろな方面に挑戦して社会に貢献できるよう努力を続けていきたい．

謝辞

慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の古川享教授は，日頃から社会的マイノリティに対して惜しみない支援を行っており，その姿を拝見するうちに私も少しでも世の中の役に立つ仕事がしたいと思うに至り，それが本研究を行うきっかけとなりました．また，豊富な社会経験と幅広い知見から，さまざまなご助言やご指導，激励をくださいました．心より感謝を申し上げます．

研究内容をいち早く評価してくださり，その方向性や実施方法について的確なご意見やご指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の砂原秀樹教授，技術的知見からヒューマンインタフェイスやAR（拡張現実）技術について有用なご助言やご指導をいただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の稲見昌彦教授に心より感謝を申し上げます．

また，私の大学生時代の恩師であり，日本色彩学会の前会長であられる電気通信大学の小林光夫名誉教授には，本研究の基礎的分野である色彩理論に関して，多くの時間を割いて基礎から徹底的にご指導をいただきました．沢山の質問や相談をさせていただいたにも関わらず，すべてに快く丁寧にご回答やご助言をくださいましたこと，心より感謝を申し上げます．

本研究のテーマである色覚異常について勉強する最初の機会を与えてくださり，色覚異常に関わる多くの人物や団体をご紹介いただきました有限会社ソノーク代表取締役の栗田正樹様，どのようなツールを作るべきか相談に乗ってくださり，またβテストや被験者実験の実施にご協力いただきました特定非営利活動法人Color Universal Design Organizationの伊賀公一副理事長には大変お世話になりました．お礼申し上げます．

本研究の成果物である「色のめがね」と「色のシミュレータ」の色覚ツールを無償にて評価してくださり，「CUD推進支援ツール」として広く社会の人々に推薦をしてくださいました特定非営利活動法人Color Universal Design Organizationおよび特定非営利活動法人北海道カラーユニバーサルデザイン機構に感謝を申し上げます．

ソフトウェア開発に力を貸してくださった慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の近藤誠さん，ウェブデザインや翻訳をお手伝いいただいたバークレイ大学の青木理音さんに心よりお礼申し上げます．

本研究で実施したさまざまな実験およびソフトウェアのβテストにご協力いただきました被験者の皆様，テスターの皆様に心よりお礼申し上げます．

公開した「色のめがね」，「色のシミュレータ」を実際に使用して，ご意見やご感想，レビューなどをお寄せいただきましたユーザの皆様，ありがとうございました．

遠距離の大学にて再び学生として研究活動を行うことに理解を示し，いつも私を支えてくれた家族に感謝します．

最後に，本研究を進める中で，ご支援ご協力いただいたすべての皆様方に深く感謝の意を捧げます．

参考文献

[1] 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第1回, 色覚の原理と色盲のメカニズム, 細胞工学, vol.21, no.7, pp.733-745 (Jul. 2002).

[2] 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第2回, 色覚が変化するとどのように色が見えるのか?, 細胞工学, vol.21, no.8, pp.909-930 (Aug. 2002).

[3] 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第3回, すべての人に見やすくするためには, どのように配慮すればよいか, 細胞工学, vol.21, no.9, pp.1080-1104 (Sep. 2002).

[4] 太田安雄, 清水金朗: 色覚と色覚異常, 金原出版, 1999.

[5] 日本医学会医学用語辞典WEB版, 日本医学会, http://jams.med.or.jp/dic/colorvision.html, 2007.

[6] 平成17年(2005) 患者調査の概況, 厚生労働省, 2006.

[7] 平成20年(2008) 患者調査の概況, 厚生労働省, 2009.

[8] D. McIntyre: Colour blindness causes and effects, Dalton Publishing, 2002.

[9] JISハンドブック 61 色彩, 日本規格協会, 2010.

[10] B. MacEvoy: Color Vision, Light and the eye, http://www.handprint.com/HP/WCL/color1.html, 2009.

[11] D. Flück: Colblinder, http://www.colblindor.com/, 2006.

