

## 眼球組織の吸光特性

阿部 友厚<sup>1)</sup>, 米谷 新<sup>1)</sup>, 飯田 知弘<sup>1)</sup>, 森 圭介<sup>1)</sup>  
林 直樹<sup>1)</sup>, 磯野 博明<sup>1)</sup>, 渋沢 崇男<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>群馬大学医学部眼科学教室, <sup>2)</sup>群馬大学工学部生物化学工学科

## 要 約

有色家兎5匹10眼およびニホンザル3頭6眼を用い、眼球各組織の300~900 nmまでの吸光特性を測定した。キサントフィルとニホンザル血液についても同様の測定を行った。角膜と水晶体と硝子体については、紫外から近紫外にかけて特徴的な吸収スペクトルが得られた。感覚網膜については、紫外領域で高い吸光度を示す以外、ほぼ平坦な吸収スペクトルが得られた。網膜色素上皮および脈絡膜については、全波長で吸光度は高いが、波長が長くなるにつれて徐々に吸光度が減少した。キサントフィルについては2万倍~20万倍、血液については100~500倍に稀釈してはじめて、500 nm, 600 nm前後に吸光度が高くなる特徴的な吸収スペクトルが得られた。従来主張されている組織固有の波長特性を得るには、ある一定の厚さや濃度にあることが必要である。(日眼会誌 96:1387-1393, 1992)

キーワード: 眼球組織, 吸光特性, キサントフィル, 血液

## Spectral Absorption Characteristics of Ocular Tissues

Tomoatsu Abe<sup>1)</sup>, Shin Yoneya<sup>1)</sup>, Tomohiro Iida<sup>1)</sup>  
Keisuke Mori<sup>1)</sup>, Naoki Hayashi<sup>1)</sup>, Hiroaki Isono<sup>1)</sup>  
and Takao Shibusawa<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Ophthalmology, Gunma University School of Medicine

<sup>2)</sup>Department of Biological and Chemical Engineering, Gunma University Faculty of Engineering

## Abstract

We studied the ocular spectral characteristics of monkey and rabbit eyes in the range of 300 to 900 nm. Measurements were performed on dissected specimens of the cornea, lens, vitreous, sensory retina and retinal pigment epithelium (RPE) plus choroid. Xanthophyll and monkey blood were also studied. Components of the ocular media showed high absorption over the ultraviolet range. The absorption curve of the sensory retina was similar to that of the ocular media. RPE plus choroid showed high absorption over the whole spectral range, with gradual decrease in absorption above 600 nm. The specific absorption curve of both xanthophyll and blood became manifest only when diluted to more than 1:20,000 in the former and to more than 1:100 in the latter. The spectral absorption of the ocular tissue thus became specific only when the thickness or density of the tissue was within a certain range. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 96:1387-1393, 1992)

**Key words:** Ocular tissue, Spectral absorption characteristics, Xanthophyll, Blood

別刷請求先: 371 前橋市昭和町3-39-15 群馬大学医学部眼科学教室 阿部 友厚  
(平成4年2月26日受付, 平成4年4月30日改訂受理)

Reprint requests to: Tomoatsu Abe, M.D. Department of Ophthalmology, Gunma University School of Medicine, 3-39-15 Showa-machi, Maebashi 371, Japan

(Received February 26, 1992 and accepted in revised form April 30, 1992)

## I 緒 言

紫外光から赤外光に至るまで、光が、角膜、前房、水晶体、硝子体など、透光体を通過する時に、波長によって選択的な吸収が起こる。網膜のレーザー光凝固治療、とくにダイレーザー光凝固では、この眼内各組織の波長による吸光特性を配慮することが必要である。網膜血管や、網膜各層を、この各組織の異なる光に対する吸光特性を利用して、効率良く光凝固をすることが可能であるとされている。この理論的背景となっているのが1938年のLudvighら<sup>1)</sup>の報告をはじめとして、1960年代のBoettnerら<sup>2)</sup>やGeeraetsら<sup>3)~5)</sup>による眼内各組織の吸光特性に関する検索結果である。しかし、この眼内各組織の吸光特性のもつ、レーザー光凝固における意義についての検索は十分にはなされていない。我々は、網膜など眼球各組織の吸光特性、特に可視光領域を中心にその吸光特性を再確認し、合わせてキサントフィルや血液などの濃度の違いにおける吸光度の量的な差を測定し、実際の臨床における意義について検討した。

