

すべての人に快適な色彩環境を目指して

宇都宮大学名誉教授
同大OPTセンター名誉フェロー
阿山みよし

自己紹介

● 略歴

1983.3 東京工業大学（現東京科学大学）総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了

カナダ ヨーク大学ポスドク、東工大助手、東京都神経研ポスドクなど放浪の日々

1993.4～2020.3 宇都宮大学工学部・工学研究科（助教授 → 2001年より教授）

2016.4～2020.3 工学部長&工学研究科長

2020.4～ 宇都宮大学名誉教授
同大オプティクス教育研究センター名誉フェロー
エヌエフ基金理事
建設電気協会道路照明委員会委員
タイ ラジャマンガラ工科大タニアプリ校色彩研究所アドバイザー
関連雑誌の査読

学部では780名中女子9名
紅一点、最初の女性・・・
が多かった

・体調管理
・常にベストを尽くす
・流されない協調性を身に付けた日々

工学部組織改革時期なので
異端者が求められた?!

● 色彩科学に進むきっかけ

東工大理学部1年生の頃、単位は取れたが、講義についていけない気がして悩む。

目指す分野を必死で探し「色彩科学」を発見。色彩への理工系アプローチに強く惹かれる。

東工大に日本を代表する専門家（池田光男先生）がいるのを知り、面談を申込み、卒研で池田研に入り色の道へ。



日本ではそれまで心理学科にしかなかった視知覚研究の理工学系での先駆者。視覚科学全般を学ぶ。

専門分野 — 視覚特性とその応用 —

振り返ってみると・・・

1. 色覚とその応用

色覚特性の測定と解明、それを活用した画像表示法の開発

輩出した博士数



「色の見え」だけでは科研費を長期継続できず中断
未練を断ち切れず再開した途端に工学部長になり注力できず 😞

2. 照明と視覚

道路照明の視認性、LED光源の眩しさ評価、質感照明



未だにLED照明は眩しく、積み残し課題は多い 😞

3. 視覚と交通

視覚認知特性を考慮したドライバーへの情報表示
(HONDA時代の高橋会長にお声がけ戴き共同研究)

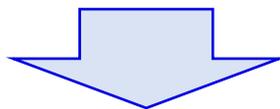
国際会議発表で終わった研究多数
産学連携は活発だったが博士は出せなかった 😞

4. 視聴覚・視触覚融合

効果的なマルチセンソリー情報提示



共同研究者だった若手同僚が引き継いで進化・発展中 😊



惚れ込んだテーマは、研究資金が切れても継続すべき。
「この道ウン十年」が大事。

国際学術活動での経験

約20年間、国際照明委員会（CIE）で活動

光、照明、色、色空間に関する国際標準化団体
国際基準に関してはISOと連携

- 分光視感効率関数を制定
- 輝度や照度等の測光単位を制定
- xy色度図、XYZ色空間等を制定
- 屋内、屋外、道路照明の基準を策定

第1部会 視覚と色（Vision and Colour）に深く関わる

1994～2013 TC1-42の委員長。2014に技術報告発行。

2011～2015 副部会長

毎年の部会会議で、Vision sectionの各委員会からの報告の司会進行

部会長ほか役員と協働できたのは人生の宝

国際組織での物事の進め方
の一端を体感できた

話の展開や、だれが何を
言い出すのか、予想困難

ブロークン英語でも、自分
の意見を言うことが大事。

- 基準や方向性を決める国際組織では、長期にわたり参加し、実働し、メンバーの信頼を得て、役員・委員長にならないとダメ
- 語学の壁は確かにあるが、課題への洞察力が最重要
- 大学や国は、国際組織の役員や委員長という仕事をもっと評価・支援すべき

CIE, Commission Internationale de l'Éclairage
(International Commission on Illumination)

1900：国際ガス灯会議



1900-1913：国際測光委員会



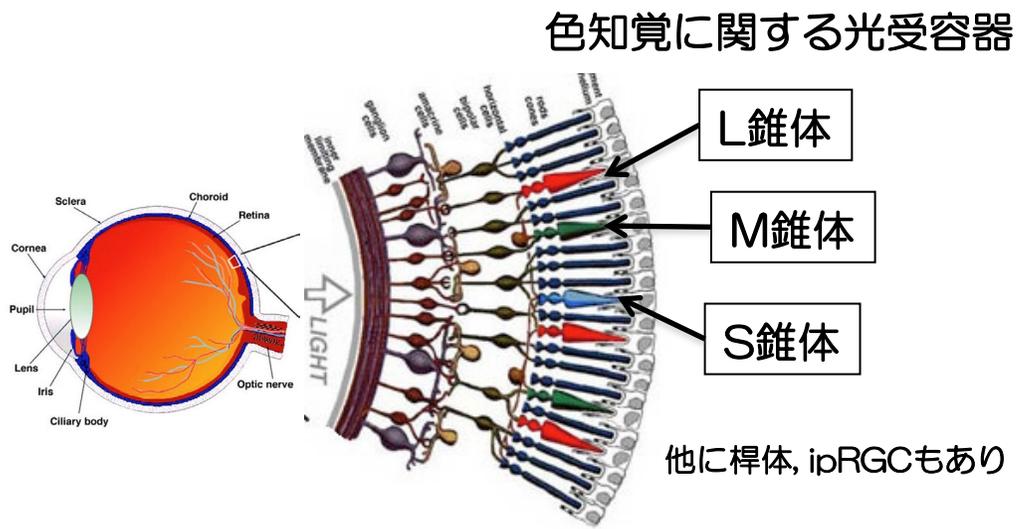
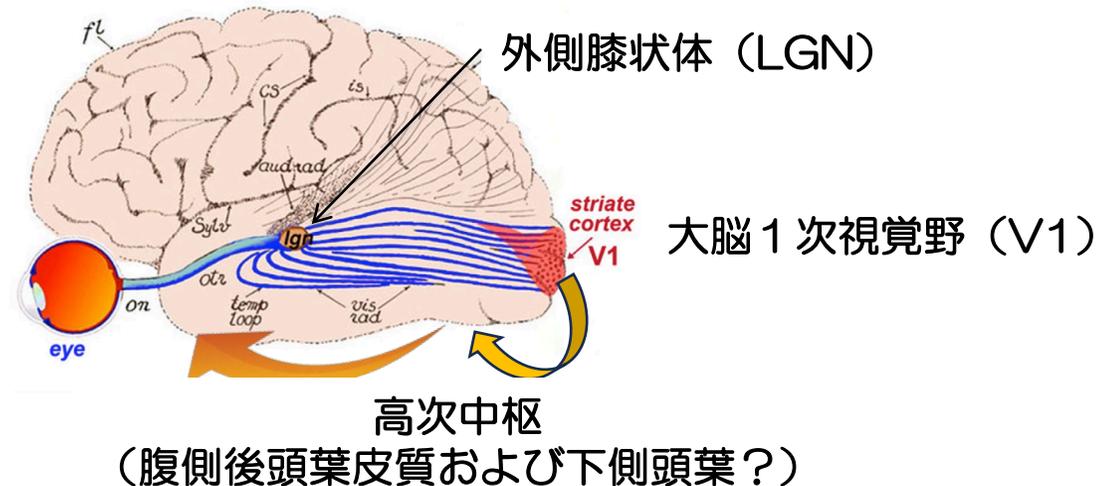
1913：国際照明委員会