[12] H. Brettel, F.Viénot, and J. D. Mollon: Computerized simulation of color appearance for dichromats, Journal of the Optical Society of America A, vol.14, no.10, pp.2647-2655 (Oct. 1997).

[13] 名取和幸: PCCSと色のユニバーサルデザイン－混同色と Hue & Tone 基準色－, COLOR, no.154, 財団法人日本色彩研究所 (2010).

[14] 日本色彩学会編: 新編色彩科学ハンドブック第2版, 東京電機大学出版局, 1998.

[15] 大田登: 色彩工学, 東京電機大学出版局, 1993.

[16] 小林光夫: 色覚モデルに基づく1型／2型2色覚者の混同色線および色知覚面の導出, 研究打ち合わせ資料, Aug. 2010.

[17] D. B. Judd: Color perceptions of deuteranopic and protanopic observers, Journal of Research of the National Bureau of Standards, vol.41, pp.247-271 (Oct. 1948).

[18] F. Viénot, H. Brettel, and J. D. Mollon: Digital video colourmaps for checking the legibility of displays by dichromats, Color Research and Application, vol.24, no.4, pp.243-252 (Aug. 1999).

[19] M. Ichikawa, K. Tanaka, S. Kondo, K. Hiroshima, K. Ichikawa, S. Tanabe, and K. Fukami: Web-page color modification for barrier-free color vision with genetic algorithm, Lecture Notes in Computer Science, vol.2724, pp.2134-2146 (2003).

[20] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall: Detail preserving reproduction of color images for monochromats and dichromats, IEEE Computer Graphics and Applications, vol.25, no.3, pp. 22-30 (May/Jun. 2005).

[21] K. Rasche, R. Geist, and J. Westall: Re-coloring images for gamuts of lower dimension, Eurographics 2005, vol.24, pp.423–432 (Aug. 2005).

[22] 石田康祐, 岡嶋克典: カテゴリカル色知覚を考慮した知能的カラーユニバーサルデザイン支援ツール, 日本色彩学会誌, vol.34, suppl., pp.22-23 (2010).

[23] カラーユニバーサルデザイン機構: Color Universal Design, ハート出版, 2009.

[24] 特定非営利活動法人カラーユニバーサルデザイン機構, http://www.cudo.jp/, 2010.

[25] 小林光夫, 吉識香代子: NCSの構造解析（I）ひとつの均等色空間の構成, 日本色彩学会誌, vol.20, no.3, pp.131-139 (1996).

[26] Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space- sRGB, IEC 61966-2-1, 1999.

[27] 太田尚, 矢口博久, 溝上陽子: 異常三色覚者の色の見えの再現方法に関する検証, 日本色彩学会誌, vol.34, suppl., pp.96-97 (2010).

[28] iPhone/iPodで色覚補助する【色のシミュレータ】【色のめがね】, NEW MEDIA, 1-2011, no.333 (Dec. 2010).

[29] え、それってどういうこと？ 第163回, 週刊アスキー, 2011年2月15日号, no.819 (Feb. 2011).

[30] 色空間, ウィキペディア日本語版, 2010年10月18日02:15UTCの版, http://ja.wikipedia.org/wiki/%E8%89%B2%E7%A9%BA%E9%96%93#XYZ.E8.A1.A8.E8.89.B2.E7.B3.BB, 2010.

[31] 目黒光彦: 色覚障害を克服するカラー画像の色変換処理, 財団法人電気通信普及財団研究調査報告書, no.21, pp.499-508 (2006).

[32] 神戸秀, 岡嶋克典: 実効輝度と色認識特性を考慮した色覚異常シミュレーション, 日本色彩学会誌, vol.31, suppl., pp.6-7 (2007).

[33] 前川満良, 伊藤啓, 米光潤朗, 小野正貴, 高橋哲郎: 色覚バリアフリーのための色弱シミュレーターの開発, 石川県工業試験場平成17年度研究報告, vol.55 (2005).

[34] M. Ichikawa, K. Tanaka, S. Kondo, K. Hiroshima, K. Ichikawa, S. Tanabe, and K. Fukami: Preliminary study on color modification for still images to realize barrier-free color vision, proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Press, vol.1, pp.36-41 (2004).

