

定量的景観分析のための光学的眼球モデル

明嵐政司

非会員 工博 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6, E-mail:mei@pwri.go.jp)

著者は、定量的景観分析のための最初の取り組みとして、光学的な眼球モデルを作成した。このモデルは、人間の眼球を模倣することが出来るように、眼球を構成する部位別に異なる屈折率を与えている。眼球の部位の大きさは、医学的な見地からの既存文献を参考にして決定している。さらに、光の波長に依存する部位別の屈折率は、既存文献で与えられている数値データから得られた回帰式に基づいて計算している。このモデルの性能を照査するために、著者は相対の色視差を計算して、可視光の範囲内で相対の色視差の最大の差が7%であるとの結論を得た。

キーワード: 景観, 定量分析, 眼球, 光学的モデル, 相対の色視差

1. はじめに

これまでに提案されている景観の定量的分析手法は、大別すると2通りになる。一つは、心理学的手法から発展したアンケート調査に基づくSD法を代表とする統計分析手法¹⁻³⁾であり、もう一方は、数学的分析手法であるフラクタル次元⁴⁾や1/f揺らぎ⁵⁾などの手法である。前者は、帰納的手法、後者は演繹的手法である。しかし、両者にはいくつかの共通点を見いだすことが出来る。第一に、それらの分析手法による既存の研究論文では、景観を映し出した写真やスライドなどの二次元データを分析対象としている点である。景観とは、人間が視覚を通じて知覚することが出来る三次元空間であるので、このような二次元データに基づいたアンケート調査や数学的手法による画像解析手法では、景観から人間が受ける印象に対する正確な情報を再現しているとは言い難い。第二に、分析結果を景観の改善に反映させることが困難である意味では、これらの分析方法はともに不可逆的分析手法である。したがって、景観を評論する意味においては有効であっても、よりよい景観を創造するための工学的手法とは成り得ない。

著者は、この研究の中で、人間の空間認識を出来る限り忠実に再現することが出来る光学的眼球モデルを構築した。このモデルは、人間の眼球を模倣することが出来るように、眼球を構成する部位別に異なる屈折率を与えている。眼球の部位の大きさは、医学的な見地からの既存文献を参考にして決定している。さらに、部位別の屈折率は、光の波長に依存しているため、既存文献で与えられている数値データから得られた回帰式に基づいて計算している。このモデルの性能を照査するために、著者

は相対の色視差を計算した。

2. 光学的眼球モデル

(1) 眼球の大きさと光学的特性

図-1に示される人間の眼球の大きさと光学的特性に関する研究の多く⁶⁻⁸⁾は、百年以上前に欧州諸国で実施された。

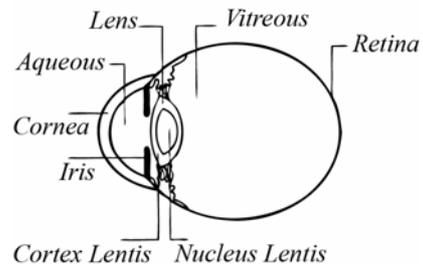


図-1 人間の眼球

それらは、外科的手術を伴う計測結果に基づいている。人道的な見地から、現在はこのような手法を用いることが出来ない。光を用いた非破壊計測手法で眼球を測定することは可能であるが、このような手法による計測結果は、物理的大きさと屈折率の積として結果を得る。したがって、屈折率を決定しなければ、物理的大きさを得ることが出来ない。また、超音波やエックス線による計測では、外科的手術を伴う手法ほどの高い精度を持ったデータを得ることが出来ない。そこで、本研究では、最も代表的な研究成果であるGullstrandによるもの⁷⁾を採用した。図-2は、この研究で示された眼球の大きさと屈折率

をあらわしている．ここで示された屈折率は，波長 587.56nm（ヘリウムスペクトルのd-線，黄色）の光に対するものであり，異なる波長の光に対しては，屈折率を再計算する必要がある．

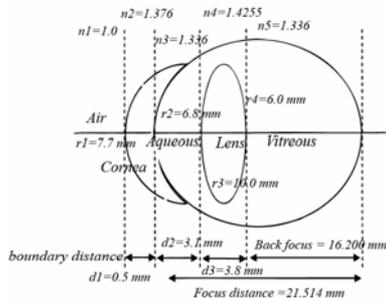


図-2 眼球の大きさと屈折率

(2)近軸光線追跡法による焦点距離の計算

屈折現象をあらわす式(1)は，「スネルの式」と呼ばれている．

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (1)$$

n : 前面媒質の屈折率

n' : 背後媒質の屈折率

i : 入射角

i' : 屈折角

光線は，二つの屈折率の異なる媒質間の境界面で屈折を生じる．近軸光線追跡法⁹⁾によれば，「スネルの式」の代わりに式(2)（「ケプラーの式」）を利用出来る．

$$ni = n'i' \quad (2)$$

図-3は，物体'O'から反射した光が球面に入射する状況を示している．'O'は点と見なし，'O''は，その像である．'C'は，境界を形成する球面の中心である．式(3)と式(4)は，幾何学的な分析から得ることが出来る．これらの式の中で，角度の符号は時計回りを正とする．