## II 実験材料および方法

実験動物にはニホンザル3頭6眼と、有色家兎5匹10眼を用いた。麻酔には塩酸ケタミン(ケタラル®)とキシラジン塩酸塩(セラクター®)を用い、両者を7:1に混合して筋注した後に眼球を摘出した。眼球摘出後、ただちに磷酸バッファー内(pH 7.4, 0.1 mol)で眼球を切開し、角膜、水晶体、硝子体、網膜感覚上皮、網膜色素上皮と脈絡膜、強膜の各部を分離して摘出した。網膜、水晶体、角膜、網膜色素上皮と脈絡膜、硝子体、強膜の順に、それぞれについて、300から900 nmの波長の光に対する吸光特性を測定した。網膜については、黄斑部を含む後極部と周辺部に分けて測定

を行った。

眼球組織のほかに、ニホンザルの血液と、キサントフィルの吸光特性についても同様に測定を行った。血液は大腿静脈より採取し、それぞれ全血、100, 200, 500倍に稀釈をしたものについて測定を行った。

キサントフィルにはシグマ社製のものを使用し、溶媒にコーンオイル(シグマ、比重0.92 g/ml)を用い、2万, 20万倍および200万倍稀釈溶液を作成して測定した。

測定には分光光度計 UV 3000(島津)を用いた。本装置は、光源として重水素ランプとタングステンヨウ素ランプを内蔵しており、190から900 nmまでの紫外から赤外領域の吸光度の測定が可能である。光路は横2 mm, 縦5.5 mmと通常より小さくし、試料の中央に確実に光路が設定されるようにした。また、検出器の受光面のすぐ前面に試料を置く end-on 方式により、従来問題とされてきた散乱光の影響をより少なくすることが可能になっている。この方式は受光面のすぐ前面に試料を置くことにより、従来の測定法に比べより多くの透過光を受光面で拾うことができる。このため、医学関係の不透明な試料を測定することのできる装置であり、従来に比べ正確性を増している。これにより、透過光と散乱光をあわせて測定できる精度の高い装置になっている(図1)。

## III 実験結果

角膜、水晶体、硝子体: サル角膜の吸収スペクトルは、紫外域にある400 nm以下で、吸光度が高くなり、300 nmで90%以上の高い吸光度を示した。サル水晶体では、可視光領域の450 nm以下で吸光度が高くなり、紫外域にある400 nm以下で99%以上の高い吸光度を示した。サル硝子体では900 nm以下で徐々に吸光度は高くなり、320 nm以下で急激に吸光度は高く

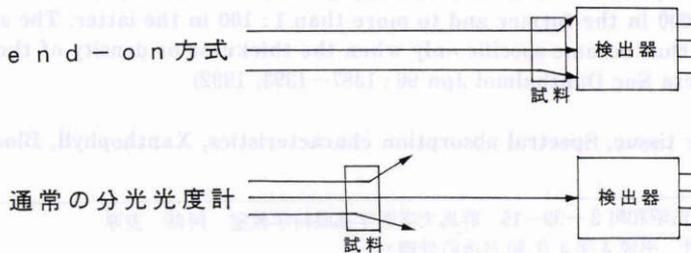


図1 分光光度計 end-on 方式(模式図)。

通常の分光光度計に比べ、受光面のすぐ前面に試料を置くことにより、多くの散乱光を受光することができる。

なった(図2)。有色家兎では、角膜と硝子体の各波長に対する吸光特性は、サルとほぼ同様であったが、家兎水晶体ではサル水晶体に比べ、紫外域にある400nm以下で吸光度が高くなり、370nm以下で99%以上の吸光度を示し、サル水晶体とはやや異なる吸光特性を示した(図3)。

網膜感覚上皮(家兎網膜)：家兎網膜では350nmで約25%の吸光度を示し、波長が長くなるに従い光の透過性は徐々に上昇し、900nmでの吸光度はおよそ

10%であった(図4)。

サル眼網膜感覚上皮(黄斑部を含む後極部網膜と周辺部網膜)：サル眼周辺部網膜では350nmで25%以上の吸光度を示し、家兎眼網膜と同様900nmまで徐々に吸光度は低くなったが、家兎眼と異なり415nmでやや高い吸光度を示した。また、全波長を通じて家兎網膜に比し、サル眼網膜は高い吸光度を示した(図4)。