[35] D. R. Flatla and C. Gutwin: Individual models of color differentiation to improve interpretability of information visualization, CHI 2010, pp.2563-2572 (2010).

[36] D. R. Flatla: A predictive model of colour differentiation, the Department of Computer Science University of Saskatchewan Saskatoon, 2009.

[37] L. Troiano, C. Birtolo and M. Miranda: Adapting palettes to color vision deficiencies by genetic algorithm, GECCO 2008, pp.1065-1072 (2008).

[38] V. C. Smith and J. Pokorny: The science of color, Elsevier Ltd., 2003.

[39] G. Jordan, S. S. Deeb, J. M. Bosten, and J. D. Mollon: The dimensionality of color vision in carriers of color anomalies, Journal of Vision, vol.10, no.8, pp.1-19 (2010).

[40] J. M. Bosten, and J. D. Mollon: Is there a general trait of susceptibility to simultaneous contrast?, Vision Research, vol.50, no.17, pp.1656-1664 (2010).

[41] H. Winnemöller: Perceptually-motivated non-photorealistic graphics, Ph.D. thesis, Northwestern University, 2006.

[42] J. G. Hailwood, and H. E. Roaf: The sensation of yellow and anomalous trichromatism, Journal of Physiology, vol.18, no.91, pp.36-47 (Oct. 1937).

[43] J. B. Huang, S. Y. Wu, and C. S. Chen: Enhancing color representation for the color vision impaired, ECCV Workshop on Computer Vision Applications for the Visually Impaired, 2008.

[44] D. R. Flatla: A predictive model of colour differentiation, M.Sc. thesis, University of Saskatchewan, 2009.

[45] L. M. Cárdenas: Evaluation of variability in visual assessment of small color differences, Ph.D. thesis, North Carolina State University, 2009.

[46] L. T. Sharpe, A. Stockman, H. Jägle and J. Nathans: Opsin genes, cone photopigments, color vision, and color blindness, in K. R. Gegenfurtner, L. T. Sharpe(eds), Color vision from genes to perception, Cambridge University Press, Cambridge, pp.3-52 (1999).

[47] C. H. Graham and Y. Hsia: The spectral luminosity curves for a dichromatic eye and a normal eye in the same person, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol.44, no.1, pp. 46-49 (Jan. 1958).

[48] A. Stockman, D. I. A. MacLeod, and N. E. Johnson: Spectral sensitivities of the human cones, Journal of the Optical Society of America A, vol.10, no.12, pp.2491–2521 (Dec. 1993).

[49] D. B. Judd: Fundamental studies of color vision from 1860 to 1960, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol.55, no.6, pp.1313-1330 (1966).

付録A. 新配カード199aの色

付表1　実験で使用した「新配カード199a」の色．マンセルHVC値はカード記載値，CIEXYZのXYZ値はHVCより計算で求めた．PI-1〜PI-10，BR-1〜BR-7の17票は色値が表示されていなかったため，実測によりXYZのみ求めた．