2025：112周年

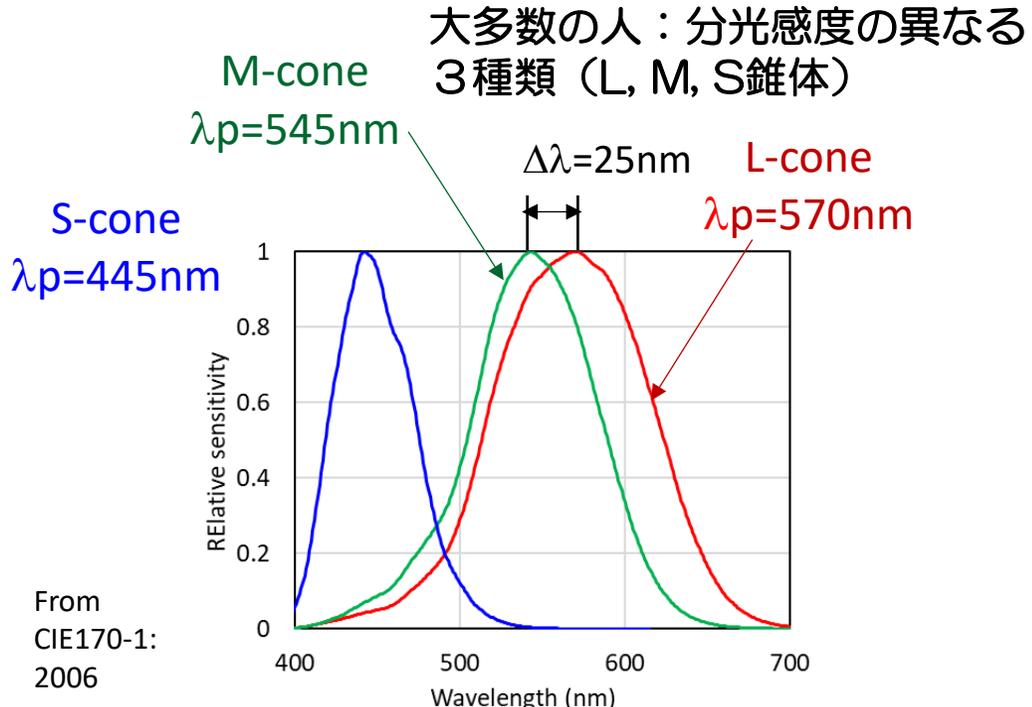
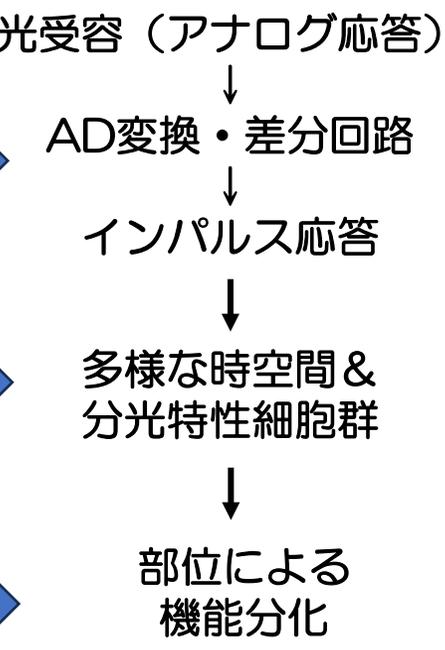
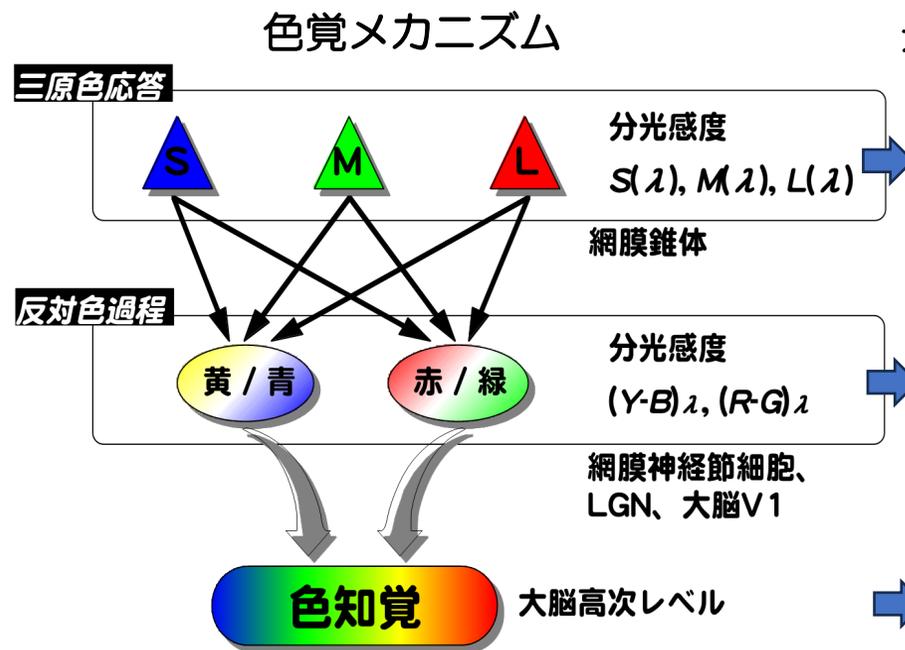
ここから本日の話題へ

色覚のメカニズム



<https://webvision.med.utah.edu/wp-content/uploads/2018/05/sagschem.jpg>

<https://webvision.med.utah.edu/wp-content/uploads/2016/03/Figure-7.jpg>



全ての人の錐体分光感度が同じというわけではない

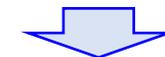
L錐体 又は M錐体が無い、もしくは分光感度がシフトしている人
(男性の4~8%、女性の0.2~0.5%)



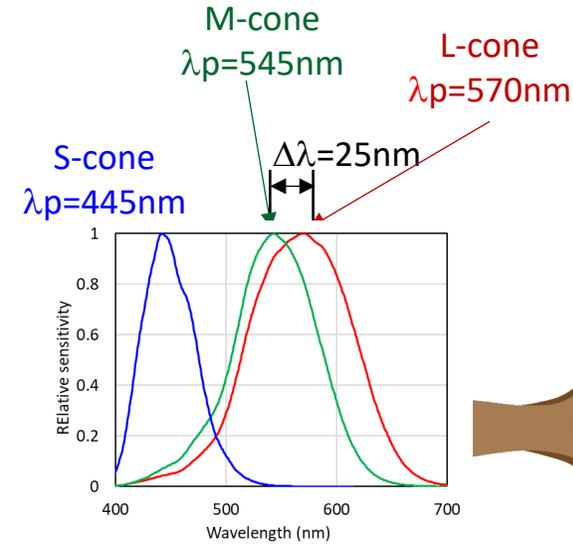
CDOs
(Color Deficient Observers)



中波長域の錐体が1種、もしくは2種でも分光感度の差が小さい

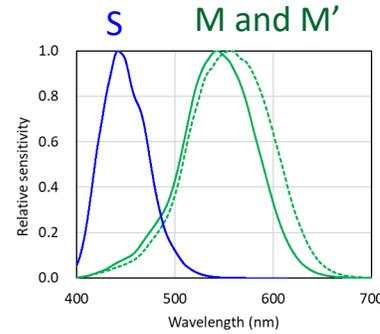


色覚理論的にはLとMの差分回路の出力がない or 小さい。



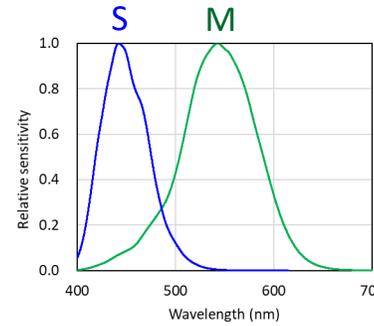
S + M + L
normal trichromat
(CNO)