サル眼の黄斑部を含む後極部網膜感覚上皮と周辺部

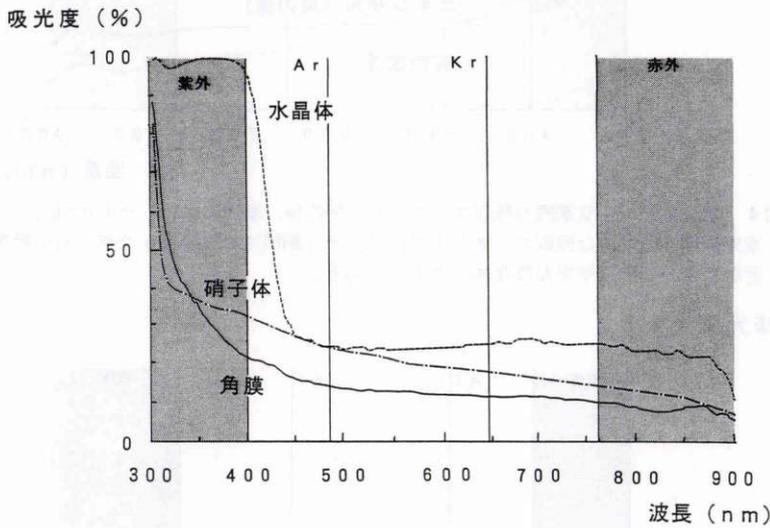


図2 サル透光体の吸収スペクトル(平均値, n=6).  
紫外から近紫外にかけて、特徴的な吸収スペクトルが存在している。Arはアルゴンレーザー(青)の波長488nm, Krはクリプトンレーザーの波長647nm

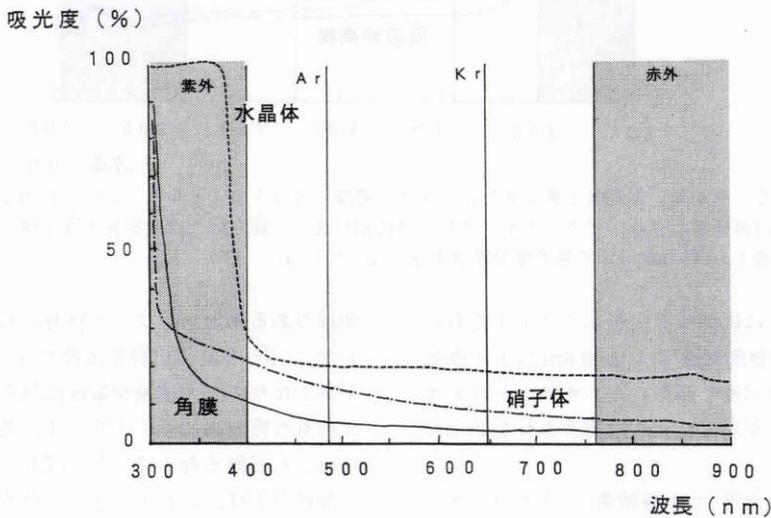


図3 家兎透光体の吸収スペクトル(平均値, n=10).  
ほぼサル透光体と同様の吸収スペクトルである。

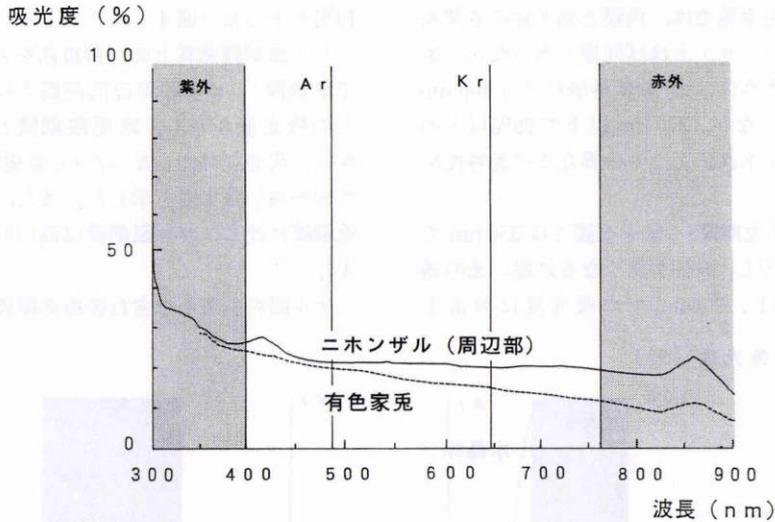


図4 家兎とサル感覚網膜の吸収スペクトル (平均値, 家兎 n=10, サル n=6). 家兎網膜では平坦な吸収スペクトルである。サル網膜では415 nm でやや高い吸光度を示すが、ほぼ平坦な吸収スペクトルである。