	H	V	C	X	Y	Z
v1	10RP	4	13.5	0.219	0.117	0.106
v2	4R	4.5	14	0.271	0.152	0.08
v3	7R	5	14	0.321	0.193	0.066
v4	10R	5.5	14	0.365	0.24	0.046
v5	4YR	6	14	0.39	0.293	0.033
v6	8YR	7	13.5	0.488	0.42	0.047
v7	2Y	7.5	13	0.514	0.494	0.055
v8	5Y	8	13	0.55	0.576	0.061
v9	8Y	7.5	12	0.444	0.494	0.054
v10	3GY	7	12	0.33	0.42	0.043
v11	8GY	6	11.5	0.182	0.293	0.062
v12	3G	5.5	11	0.128	0.24	0.143
v13	9G	5	10.5	0.1	0.193	0.191
v14	5BG	4.5	10	0.082	0.152	0.233
v15	10BG	4	10	0.067	0.117	0.266
v16	5B	4	10	0.082	0.117	0.345
v17	10B	3.5	10.5	0.075	0.088	0.329
v18	3PB	3.5	11.5	0.088	0.088	0.37
v19	6PB	3.5	11.5	0.103	0.088	0.37
v20	9PB	3.5	11.5	0.121	0.088	0.349
v21	3P	3.5	11.5	0.136	0.088	0.3
v22	7P	3.5	11.5	0.145	0.088	0.254
v23	1RP	3.5	11.5	0.154	0.088	0.202
v24	6RP	4	12.5	0.21	0.117	0.163
b2	4R	6	12	0.433	0.293	0.198
b4	10R	6.5	11.5	0.478	0.353	0.135
b6	8YR	7.5	11.5	0.558	0.494	0.107
b8	5Y	8.5	11	0.632	0.667	0.133
b10	3GY	7.5	10	0.4	0.494	0.104
b12	3G	6.5	9	0.226	0.353	0.248
b14	5BG	6	8.5	0.193	0.293	0.397
b16	5B	5.5	8.5	0.186	0.24	0.517
b18	3PB	5	10	0.185	0.193	0.553
b20	9PB	5	10	0.229	0.193	0.531
b22	7P	5	10	0.265	0.193	0.415
b24	6RP	5.5	10.5	0.35	0.24	0.296
dp2	4R	3.5	11.5	0.16	0.088	0.049
dp4	10R	4	11	0.183	0.117	0.026
dp6	8YR	5	11	0.229	0.193	0.019
dp8	5Y	6	10.5	0.284	0.293	0.031
dp10	3GY	5	9.5	0.15	0.193	0.02
dp12	3G	4	8.5	0.062	0.117	0.074
dp14	5BG	3.5	8	0.05	0.088	0.137
dp16	5B	3	8	0.046	0.064	0.192
dp18	3PB	2.5	9.5	0.046	0.045	0.204
dp20	9PB	2.5	9.5	0.065	0.045	0.189
dp22	7P	2.5	9.5	0.077	0.045	0.138
dp24	6RP	3	10	0.118	0.064	0.097

	H	V	C	X	Y	Z
lt2	4R	7	8	0.526	0.42	0.36
lt4	10R	7.5	8	0.596	0.494	0.31
lt6	8YR	8	8	0.623	0.576	0.248
lt8	5Y	8.5	7.5	0.632	0.667	0.258
lt10	3GY	8	7	0.492	0.576	0.245
lt12	3G	7.5	6	0.375	0.494	0.42
lt14	5BG	7	6	0.323	0.42	0.528
lt16	5B	6.5	6	0.296	0.353	0.601
lt18	3PB	6	7	0.28	0.293	0.602
lt20	9PB	6	7	0.317	0.293	0.591
lt22	7P	6	7	0.352	0.293	0.501
lt24	6RP	6.5	7.5	0.443	0.353	0.421
sf2	4R	6	6.5	0.361	0.293	0.26
sf4	10R	6.5	6.5	0.418	0.353	0.243
sf6	8YR	7	6.5	0.451	0.42	0.207
sf8	5Y	7.5	6	0.471	0.494	0.224
sf10	3GY	7	5.5	0.363	0.42	0.211
sf12	3G	6.5	5	0.274	0.353	0.31
sf14	5BG	6	5	0.146	0.193	0.252
sf16	5B	5.5	5	0.203	0.24	0.403
sf18	3PB	5	5.5	0.185	0.193	0.381
sf20	9PB	5	5.5	0.208	0.193	0.378
sf22	7P	5	5.5	0.228	0.193	0.323
sf24	6RP	5.5	6	0.297	0.24	0.288
d2	4R	4.5	6.5	0.201	0.152	0.125
d4	10R	5	6.5	0.241	0.193	0.114
d6	8YR	5.5	6.5	0.265	0.24	0.095
d8	5Y	6	6	0.282	0.293	0.106
d10	3GY	5.5	5.5	0.202	0.24	0.099
d12	3G	5	5	0.143	0.193	0.163
d14	5BG	4.5	5	0.113	0.152	0.203
d16	5B	4	5	0.096	0.117	0.223
d18	3PB	3.5	5.5	0.085	0.088	0.209
d20	9PB	3.5	5.5	0.1	0.088	0.206
d22	7P	3.5	5.5	0.113	0.088	0.17
d24	6RP	4	6	0.158	0.117	0.147
dk2	4R	2.5	6	0.068	0.045	0.038
dk4	10R	3	6	0.089	0.064	0.031
dk6	8YR	3.5	6	0.102	0.088	0.024
dk8	5Y	4	5.5	0.114	0.117	0.031
dk10	3GY	3.5	5	0.072	0.088	0.028
dk12	3G	3	4.5	0.044	0.064	0.052
dk14	5BG	2.5	4.5	0.031	0.045	0.065
dk16	5B	2.5	4.5	0.036	0.045	0.098
dk18	3PB	2	5	0.03	0.03	0.089
dk20	9PB	2	5	0.037	0.03	0.086
dk22	7P	2	5	0.042	0.03	0.068
dk24	6RP	2.5	5.5	0.066	0.045	0.064