L・M錐体視物質発現の遺伝子はX染色体に存在し、酷似（塩基配列の相同性98%）しているので、時々交叉する。

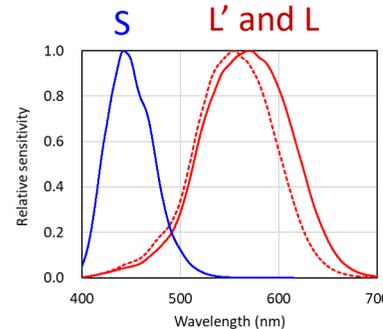


S + M + M'
protanomaly

or

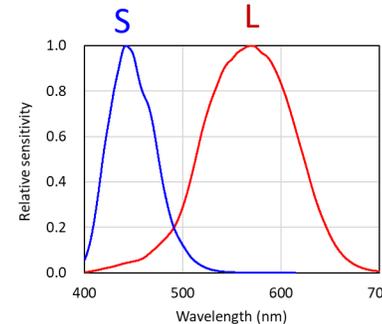


S + M
protanopia

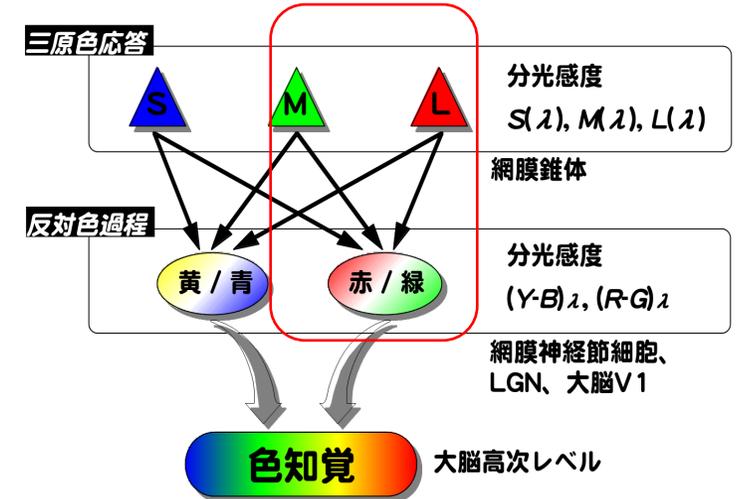


S + L' + L
deuteranomaly

or



S + L
deuteranopia

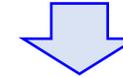


赤～黄～緑の弁別能が低い

ヒトの色覚分類 → 11種類もある！

分類	機能する錐体の種類の数		名称	機能する錐体			割合
				L	M	S	
色覚正常 Color Normal	3色型 Trichromacy	Normal Trichromacy	正常3色覚 Normal Trichromacy	○	○	○	男性:95% 女性:99.8%
先天性色覚異常 Congenital Color- vision Deficiency		Anomalous Trichromacy	1型3色覚 Protanomaly	△ M'	○	○	日本人男性の割合 1型合計:1.5% 2型合計:3.5% ⇒20人に1人
			2型3色覚 Deuteranomaly	○	△ L'	○	
			3型3色覚 Tritanomaly	○	○	△	
		2色型 Dichromacy	1型2色覚 Protanopia	×	○	○	日本人女性の割合 1型+2型:0.2% ⇒500人に1人
			2型2色覚 Deuteranopia	○	×	○	
			3型2色覚 Tritanopia	○	○	×	3型:0.001%以下 ⇒10万人に1人
		1色型 Monochromacy	錐体1色覚 Cone Monochromacy	×	×	○	10万人に1人
				×	○	×	100万人に1人
	○			×	×		
	桿体1色覚 Rod Monochromacy	×	×	×	3万人に1人		
後天性色覚異常 Acquired Color- vision Deficiency	加齢、網膜・視神経以降の視覚系損傷による。どちらかと言えば赤緑異常より青黄異常が目立つ。明確な分類は困難。						

ほとんどは色覚正常か
1型または2型→合わせて320万人



無視できない



カラーユニバーサル
デザインの普及
(地下鉄の路線表示etc)

→ミクロネシアの
ピンゲラップ島で
は4-10%
オリバー・サックス
「色のない島へ」
(1996)

色覚分類に関する用語は多数ある

医学用語（日本眼科学会）*		CUDO**	分子生態学者***	他グループ
2007年まで	2007年以降			
正常3色型色覚	正常色覚	一般色覚 (C型)	祖先型色覚	色覚障害 色覚多様性
色弱	異常3色覚	色弱 (P型、D型)	派生型色覚	色覚特性 少数色覚

*市川一夫（2007年9月6日）.“色覚関連用語について”. 日本医学会医学用語辞典. 日本医学会.

**Color Universal Design Organization

***川端裕人：「色のふしぎ」と不思議な社会

本発表での用語は以下とする。

Normal Trichromacy：一般色覚

Protanomalous }
Protanopia } 1型色覚
(L錐体機能
がない)

Deuteranomalous }
Deuteranopia } 2型色覚
(M錐体機能
がない)

Congenital red-green color vision deficiency：先天性赤緑色弱

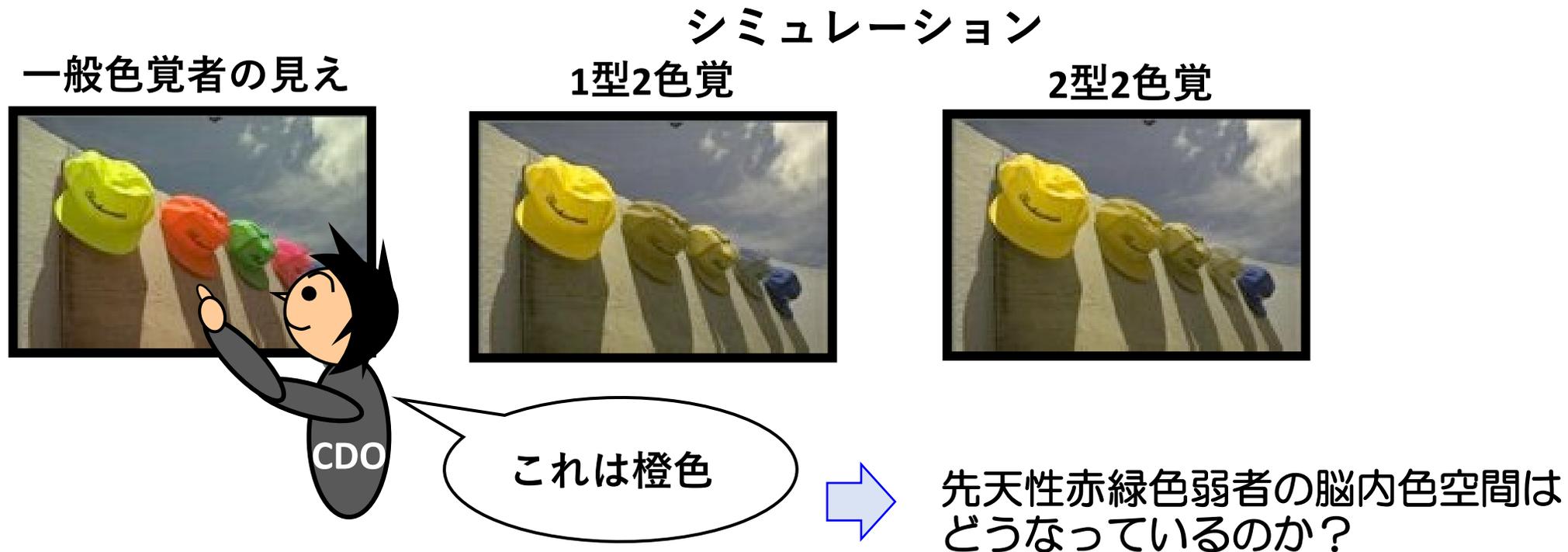
「一般色覚」「色弱」は医学用語ではないが、広く知られている、対象者の差別感が少ないとの報告*より。