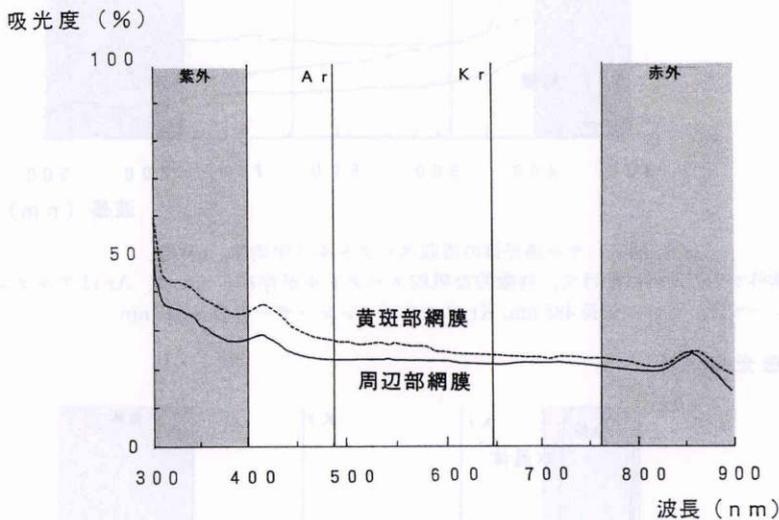


図5 サル周辺部網膜と黄斑部を含む後極部網膜の吸収スペクトル (平均値, n=6). ほぼ同様な吸収スペクトルを示すが、周辺部に比し、黄斑部では全波長で吸光度は高く、600 nm 以下で吸光度の差は大きくなっている。

網膜感覚上皮では、ほぼ同様の吸収スペクトルであった。黄斑部を含む後極部網膜では、600 nm 以下で吸光度が周辺部網膜に比べやや高かった。キサントフィルに相当する吸光特性を示すピークは観察されなかった (図5)。

キサントフィルと血液(サル静脈血)：キサントフィルを2万倍~200万倍にコーンオイルで稀釈した。2万倍稀釈溶液では、紫外から青の領域に吸光度の高い

領域のあるキサントフィル特有の吸収スペクトルを示した。一方、200万倍稀釈溶液では、吸収スペクトルは平坦となり、2万倍稀釈溶液に見られたキサントフィル特有の吸収スペクトルを示す。波長間の吸光度の差はほとんど無くなっていた (図6)。

静脈血では、これとは逆に、稀釈しない全血での測定結果では、散乱と吸収により、すべての波長で吸光度が高く、ヘモグロビン特有の吸収スペクトルは得ら

れなかった。100倍、200倍、500倍稀釈血液では、415nm、540nmおよび575nm付近で吸光度の高いヘモグロビン特有の吸収スペクトルが観察された(図7)。

網膜色素上皮と脈絡膜(有色家兎とサル):サル眼、有色家兎眼ともに波長が長くなるに従いその吸光度は減弱した。しかし、いずれの波長でも高い吸光度を示していた。サル眼と有色家兎眼の比較では、有色家兎眼では全波長で、サル眼に比べ吸光度は低く、600nm以上の長い波長で特にサル眼との吸光度の差が顕著で

あった(図8)。

### IV 考 按

角膜と硝子体では紫外域で90%以上の高い吸光度のあること、そして水晶体では近紫外から紫外にかけて90%以上の高い吸光度のあることが確認できた。これは従来の報告<sup>1)~5)</sup>と同様であり、近紫外から紫外にかけて特徴的な吸収スペクトルが得られた。通常の光量であれば、近紫外から紫外にかけての光は、角膜か