$$i = -(\theta - u) \quad (3)$$

$$i' = -(\theta - u') \quad (4)$$

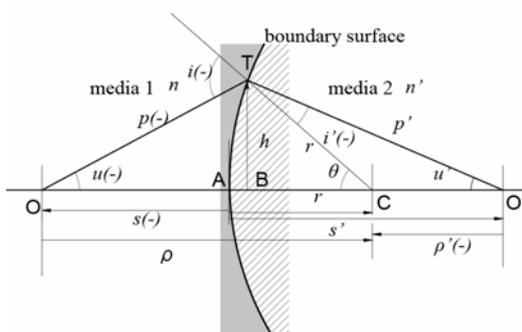


図-3 「ガウスの式」の概念図

式(3)と式(4)を式(2)に代入すると，式(5)が得られる．

$$nu' - nu = (n' - n)\theta \quad (5)$$

近軸近似によって，式(5)の中に示された変数を，次のように置き換える．

$$u = h/s \quad (6)$$

$$\theta = h/r \quad (7)$$

$$u' = h/s' \quad (8)$$

式(5)に式(6)-(8)を代入すると，「ガウスの式」と呼ばれる式(9)を得る．

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{(n - n')}{r} \equiv D \quad (9)$$

D : 屈折力

「ガウスの式」には，境界面から対象物までの距離' s '，境界面から像までの距離' s' 'と境界面の曲率半径' r 'が変数として用いられている．像の位置を決定するために，逆数を計算するのは不便である．そこで，図4に示すように，光線と光軸の間の角度' u 'と近軸光線の高さ' h 'を用いて，式(9)を式(10)に置き換える．

$$n'u' - nu = (n' - n)\theta = \frac{(n' - n)h}{r} = Dh \quad (10)$$

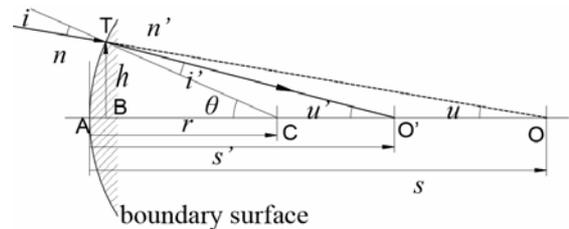


図4 屈折面のガウス式

式(11)は，図-5に示すような複数の屈折現象に関する屈折式であり，式(10)から導かれる．

$$n_{j+1}u_{j+1} = n_ju_j + \frac{(n_{j+1} - n_j)h_j}{r_j} = n_ju_j + D_jh_j \quad (11)$$

境界面間の距離を' d_j '，屈折光線の角度を' u_{j+1} 'とすると，光線と境界面の交点と光軸の距離' h_{j+1} 'は，「移行式」と呼ばれる式(12)によって計算される．

$$h_{j+1} = h_j - d_ju_{j+1} \quad (12)$$

換算傾角' u_j 'を用いて，屈折に係わる式(11)を式(13)に変換する．

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \frac{(n_{j+1} - n_j)h_j}{r_j} = \alpha_j + D_j h_j \quad (13)$$

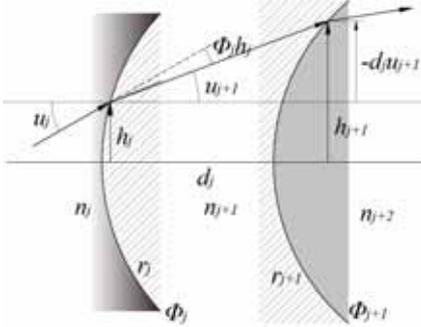


図5 複数の境界面における屈折式と移行式

図-6に示される境界間隔 d_j を用いると、移行式である式(12)は式(14)のように変形される。

$$h_{j+1} = h_j - \frac{d_j}{n_{j+1}} \alpha_{j+1} \quad (14)$$

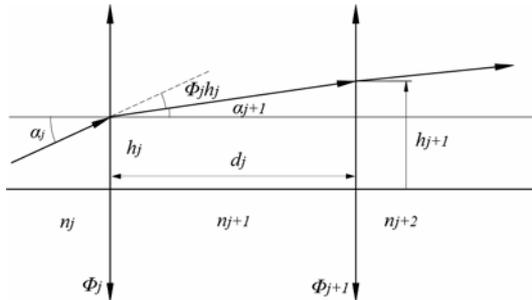


図6 換算傾角を用いた屈折式と移行式

k 個の境界からなる光学系全体の像の位置と焦点距離は、次に示すような手順で計算することが出来る。はじめに、初期条件である h_1 と h_i を定める。対象物は近軸近似によれば、無限長の位置に存在すると見なすことが出来るので、 $f_i=0$ とおく。計算を簡単にするために、ここでは $h_i=1$ とする。これらの初期条件と式(13)および式(14)からなる近軸光線追跡法によって、光の通過経路を計算する。