色弁別能は低いけど、色名は言える！

先天性赤緑色弱者のカラーネーミングが一般色覚者とさほど変わらない結果報告は多数 [1-9]

シミュレーション

一般色覚者の見え 1型2色覚 2型2色覚



これは橙色

先天性赤緑色弱者の脳内色空間はどうなっているのか？

1. Jameson & Hurvich, Sensory Processes, 1978;

2. Nagy & Boynton, JOSA, 1979;

3. Montag & Boynton, Vision Res., 1987;

4. Shepard & Cooper, Psychol. Sci., 1992;

5. Montag, Vision Res., 1994;

6. Paramei, Psychol. Sci., 1996;

7. Bonnardel, Visual Neurosci., 2006;

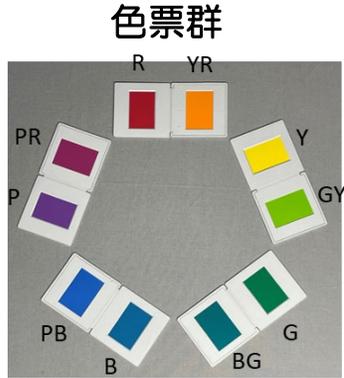
8. Lillo, et al., CRA, 2014

9. Uchikawa, OR., 2014

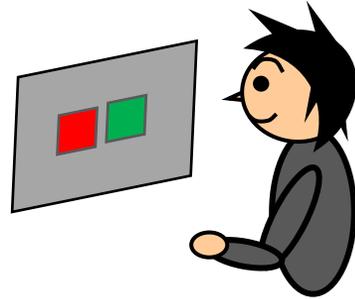
色の見えと色名に関する2つの相違度判定実験

Shepard & Cooper (1992) と同様の実験を一般色覚者（10名）と色弱者（1型10名、2型10名）で実施

1. 知覚的相違度判定実験



2枚選んで提示
総当たり45対



被験者は与えられた対の心理的距離を以下から選ぶ

- 1.非常に近い
- 2.やや近い
- 3.どちらでもない
- 4.やや遠い
- 5.非常に遠い

勝敗表が得られる

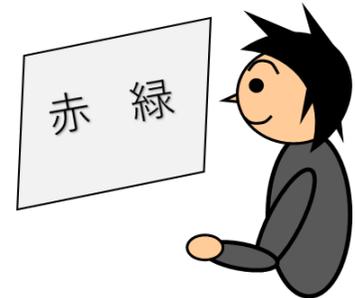
	R	YR	Y	GY	G	BGB	PB	P	PR
R	-								
YR	2	-							
Y	3	1	-						
GY	5	3	2	-					
G	5	4	4	1	-				
BGB	5	5	4	1	1	-			
B	5	5	4	2	2	1	-		
PB	5	5	4	3	2	2	1	-	
P	2	5	5	4	3	2	2	2	-
PR	1	2	4	5	5	4	3	3	1

2. 色名相違度判定実験

色名群

赤, 橙, 黄, 黄緑,
緑, 青緑, 青, 青紫,
紫, 赤紫

2語選んで提示
総当たり45対



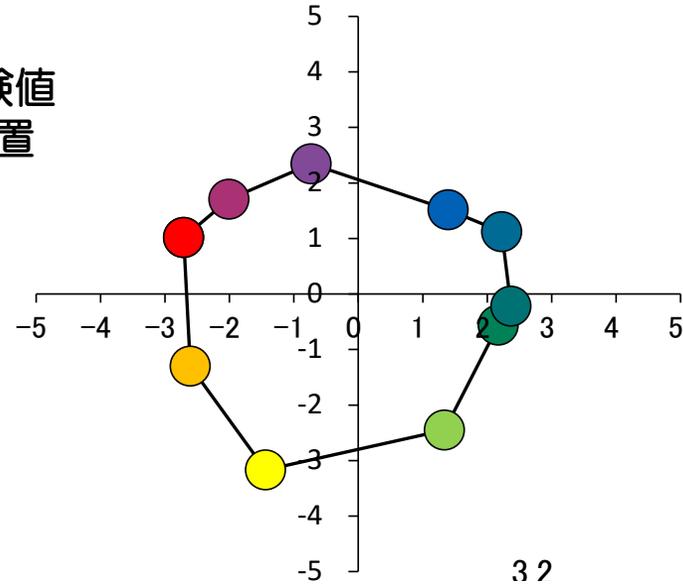
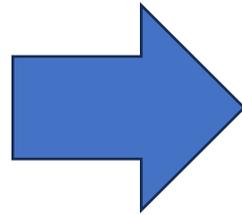
総当たり45対
ランダム順で2セット

多次元尺度構成法 (MDS)

Multidimensional Scaling method

	R	YR	Y	GY	G	BG	B	PB	P	PR
R	-									
YR	2	-								
Y	3	1	-							
GY	5	3	2	-						
G	5	4	4	1	-					
BG	5	5	4	1	1	-				
B	5	5	4	2	2	1	-			
PB	5	5	4	3	2	2	1	-		
P	2	5	5	4	3	2	2	2	-	
PR	1	2	4	5	5	4	3	3	1	-