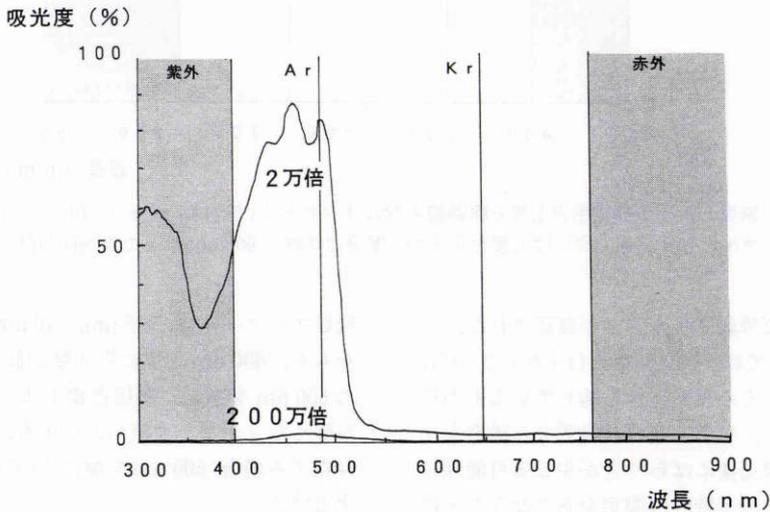


図6 キサントフィルの吸収スペクトル。  
2万倍~20万倍に稀釈することにより、はじめて特徴的な吸収スペクトルが得られる。

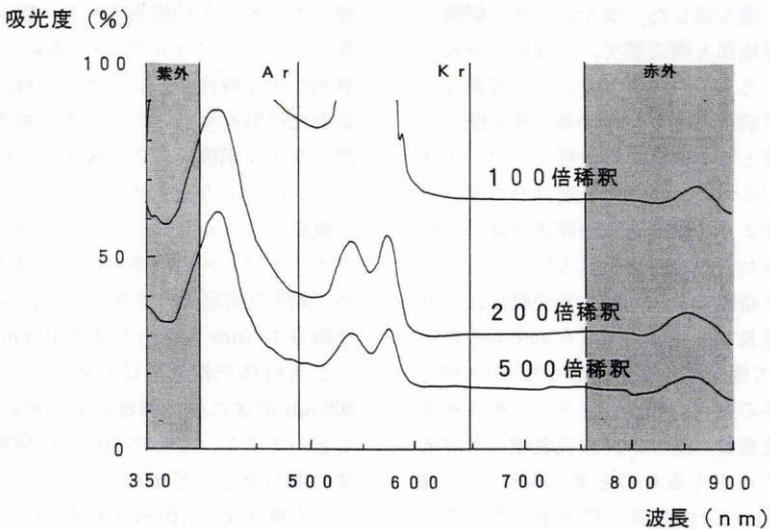


図7 サル静脈血の吸収スペクトル(平均値, n=6)。  
100~500倍に稀釈してはじめて特徴的な吸収スペクトルが得られる。

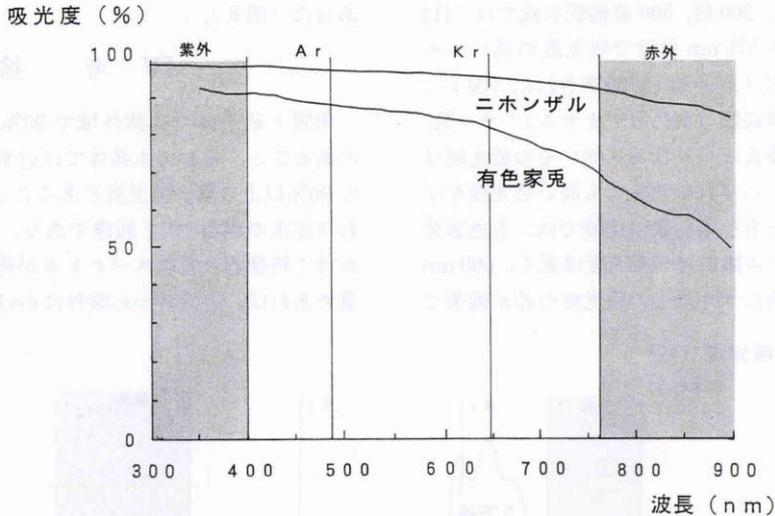


図8 家兎とサル網膜色素上皮と脈絡膜の吸収スペクトル(平均値, 家兎n=10, サルn=6). 家兎, サルとも全波長で高い吸光度を示すが, 家兎では特に600 nm以上で透過性が良くなる。