	H	V	C	X	Y	Z
p2	4R	8	3.5	0.617	0.576	0.608
p4	10R	8	3.5	0.614	0.576	0.545
p6	8YR	8.5	3.5	0.679	0.667	0.533
p8	5Y	9	3	0.735	0.767	0.596
p10	3GY	8.5	3	0.611	0.667	0.518
p12	3G	8	3	0.497	0.576	0.574
p14	5BG	8	3	0.502	0.576	0.692
p16	5B	8	3	0.527	0.576	0.786
p18	3PB	7.5	3	0.478	0.494	0.703
p20	9PB	7.5	3	0.497	0.494	0.697
p22	7P	7.5	3	0.516	0.494	0.654
p24	6RP	8	3	0.606	0.576	0.678
ltg2	4R	7	2	0.435	0.42	0.465
ltg4	10R	7	2	0.434	0.42	0.437
ltg6	8YR	7.5	2	0.497	0.494	0.463
ltg8	5Y	7.5	2	0.477	0.494	0.429
ltg10	3GY	7.5	2	0.461	0.494	0.433
ltg12	3G	7	2	0.374	0.42	0.439
ltg14	5BG	7	2	0.377	0.42	0.505
ltg16	5B	7	2	0.392	0.42	0.552
ltg18	3PB	6.5	2	0.343	0.353	0.478
ltg20	9PB	6.5	2	0.353	0.353	0.477
ltg22	7P	6.5	2	0.363	0.353	0.456
ltg24	6RP	7	2	0.434	0.42	0.495
g2	4R	4	2	0.128	0.117	0.123
g4	10R	4	2	0.127	0.117	0.111
g6	8YR	4.5	2	0.157	0.152	0.127
g8	5Y	4.5	2	0.147	0.152	0.116
g10	3GY	4.5	2	0.139	0.152	0.124
g12	3G	4	2	0.101	0.117	0.12
g14	5BG	4	2	0.102	0.117	0.146
g16	5B	4	2	0.106	0.117	0.168
g18	3PB	3.5	2	0.085	0.088	0.138
g20	9PB	3.5	2	0.091	0.088	0.14
g22	7P	3.5	2	0.096	0.088	0.129
g24	6RP	4	2	0.129	0.117	0.141
dkg2	4R	2	1.5	0.035	0.03	0.033
dkg4	10R	2	1.5	0.034	0.03	0.029
dkg6	8YR	2.5	1.5	0.047	0.045	0.037
dkg8	5Y	2.5	1.5	0.044	0.045	0.035
dkg10	3GY	2.5	1.5	0.041	0.045	0.038
dkg12	3G	2	1.5	0.027	0.03	0.032
dkg14	5BG	2	1.5	0.027	0.03	0.039
dkg16	5B	2	1.5	0.028	0.03	0.045
dkg18	3PB	1.5	1.5	0.019	0.02	0.034
dkg20	9PB	1.5	1.5	0.021	0.02	0.034
dkg22	7P	1.5	1.5	0.022	0.02	0.031
dkg24	6RP	2	1.5	0.035	0.03	0.039