得られた勝敗表を基に、実験値に最も合う10個の刺激の位置が決まる



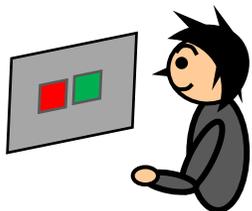
相対的な位置が重要



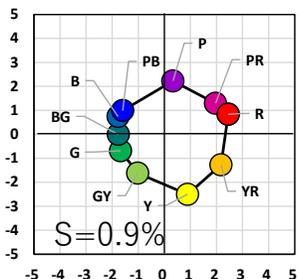
脳内色空間を表す

色の見えと色名に基づく色空間

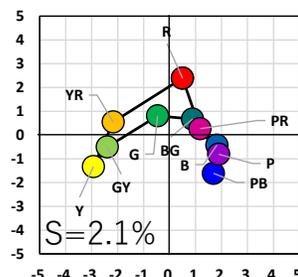
1. 色の見えに基づく脳内色空間



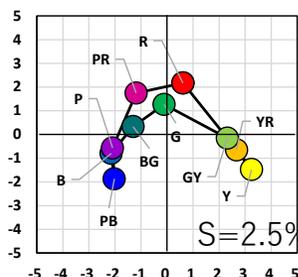
一般色覚



1型



2型



一般色覚者：

- 色の見えと色名による脳内色空間はほぼ同じ

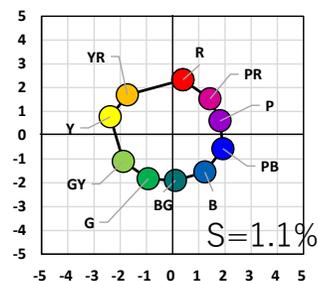
色弱者：

- 色の見えと色名による脳内色空間は異なる
- 色名の脳内配置は一般色覚者のそれに近い

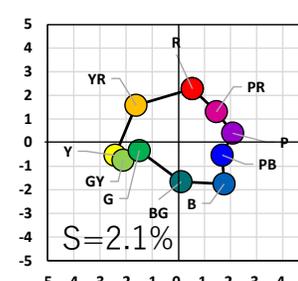
2. 色名（言語）に基づく脳内色空間



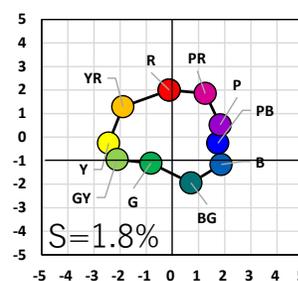
一般色覚



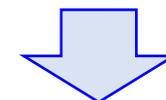
1型



2型



R: 赤, YR: 橙, Y: 黄, GY: 黄緑, G: 緑, BG: 青緑, B: 青, PB: 青紫, P: 紫, PR: 赤紫

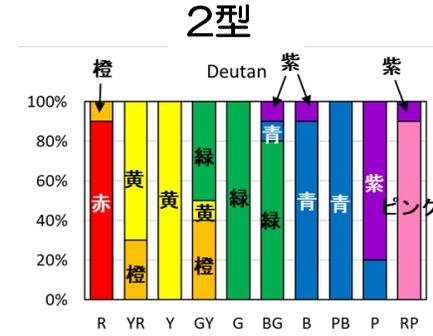
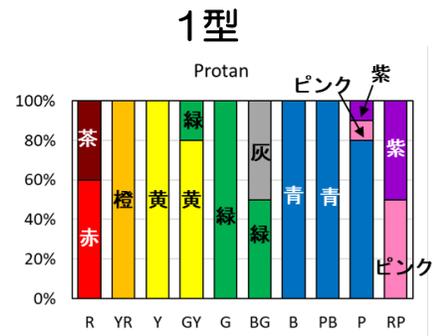
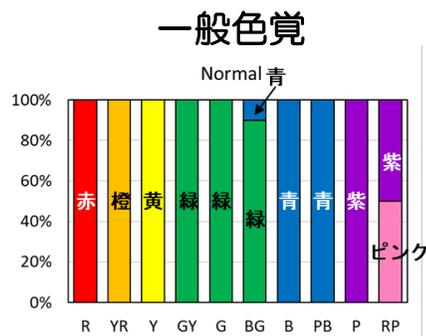
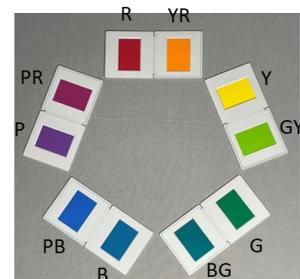


先天性赤緑色弱者の色知覚に基づく色空間は一般色覚者のそれと異なるが、色名に関しては、各個人が各々の知識や経験に基づいて、一般色覚者の色空間と類似した脳内色名空間を構築している

用いた色刺激を色弱者は何色と言うのか？

色票を1枚ずつ提示して、被験者に最も適切な色名を回答させる→カラーネーミング実験。
CNO (5名) CDO (1型5名、2型5名) で実施

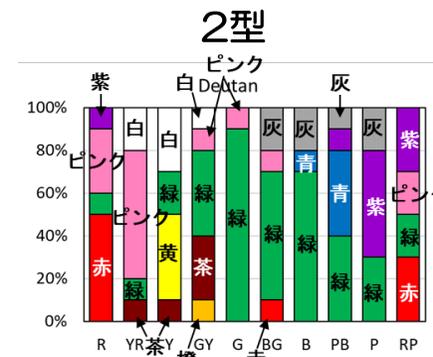
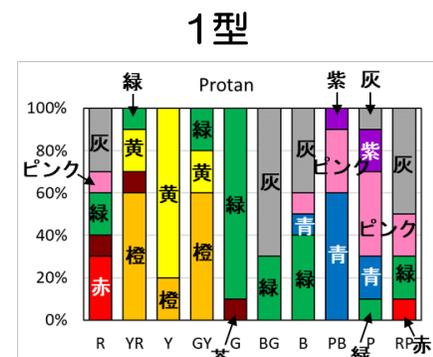
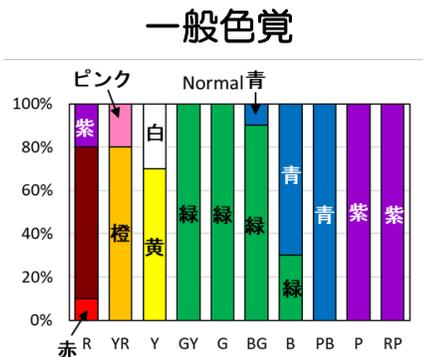
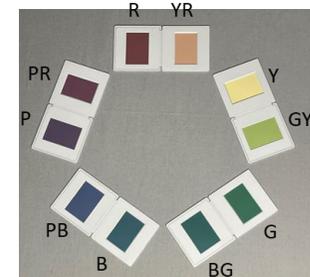
高彩度色票