図-7に示すように、境界像 s'_k と像の距離 s'_k ・光学系全体の焦点距離 f'_k を、式(15)と式(16)からそれぞれ計算する。

$$s'_k = b_f = \frac{h_k}{u_{k+1}} = \frac{h_k}{\alpha_{k+1}} n_{k+1} \quad (15)$$

$$f'_k = \frac{h_1}{u_{k+1}} = \frac{1}{\alpha_{k+1}} n_{k+1} \quad (16)$$

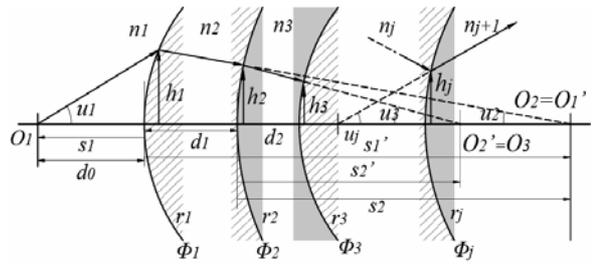


図-7 複数の境界面における屈折のための近軸光線追跡法

(3)波長と屈折率

Navarro¹⁰⁾は、光の波長と角膜・房水・水晶体・硝子体の屈折率として表-1に示すような値を発表した。これらのデータに基づく回帰分析の結果、著者は、式(17)を得た。角膜・房水・水晶体・硝子体の屈折率を計算するのに必要な定数を表-2に示す。

$$n = a \left(\frac{\lambda}{1000} \right)^b \quad (17)$$

n : 屈折率

: 波長(nm)

a, b : 定数

表-1 眼球の屈折率データ

Part/wavelength (nm)	365	486.1	656.3	1014
Cornea	1.3975	1.3807	1.374405	1.3668
Aqueous	1.3593	1.3422	1.3354	1.3278
Lens	1.4492	1.42625	1.4175	1.4097
Vitreous	1.3565	1.3407	1.3341	1.3273

表-2 屈折率算出のための変数設定

Part	a	b	square of regression coefficient
Cornea	1.3647	-0.0206	0.9065
Aqueous	1.3256	-0.0218	0.9076
Lens	1.4062	-0.0256	0.8762
Vitreous	1.3252	-0.0203	0.9064

(4)相対的色視差

図-8は近軸光線追跡法によって相対的色視差を計算する手順を示している。網膜の位置を示す中心線 $m-m'$ の左半分は、対象物が反射した任意の波長の光が眼球の網膜状で像を結ぶ現実の状況を示している。一方、右半分は、対象物が反射する光の波長をISO 7944¹¹⁾で規定されている基準波長546.07nm(水銀e-線、緑)とした時の架空の状況を示している。 h は、対象物の大きさを示している。 f と f' は、現実と架空の空間における焦点距離を示している。人間の眼球は、距離 r に位置する対象物からの反射光を受けて、網膜上に像を結ぶ。このとき、

人間の眼球の大きさは、距離 r に比べて非常に小さいので無視することが出来る。このような状況においては、像の大きさ h_i は fh/r となる。現実と架空の状況における対象物と像の大きさは同じであるが、眼球の屈折率が波長に依存するので、焦点距離や眼球から対象物までの距離は異なる。

もし、現実の対象物の大きさ h と同じ大きさの対象物から放たれた基準長の光によって、現実の像の大きさ h_i と同じ大きさの像が、網膜上に形成される架空の状況では、眼球から対象物までの距離 r_0 は、 $(f_0/f)r$ となる。したがって、基準波長を想定した架空の状況を基準とした対象物までの距離の比である相対的色視差 κ は式(18)により計算することが出来る。