	H	V	C	X	Y	Z
W	N9.5	9.5	0	0.861	0.878	1.037
Gy-9	N9	9	0	0.752	0.767	0.907
Gy-8.5	N8.5	8.5	0	0.654	0.667	0.788
Gy-8	N8	8	0	0.565	0.576	0.681
Gy-7.5	N7.5	7.5	0	0.485	0.494	0.584
Gy-7	N7	7	0	0.412	0.42	0.496
Gy-6.5	N6.5	6.5	0	0.346	0.353	0.417
Gy-6	N6	6	0	0.287	0.293	0.346
Gy-5.5	N5.5	5.5	0	0.235	0.24	0.283
Gy-5	N5	5	0	0.189	0.193	0.228
Gy-4.5	N4.5	4.5	0	0.149	0.152	0.18
Gy-4	N4	4	0	0.115	0.117	0.138
Gy-3.5	N3.5	3.5	0	0.086	0.088	0.104
Gy-3	N3	3	0	0.063	0.064	0.076
Gy-2.5	N2.5	2.5	0	0.044	0.045	0.053
Gy-2	N2	2	0	0.03	0.03	0.036
Bk	N1.5	1.5	0	0.019	0.02	0.023
PI-1				0.671	0.601	0.676
PI-2				0.625	0.512	0.508
PI-3				0.499	0.348	0.328
PI-4				0.436	0.295	0.407
PI-5				0.665	0.576	0.532
PI-6				0.585	0.441	0.371
PI-7				0.51	0.357	0.287
PI-8				0.313	0.196	0.144
PI-9				0.657	0.596	0.404
PI-10				0.535	0.385	0.185
BR-1				0.141	0.128	0.108
BR-2				0.163	0.15	0.122
BR-3				0.229	0.211	0.153
BR-4				0.25	0.238	0.169
BR-5				0.094	0.085	0.076
BR-6				0.098	0.093	0.079
BR-7				0.072	0.07	0.059

付録B. 用語集と色度図

本論文中で使用している色彩関連用語の内，主なものについてその定義を付表2に示す．本用語集の大部分は，JIS Z 8105（色に関する用語）およびJIS Z 8113（照明用語）から引用した[9].

また，付図1，付図2に，xy色度図と$u'v'$色度図を示す.

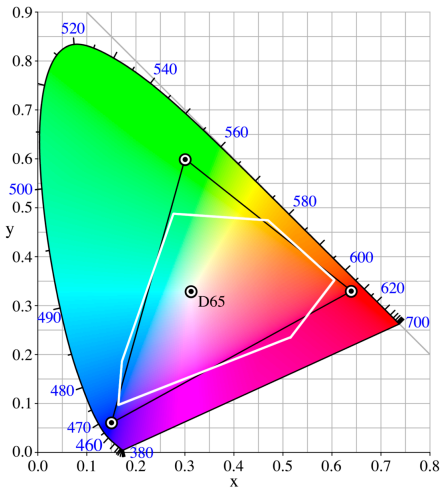
付表2　本論文中で使用している色彩関連用語（主なもの）[9]．特に記載がない限り，番号は，JIS Z 8105の用語番号を示す.

番号	用語	定義	対応外国語
1002	分光密度	波長λを中心とする微小波長幅内に含まれる放射量X_eの，単位波長幅あたりの割合.	spectral concentration
1003	分光分布	分光密度X_e,λの波長λに対する分布.	spectral distribution
1007	輝度	発光面上，受光面上又は放射の伝ぱん路の断面上において，次式によって定義される量. $L = \mathrm{d}\Phi_\mathrm{v} / \mathrm{d}A \cdot \cos\theta \cdot \mathrm{d}\Omega$ ここで，$\mathrm{d}\Phi_\mathrm{v}$：与えられた方向を含む立体角$\mathrm{d}\Omega$内を伝ぱんする要素ビームによって伝達される光束 $\mathrm{d}A$：与えられた点を含むそのビームの断面の面積 θ：その断面の法線とそのビームとがなす角	luminance
2003	色刺激	目に入って，有彩又は無彩の色感覚を生じさせる可視放射.	colour stimulus
2007	無彩色刺激	一般的な条件の下で，無彩（知覚）色を生じさせる色刺激.	achromativ stimulus
2009	単色光刺激，スペクトル刺激	一つの単色放射からなる（色）刺激.	monochromatic stimulus; spectral stimulus
2019	加法混色	複数の色刺激を，網膜の同じ箇所に同時に若しくはフリッカを生じない程度の高い周波数で交互に入射させるか，又は分解して見えない程度の細かいモザイク状などの配置で結像させて行う色刺激の混合方法.	additive mixture of colour stimuli
2023	等色，色合わせ	与えられた色刺激と，色が等しく見える別の色刺激を作る行為.	colour matching
2027	三色表色系	適当に選ばれた3個の原刺激の加法混色による等色に基づいて，色刺激を三刺激値によって記述する体系.	trichromatic system
2028	元刺激	三色表色系が基礎とする3個の色刺激のセット.	reference colour stimuli