色弱者のカラーネーミング結果：

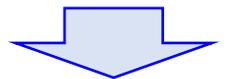
- 高彩度色票では、一般色覚者の結果と大きく変わらない

中彩度色票



- 中彩度色票では、一般色覚者の結果と異なる色名が激増
- 被験者内・被験者間の違いが目立つ

不安定

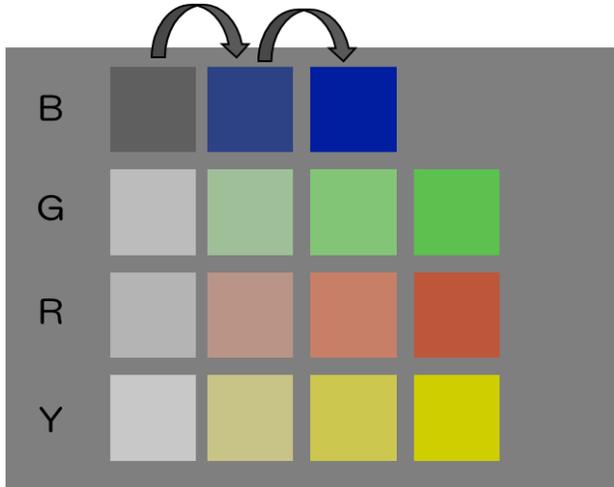


公共的な色表示には中・低彩度の色遣いは避け、高彩度色を用いるべき

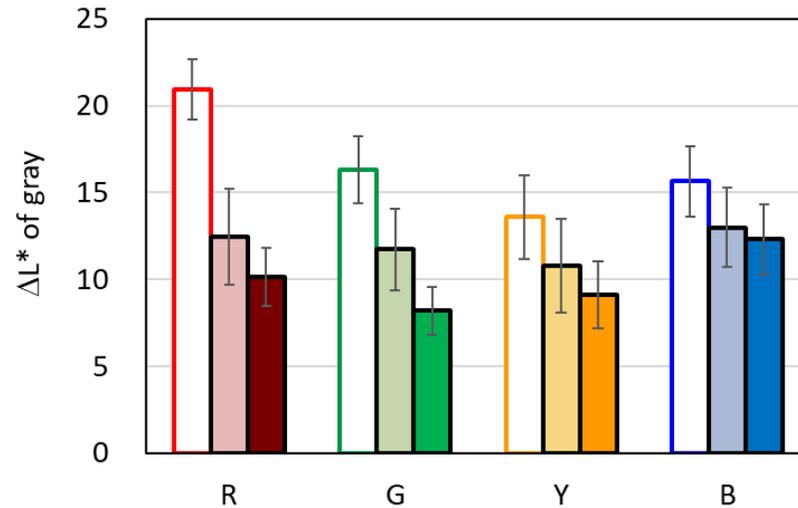
なぜ中彩度刺激のカラーネーミングが不安定になるのか？

知覚的彩度評価の実験

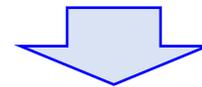
明るさや色相は同じで彩度のみ違う
ペアの知覚的な相違を測定



色弱者の知覚的彩度：一般色覚者の50~80%



色弱者の感じている鮮やかさは、一般色覚者より低い



彩度を強調したら、見やすく好ましくなるのでは？

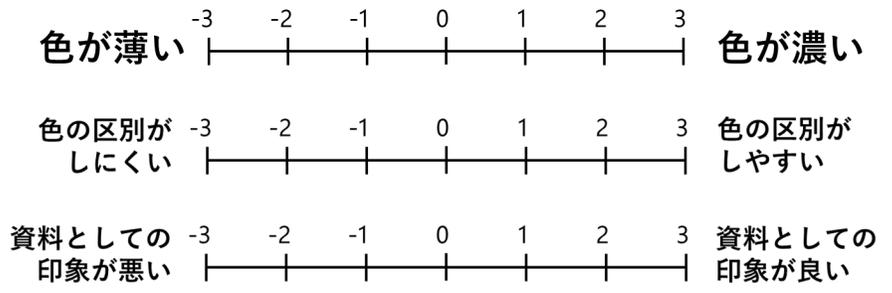
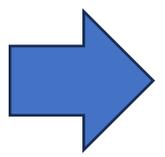
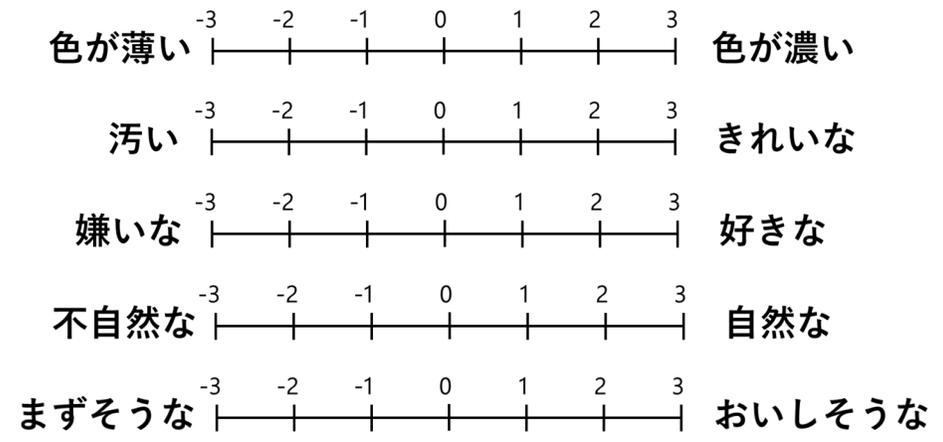
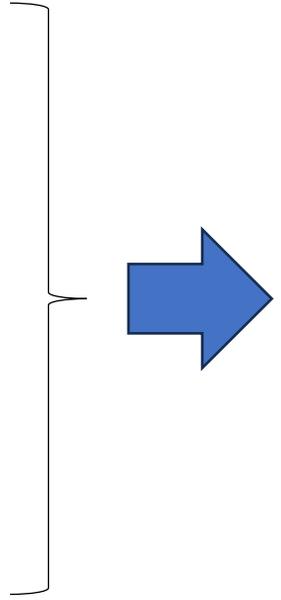
どの程度の彩度強調が良いのか？

彩度変換画像評価実験

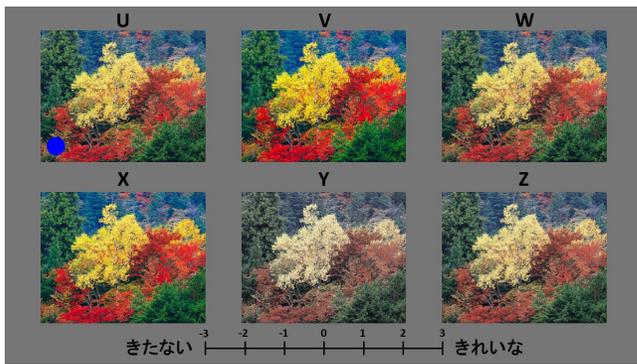
実験画像群



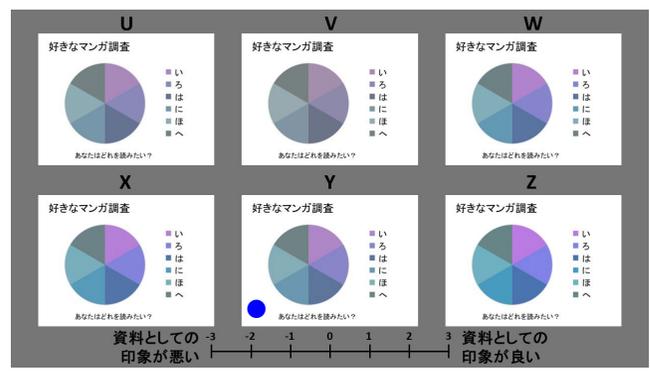
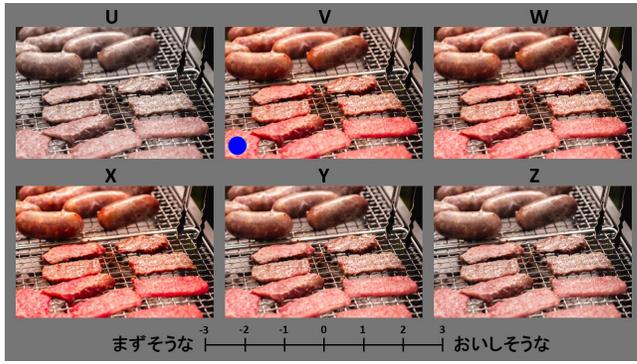
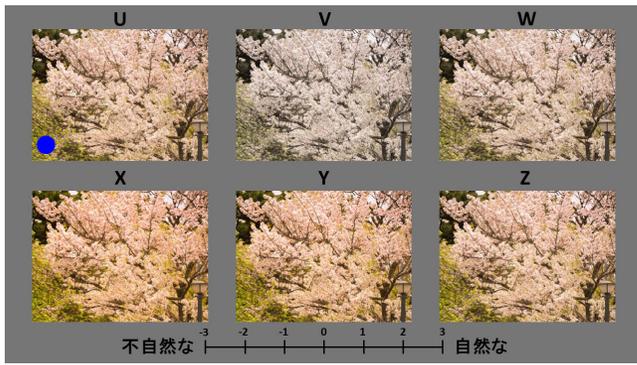
彩度変換した画像群6枚を同時提示し、以下の項目についての主観評価実験を、CNO（12名）CDO（1型7名、2型6名）で実施



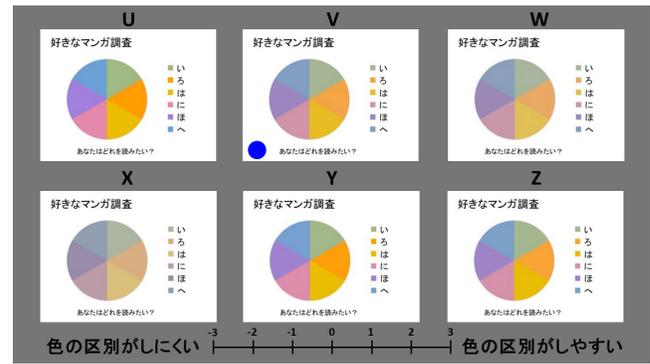
実際の提示画面例と評価項目



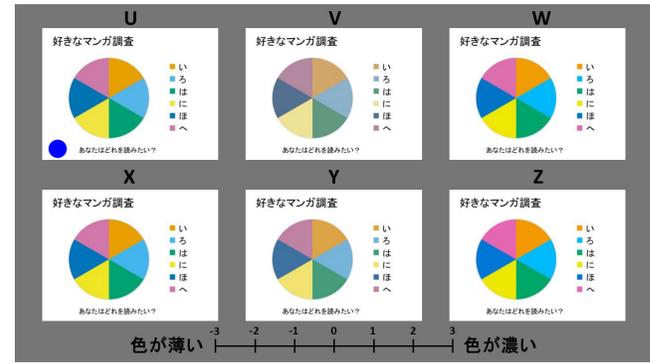
色が薄い vs. 色が濃い
 汚い vs. きれいな
 嫌いな vs. 好きな
 不自然な vs. 自然な
 おいしそうな vs. まずそうな