ら硝子体でほとんど吸収されることが確認された。

一方, 網膜については, その測定のみずかしさから, 感覚網膜単独での, その吸光特性を論じているものは過去にない。しかし, 吸光特性は組織固有の構造を反映してくるため, 吸光度にばらつきが生じる可能性はあるが, 摘出眼球で吸光特性の測定をおこなうことに問題はないと思われる。我々の実験では, 家兎およびサル網膜では, それぞれ特徴的な波長特性はなかった。しかし, 吸光度は, 家兎網膜に比し, サル網膜で, いずれの波長でも高い値を示した。また同じサル網膜でも, 黄斑部を含む後極部と周辺部で, ほぼ同じ吸収スペクトルを示しているものの, 600 nm以下の波長では黄斑部を含む後極部網膜のほうがやや高い吸光度を示していた。家兎網膜とサル網膜の吸光度の差は, 不透明な生体試料の測定においては, 吸光度はその厚さに比例するという事実より, 網膜自体の厚さの違いが吸光度の差として表れたものと考えられる<sup>6)</sup>。

網膜色素上皮と脈絡膜でも, 同様に家兎眼に比しサル眼ではいずれの波長でも高い吸光度を示すものの, 600 nm以上の波長で吸光度の差が大きくなっていた。これは脈絡膜の厚さの違いに加え, メラニンやヘモグロビンなどの含有色素量の違いが, 全波長域における吸光度の差となって出てくるものと考えられる<sup>7)</sup>。家兎眼でとくに600 nm以上の波長で吸光度が低くなるが, これは, 脈絡膜に存在する血液の吸光特性が関与しているものと考えられる<sup>6)</sup>。ヘモグロビンの

吸収スペクトルは, 415 nm, 540 nm, 575 nmにピークをもち, 600 nmを境に吸光度が低くなる<sup>6)</sup>。このように600 nmを境に, 網膜色素上皮と脈絡膜では吸光度が低くなり, また血液においても, その濃度が適度に存在する場合, 600 nmを境にその吸光度が大きく変化する<sup>6)8)</sup>。

Geeraetsら<sup>9)</sup>の実験より, ヒトの脈絡膜の吸光特性は家兎のそれに近いことより, 実際の光凝固治療では, 600 nm前後を境にして, その波長選択が凝固効果に影響してくることが推測される。臨床的にヒト網膜黄斑部のキサントフィル<sup>9)10)</sup>や, 血液のヘモグロビンの特異的な吸光特性が, レーザー光凝固の臨床において, 重要な役割を果たしているとの報告がある<sup>11)</sup>。しかし, 我々のサル網膜黄斑部を検索した結果では, 従来指摘されているようなキサントフィルに相当する吸光特性は観察できなかった。そこで, 我々は*in vitro*によるキサントフィルの検索を行い, 厚さと濃度の相関を求め, 実際の測定値の意味づけを試みた。測定結果では, 光路長10 mmすなわち厚さ10 mm, キサントフィルの2万倍稀釈溶液ではじめて, 一般に知られている500 nm前後に吸光特性をもつ吸収スペクトルを得ることができた。さらに200万倍稀釈では波長間の吸光度の差がほとんどなくなった。

この事実より, Beer-Lambertの式をもちいて, キサントフィルのおおよその濃度を計算した。黄斑部を含む網膜感覚上皮と周辺部網膜感覚上皮の間で, キサン

トフィルの吸光度の高い460 nmの波長で8%の吸光度の差が存在した。この差を単純にキサントフィルの存在によるものとすれば、Henleの層を50  $\mu\text{m}$ とし、測定野(2.0 $\times$ 5.5 mm)の約2分の1に同じ濃度のキサントフィルが含まれていると仮定すると、約500分の1の稀積濃度のキサントフィルが存在していることになる。さらに、黄斑部と周辺部感覚網膜の厚さの違いを考慮すれば、キサントフィルの存在は最大約500分の1稀積濃度ということになる。したがって、500分の1稀積濃度で、50  $\mu\text{m}$ の厚さのキサントフィルでは、実際の吸光度測定においてはそれほど大きな差となって測定されないということになる。