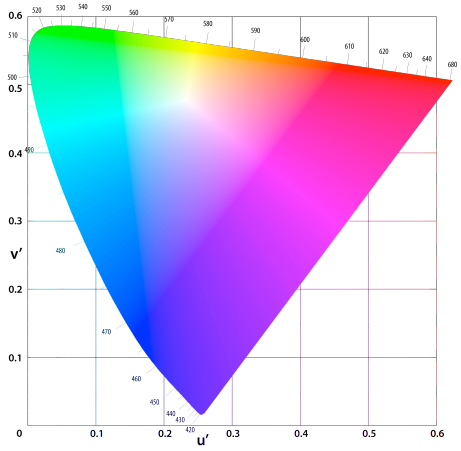
番号	用語	定義	対応外国語
2029	三刺激値	与えられた三色表色系において，試料の色刺激を等色するための3個の原刺激の量.	tristimulus values (of a colour stimulus)
2030	等色関数（三色表色系の）	可視波長の全域にわたって，それぞれ等しい放射パワーをもつ単色光刺激の三刺激値.	colour-matching functions (of a colour stimulus)
2032	色空間	色の幾何学的表示に用いる，通常3次元の空間.	colour space
2035	色票	色の表示などを目的とする色紙又は類似の材料による表面色の標準試料．特定の基準，例えば，JIS Z 8721に基づいて作成した色票を標準色票という.	colour chip
2036	*XYZ*表色系，CIE 1931（標準）表色系	CIEが1931年に採択した元刺激を[X], [Y], [Z]及びCIE等色関数$\bar{x}(\lambda),\bar{y}(\lambda),\bar{z}(\lambda)$ を用いて，任意の分光分布の三刺激値を決定する表色の体系.	CIE 1931 standard colorimetric system (XYZ)
2038	CIE等色関数	CIE 1931表色系における関数$\bar{x}(\lambda),\bar{y}(\lambda),\bar{z}(\lambda)$ 又はCIE 1964表色系における関数$\bar{x}_{10}(\lambda),\bar{y}_{10}(\lambda),\bar{z}_{10}(\lambda)$ （ISO/CIE 10527及びCIE出版物No.15.2参照）.	CIE colour-matching functions
2041	色度座標	三刺激値の各々の，それらの和に対する比.	chromaticity coordinates
2042	色度	色度座標によって，又は主波長若しくは補色主波長と純度との組合せによって定められる色刺激の性質.	chromaticity
2043	色度図	色度座標で定められる図上の点が色刺激の色度を表す平面図.	chromaticity diagram
2044	*xy*色度図，CIE 1931色度図	CIE標準表色系において，通常，*y*を縦軸とし，*x*を横軸とする色度図. （筆者加筆：*x*, *y*は以下の式で定義される. $x = \frac{X}{X+Y+Z}$ $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$ ここに，*X*，*Y*，*Z*は，対象とする色刺激のCIE 1931又は1964標準表色系における三刺激値．）	*x*, *y* chromaticity diagram
2048	紫刺激	色度図上で，特定の無彩色刺激を表す点，並びに380nm及び780nmにほぼ相当するスペクトル軌跡の両端によって定められる三角形内にある点によって表される色刺激.	purple stimulus
2052	主波長（色刺激の）	特定の無彩色刺激と適当な比率で加法混色することによって，特定の無彩色刺激に等色するような単色光刺激の波長.	dominant wavelength (of a colour stimulus)