色が薄い vs. 色が濃い



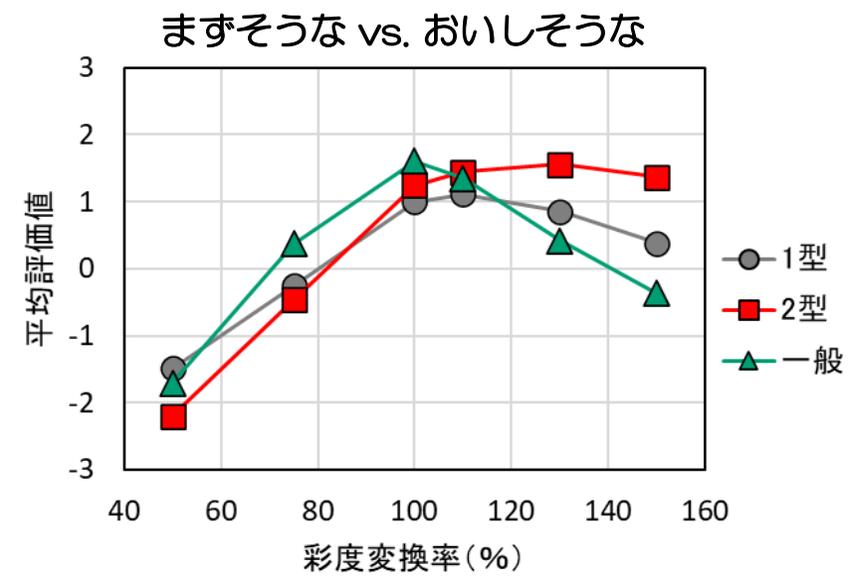
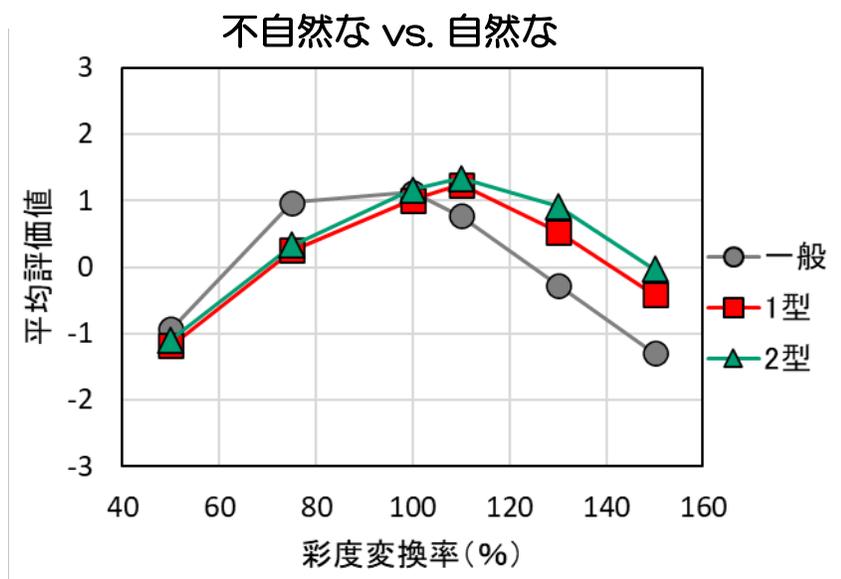
色の区別が
しにくい vs. しやすい



資料としての
印象が悪い vs. 印象が良い

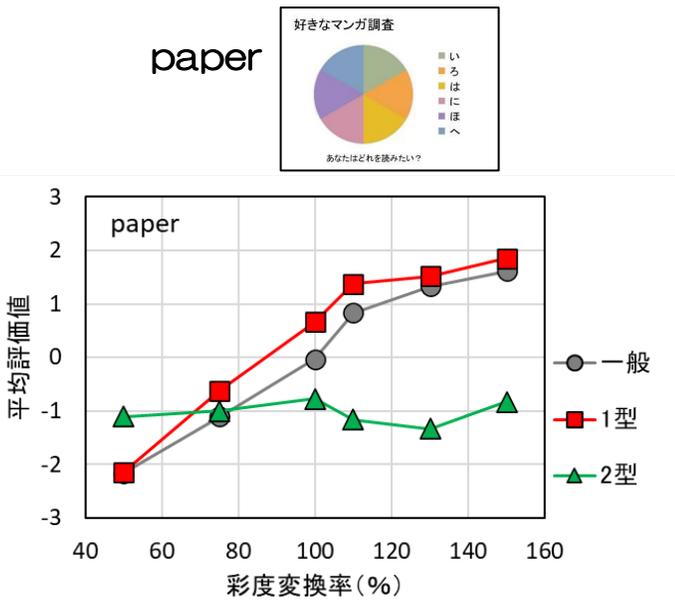
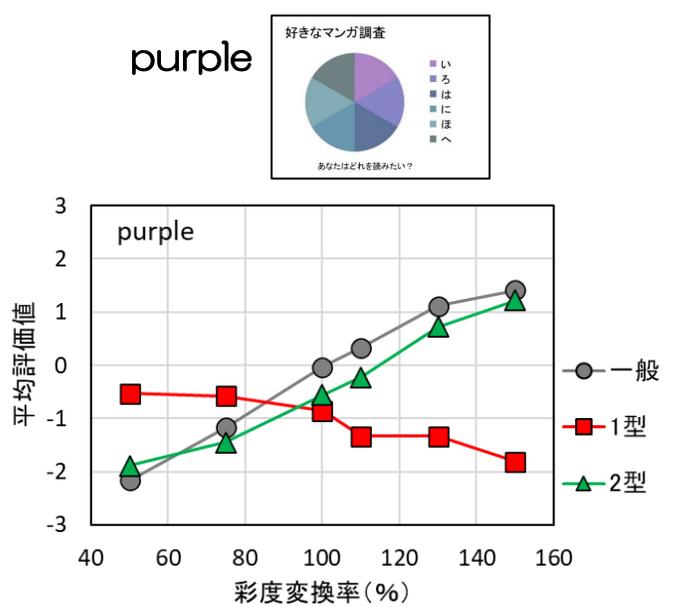
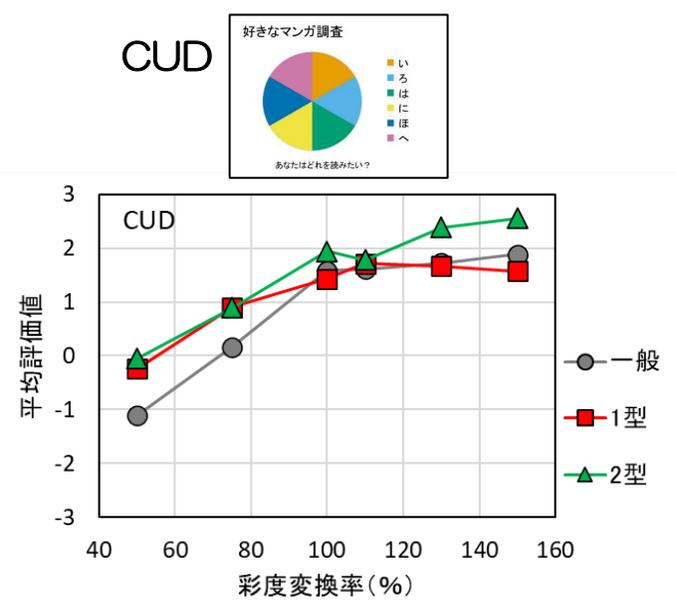
● : 100%画像 (実験では青丸は表示しない)