一般に良く知られているキサントフィル等の吸光特性は特質固有のものだが、実際の吸光度測定において、そのままあてはまるものではなく、濃度と、その物質の厚さによってその吸光度が決まる。サル網膜の実験結果からすると、サル黄斑部にはキサントフィルは存在しているものの、特有の吸光特性を示すほどの濃度または厚さでキサントフィルが存在しているかは疑問である。

また、血液を用いた測定結果では、全血で、しかも10 mmの厚さのセルを用いた測定結果では、いずれの波長でも、吸収と散乱のために透過性が悪く、血液特有の吸光曲線は100~200倍稀積で明瞭になった。血液についても同様にBeer-Lambertの式を参考にすると、実測値の厚さ、濃度より、一般によく知られた吸収スペクトルを得るには、全血で、50~100  $\mu\text{m}$ 前後の厚さであることが必要になる。

これらの事実より、その組織が、その特有の吸光特性を示すには、一定の濃度と厚さにあることが必要であると結論される。ダイレーザー装置の出現により、波長による網膜各層の選択的な光凝固が可能になったかの印象をうけ、各種眼底疾患に適した波長選択が必要とされているが<sup>12)~15)</sup>、実際の臨床に関係してくるのは、波長の持つ固有の組織透過性であり、血液やキサントフィルなどの色素の存在が、光凝固の臨床に関係するとすれば、適当な濃度や厚さ<sup>16)~18)</sup>で存在する場合のみであると結論される。

擱筆にあたり、御校閲を賜りました教室主任清水弘一教授に深謝いたします。本論文の要旨は、第94回日本眼科学会総会にて発表した。

#### 文 献

- 1) Ludvigh E, McCarthy EF: Absorption of

- visible light by the refractive media of the human eye. Arch Ophthalmol 20: 37-51, 1938.
- 2) Boettner EA, Wolter JR: Transmission of the ocular media. Invest Ophthalmol 1: 776-783, 1962.
- 3) Geeraets WJ, Williams RC, Chan G, et al: The loss of light energy in retina and choroid. Arch Ophthalmol 64: 606-615, 1960.
- 4) Geeraets WJ, Williams RC, Chan G, et al: The relative absorption of thermal energy in retina and choroid. Invest Ophthalmol 1: 340-347, 1962.
- 5) Geeraets WJ, Williams RC, Chan G, et al: Ocular spectral characteristics as related to hazards from lasers and other light sources. Am J Ophthalmol 66: 15-20, 1968.
- 6) 菊地 明, 桜井靖久: レーザー光に対する生体反応, 渥美和彦 監修: レーザーの臨床, メディカル・プランニング, 56-73, 1981.
- 7) Gabel VP, Birngruber R, Hillenkamp F: Visible and near infrared light absorption in pigment epithelium and choroid, in Shimizu K (ed): XXIII Concilium Ophthalmologicum Kyoto 1978, Amsterdam, Excerpta Medica, 658-662, 1979.
- 8) van Assendelft OW: Spectrophotometry of Haemoglobin Derivatives. Springfield, Charles C Thomas, 47-72, 1970.
- 9) Ruddock KH: Evidence for macular pigmentation from colour matching data. Vision Res 3: 417-429, 1963.
- 10) Wald G: Human vision and the spectrum. Science 101: 653-657, 1945.
- 11) Landers MB III, Wolbarsht ML, Shaw HE Jr: The current status of laser damage in ophthalmology. Ann NY Acad Sci 267: 230-246, 1976.
- 12) Mainster MA: Wavelength selection in macular photocoagulation. Ophthalmology 93: 952-958, 1986.
- 13) L'Esperance FA Jr: Clinical applications of the organic dye laser. Ophthalmology 92: 1592-1600, 1985.
- 14) Brooks HL, Eagle RC, Schroeder RP, et al: Clinicopathologic study of organic dye. Ophthalmology 96: 822-834, 1989.
- 15) 野寄喜美春, 清水弘一: レーザー眼治療, 東京, 医学書院, 1-12, 1987.
- 16) 尾花 明, 三木徳彦: ダイレーザー光凝固におけるヘモグロビンとメラニンの影響, 日眼会誌 93: 844-851, 1989.
- 17) 米谷 新, 野寄 忍: 網膜光凝固の臨床, あたらしい眼科 7: 671-678, 1990.
- 18) Gabel VP, Birngruber R: 波長の異なる各種レーザーによる眼底光凝固, 眼紀 38: 1660-1669, 1987.