番号	用語	定義	対応外国語
2053	補色主波長（色刺激の）	試料の紫刺激と適当な比率で加法混色することによって，特定の無彩色刺激に等色するような単色光刺激の波長.	complementary wavelength (of a colour stimulus)
2054	純度（色刺激の）	単色光刺激と特定の無彩色刺激とを加法混色して試料色刺激に等色するとき，その単色光刺激と特定の無彩色刺激との量の比率を示す数値.	purity (of a colour stimulus)
2057	色差	二つの色の間に知覚される色の隔たり，又はそれを数値化した値.	(perceived) colour difference
2059	均等色空間	その中の等しい距離が，いずれも弁別いきか，又はそれ以上の等しい色差を表すことを意図した色空間.	uniform colour space
2060	UCS色度図	図全体にわたって，等しい距離が等輝度の色の等しい色差をできるだけ良い近似で表すことを意図して，その座標が定義されている2次元の色度図.	uniform-chromaticity-scale diagram; UCS diagram
2061	CIE 1976 UCS色度図，*u'v'*色度図	式(1)によって定義される量*u'*，*v'*を直交座標にプロットして得られるUCS色度図. $u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} = \frac{4x}{-2x+12y+3}$ $v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} = \frac{9y}{-2x+12y+3}$ … (1) ここに，*X*，*Y*，*Z*は，対象とする色刺激のCIE 1931又は1964標準表色系における三刺激値で，*x*，*y*は，対応する色度座標である.	CIE 1976 uniform-chromaticity-scale diagram; CIE 1976 UCS diagram
2063	CIE(1976) *L*u*v**色空間，CIELUV色空間	次の式によって定義される量 *L*u*v** を直交座標にプロットして得られる3次元の近似的な均等色空間. $L^* = 116\left(Y/Y_n\right)^{1/3} - 16$ $Y/Y_n > 0.008856$ $u^* = 13L^*\left(u' - u'_n\right)$ $v^* = 13L^*\left(v' - v'_n\right)$ ここに，$Yu'v'$ は，対象とする色刺激，$Y_n u'_n v'_n$ は特定の無彩色刺激を記述するものである.	CIE 1976 *L*u*v** colour space; CIELUV colour space
2092	色域	特定の条件によって，発色されるすべての色を含む色度図又は色空間内の領域.	colour gamut
3008	無彩色	知覚的意味では，色相をもたない知覚色．白，灰，及び黒の色名が普通に用いられ，透過物体には，無色及び中性が用いられる.	achromatic (perceived) colour
3010	明るさ	ある面から発している光の強弱の見え方の基になる視感覚の属性.	brightness

番号	用語	定義	対応外国語
3011	明度（関連知覚色の）	同様に照明されている白又は透過率が高い面の明るさと比較して，相対的に判断される対象面の明るさ．	lightness (of a related colour)
01001 (JIS Z 8113)	CIE	“Commission Internationale de l'Eclairage”の略記で，国際照明委員会のことである． 参考：CIEは，光と照明の分野での科学，技術及び工芸に関するあらゆる事項について国際的討議を行い，標準と測定の手法を開発し，国際規格及び各国の工業規格の作成に指針を与え，規格・報告書などを出版するとともに他の国際団体との連携・交流をはかることを目的とした国際的な非営利の団体である．	International Commission on Illumination
	sRGB, IEC 61966-2-1	IEC（国際電気標準会議）が1998年に策定したRGB色空間の国際標準規格．パーソナルコンピュータやディスプレイ，プリンタなど機器の違いによらず，色を再現することを目的とし，CRTディスプレイの色表現を元に策定されている．	sRGB



付図1　*xy*色度図[30]．中央部分の黒線の三角形の内側はsRGBの範囲を示す（白線の内側はCMY）．「D65」の点はD65光源を示す．



付図2　*u'v'*色度図[30]．