$$\kappa = \frac{r_0}{r} = \frac{f_0}{f} \quad (18)$$

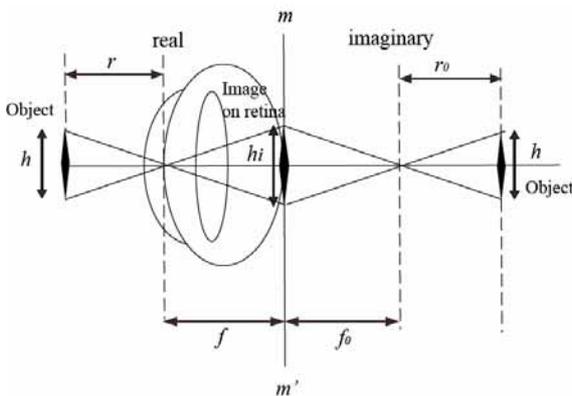


図-8 眼球によって識別される対象物までの距離

図-9は、光の波長と焦点距離および相対的色視差の関係を示している。可視光線の光の波長のうち、カドミウムのF-線（波長479.99 nm、青）とカドミウムのC-線（643.85 nm、赤）の相対的色視差の差は3%である。可視光線の波長範囲を360-830nm とすると、その上下限の波長の光の相対的色視差の差は約7%となる。

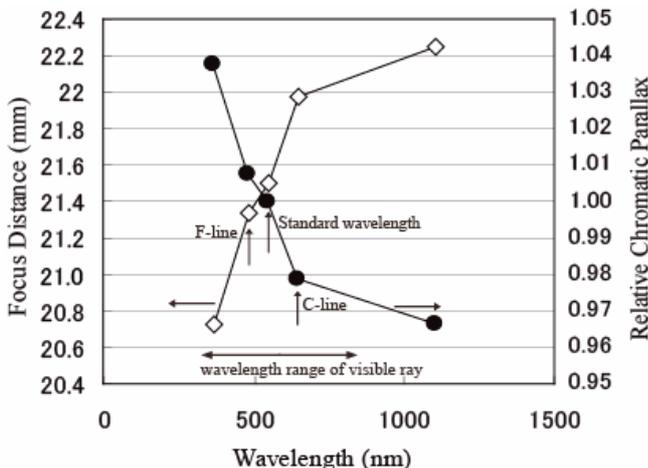


図-9 焦点距離と相対的色視差

3. 結論

著者は、可能な限り正確に人間の眼球を模倣した新しい光学的眼球モデルを構築した。このモデルの性能を確認するために、相対的色視差を計算して、可視光線の波長範囲では、最大約7%の相対的色視差の差が生じることを示した。

このモデルでは、水晶体の前後面の曲率半径を一定として計算される焦点距離から、相対的色視差を計算している。実際の眼球では、水晶体の曲率半径の調整によって、焦点距離を調整している。今後は、このような調整機能を反映したモデルの改良を行う。また、これとは別に、両眼の網膜に結ぶ像のズレから対象物までの距離を測定している視覚特性を反映させた画像データの分析システムを構築する。

さらに、単眼の眼球モデルと両眼の空間認知機能を再現出来る画像データシステムを統合したモデルとこれまでの先人の研究成果から導かれる演繹的仮説を組み合わせ、新たな定量的景観評価手法を完成させる必要がある。

参考文献

- 1) Osgood, C.E. Semantic differential technique in the comparative study of cultures, Amer. Anthropologist, Vol.66, pp171-200
- 2) Osgood, C.E. Studies on the generality of affective meaning systems, Amer. Psycho., Vol.17, pp10-28, 1964
- 3) Thayer R L, Freeman C.M. Altamont. Public perceptions of a wind energy landscape, Landscape Urban Planning Vol. 14 No. 5, pp379-398, 1987
- 4) Pentland A P. Fractal-based description of natural scenes, IEEE Trans Pattern Anal Mach Intel, Vol.6 No.6, pp661-674, 1984
- 5) Yan L, Sato S. Quantitative method for evaluation and analysis of canals, Computer-Aided Civil Infrastructure Engineering, Vol.17 No. 3, pp203-210, 2002
- 6) H. von Helmholtz. Handbuch der Physiologische Optik, 3rd ed., Voss Hamburg, 1909
- 7) A. Gullstrand, appendix in H. von Helmholtz. Handbuch der Physiologische Optik, 3rd ed., Voss Hamburg, 1909, Bd. 1, p299
- 8) Tsruta K. Reduced eye model of Listing., Oplis E, pp.1378-1386, 2003
- 9) Takahashi T. Lens Design. Tokai University Press., 2005
- 10) Navarro R., Santamaria J., Bescos J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics, Journal of the optical Society of America, Vol.2 No.8., pp.1273-1281, 1985
- 11) ISO 7944 "Optics and optical instruments - Reference wave lengths", 1998

謝辞：本論文の図表の作成に当たって、片山理恵さん（材料地盤研究グループ秘書）と石原寛隆さん（土木研究所交流研究員，出向元：若築建設株式会社技術研究所）の多大なご協力を頂いたので、厚く謝意を表する。