自然画像 & 食物画像の結果



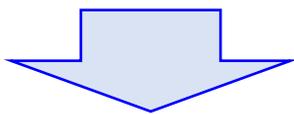
自然画像や食物画像は110%程度の彩度強調がどの色覚タイプにも高評価
(ちょっと強調が良い)

グラフ画像の結果 — 「色の区別がしやすい」について—



CUDはどの色覚タイプでも100%以上で高い評価

purpleは1型色覚者に、paperは2型色弱者に、どの彩度強調しても低い評価

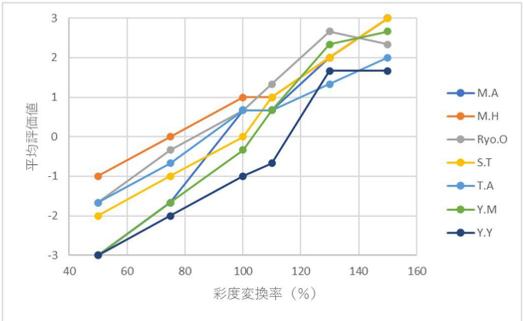


グラフの色表示には中・低彩度の色遣いは避け、色弱者の区別しやすい
高彩度色の配色を用いるべき

参考サイト https://cudo.jp/?page_id=1565

Excelのデフォルト設定のグラフ作成は要注意

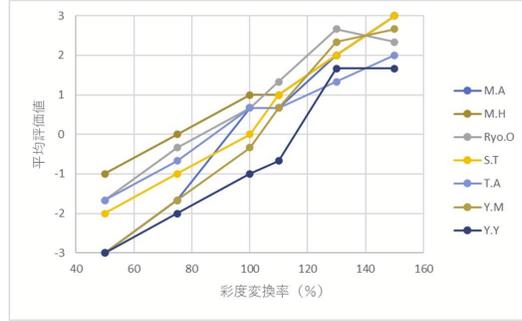
デフォルト設定で
描画したグラフ



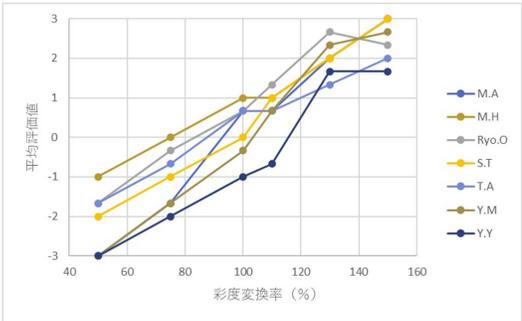
- 色遣いが中彩度
- シンボルが全て円形で小さい
- 軸の文字が小さく且つ文字色が灰色

色弱者の見え方のシミュレーション

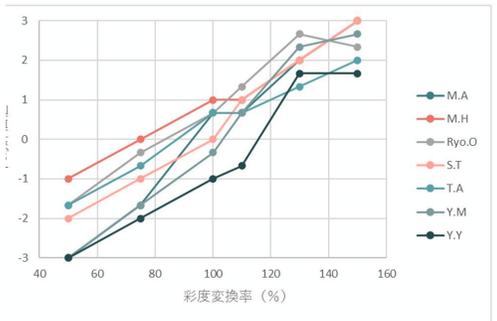
1型2色覚



2型2色覚



3型2色覚



Excelのデフォルト設定でのグラフは、色弱者には色の区別がしにくく、高齢者には文字が見にくい

色分布図も要注意

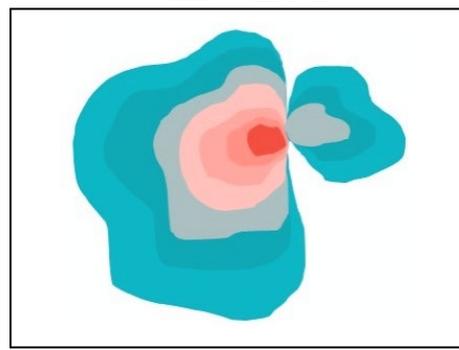
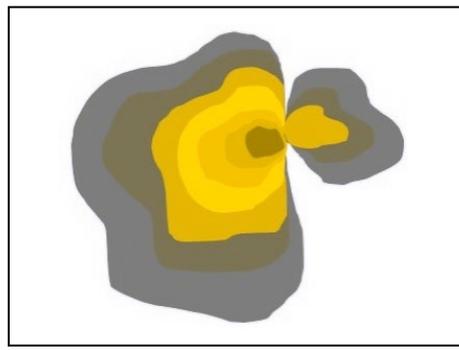
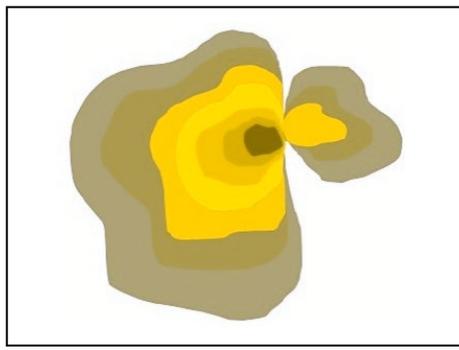
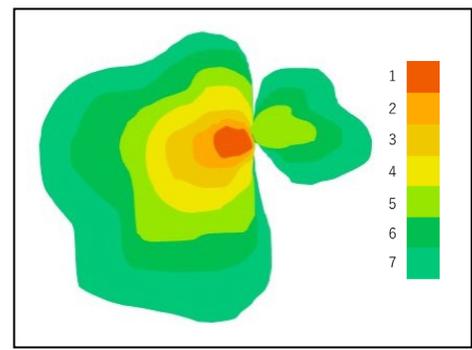
原画像

色弱者の見え方のシミュレーション

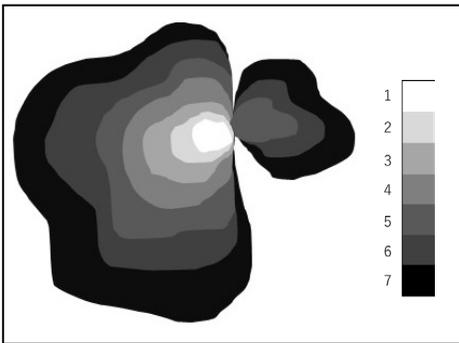
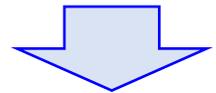
1型2色覚

2型2色覚

3型2色覚



赤から緑での分布図は色弱者にはレベル間の区別がわかりにくい場合が多い



色弱者は明暗弁別能が高い人が多いので、赤から緑への多色使いよりは明暗変化図の方が推奨される

より詳細は以下を参照。

<https://www.nig.ac.jp/color/bio/#keikou>

最新更新は2005年だが、医学生物学者向けの詳細な説明として秀逸

研究発表でのカラーユニバーサルデザイン

カラーユニバーサルデザイン（CUD）とは

人間の色覚の多様性に対応し、より多くの人に利用しやすい配色を行った製品や施設・建築物、サービス、情報を提供するという考え方

多数の都道府県や市区でパンフレットが発行されている
例えば神奈川県

<https://www.pref.kanagawa.jp/documents/28550/signpdf.pdf>

本日の結論

全ての人と同じように外界を視ている訳ではない。色覚の多様性を知り、カラーユニバーサルデザインの重要性を理解して欲しい。

研究者にできる第1歩は、研究発表資料でのカラーユニバーサルデザイン。

高彩度色での表示、程よい大きさのシンボルサイズ、分類別に違うシンボル、黒枠線、ハッチングなどの工夫により、できるだけ多くの人に見やすい資料作成を心がけて欲しい。

すべての人に快適な色彩環境を目指して

ご清聴ありがとうございました

宇都宮大学名誉教授
同大OPTセンター名誉フェロー
阿山みよし