

## 色素レーザー（ダイレーザー）による網膜脈絡膜に対する凝固効果

第1報 組織学的所見（図12）

高橋 寛二・大熊 紘  
板垣 隆・宇山 昌延（関西医科大学眼科学教室）

## Histopathological Study of the Effects of Photocoagulation on the Retina and Choroid with Various Wavelengths of Dye Laser

Kanji Takahashi, Hiroshi Ohkuma, Takashi Itagaki  
and Masanobu Uyama

Department of Ophthalmology, Kansai Medical University, Moriguchi, Osaka, Japan

## 要 約

色素レーザー（dye laser）の3種の波長（黄色577nm、橙色590nmあるいは600nm、赤色630nm）が、正常サル眼底におよぼす凝固効果を凝固後24時間から3カ月まで臨床的、組織学的に比較検討した。弱度、中等度、強度の3つの強さの光凝固を行ない比較したところ、弱度凝固では3波長間に著明な組織学的な違いはみられなかったが、中等度凝固、強度凝固において違いが明らかであった。577nmは網膜血管およびその周囲組織に対する凝固効果が著しく強く、また630nmの凝固効果は従来の赤色クリプトンレーザーの凝固効果と類似して網膜外層と脈絡膜を強く凝固した。橙色波長は両者の中間的な凝固効果を示した。脈絡膜血管に対する凝固効果は、凝固早期には630nmが最も強かったが、脈絡膜毛細血管の閉塞効果は590nmで最も長期に持続した。

このように3波長間に著しい凝固効果の差がみられ、これは網膜脈絡膜における組織深達性と、ヘモグロビンに対する吸収率の違いから生じているものと思われた。（日眼 92：1797—1808, 1988）

キーワード：色素レーザー，眼底光凝固，波長特性，選択凝固，網膜血管

## Abstract

The differences in the effects of three wavelengths of tunable dye laser photocoagulation on the monkey retina were studied ophthalmoscopically and histopathologically. Photocoagulation was performed with a spot size of 200 $\mu$ m for 0.2seconds duration, and power settings were varied from 50mW to 150mW. There were no differences in mild coagulation among the three wavelengths, i.e. yellow (577nm), orange (590 and 600nm), red (630nm), although moderate and intense coagulation showed some differences, especially photocoagulation for the retinal vessels. Yellow light primarily damaged the retinal vessels and perivascular tissues, and obstruction of the retinal capillaries also was seen. Its effect was more marked than that of argon laser. On the other hand, the effects of red beam were localized in the outer layer of the retina and coagulated most deeply in the choroid. Its effects were similar to those of the krypton red laser. Coagulative effects of the orange beam were mostly observed in the outer layer of the retina and choroid, and it had most marked effects in the

別刷請求先：570 大阪府守口市文園町1 関西医科大学眼科学教室 高橋 寛二  
（昭和63年6月28日受付，昭和63年9月3日改訂受理）

Reprint requests to: Kanji Takahashi, M.D. Dept. of Ophthalmol., Kansai Medical Univ.  
1 Fumizono-cho, Moriguchi 570, Japan

(Received June 28, 1988 and accepted in revised form September 3, 1988)

choriocapillaris among these three wavelengths. Thus, various wavelengths of dye laser showed different effects on the retina and choroid. It was speculated that the tissue selectivity of the tunable dye laser originated from differences in hemoglobin absorption and deep penetration in the retina and choroid. (*Acta Soc Ophthalmol Jpn* 92: 1797—1808, 1988)

**Key words:** Dye laser, Photocoagulation, Wavelength characteristics, Tissue selectivity, Retinal vessels

## I 緒 言

最近実用化された色素レーザー(ダイレーザー)は、従来のアルゴンレーザー(青緑色)とクリプトンレーザー(赤色)の中間の波長577nm(黄色)から630nm(赤色)の範囲において、1nm単位で波長を変化させて光凝固に使用できること(波長可変性)を特徴とするレーザー光凝固装置である。レーザー光の波長を変化させることにより、各々の波長のもつ波長特性から、網膜脈絡膜に対して様々な凝固効果の差が現われるものと考えられる<sup>1)~5)</sup>。L'Esperanceは、この波長可変性を利用すれば、眼底疾患の際に、周囲の正常組織と与える障害をできるだけ少なく、網膜脈絡膜の様々な標的組織を選択的に凝固できると述べ、これを凝固組織の選択性と呼んでいる<sup>2)</sup>。

我々は正常サル眼底に、色素レーザーの黄色(577nm)、橙色(590nmおよび600nm)、赤色(630nm)の3種の波長を用いて実験的に光凝固を行ない、波長による凝固組織の選択性について組織学的に検討した。

## II 実験方法

実験動物として体重1.5~2kgの成熟カニクイザルおよび日本猿5頭9眼を使用した。塩酸ケタミン50mg/kgの筋注による全身麻酔を施し、ミドリンP®にて散瞳の上、後極部コンタクトレンズを用いて眼底後極部に光凝固を行なった。光凝固に使用した機種はCoherent Radiation社製アルゴン/ダイレーザーSystem 920で、光凝固には波長577nm(黄色)、590nmあるいは600nm(橙色)、630nm(赤色)の3種の波長を用いた。凝固条件は凝固野の大きき200 $\mu$ m、凝固時間0.2秒で一定とし、凝固出力を50mW(弱度)、100mW(中等度)、150あるいは200mW(強度)に変化させて、3段階の強さで光凝固を行なった。一部は後極部の網膜動脈および静脈の第1あるいは第2分枝の直接凝固を行なった。光凝固後、24時間、1週間、1カ月、3カ月に眼底検査、蛍光眼底造影を行ない、凝固斑の状態を臨牀的に観察したのち、眼球摘出を行なった。摘出眼球は4%グルタルアルデヒド燐酸緩衝液で前固

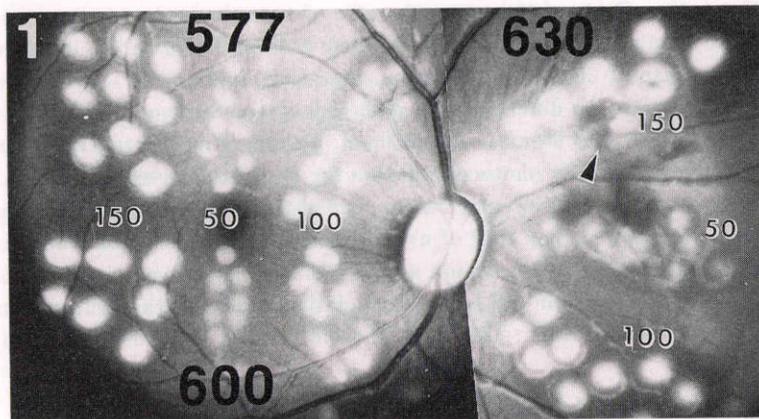


図1 光凝固24時間後の眼底写真(大きい数字は波長577, 600, 630nmおよび小さい数字は凝固出力50, 100, 150mWを表わす。以下同じ。)3波長間に凝固斑の大きさには違いはみられなかった。577nmでは凝固部の網膜血管の狭細がみられた。630nmでは脈絡膜出血より生じた硝子体出血が見られた。

定の後、0.1M 磷酸緩衝液（pH 7.4）で洗浄し、実体顕微鏡下で凝固部位を含む組織片を切り出し、1%四酸化オスmium磷酸緩衝液にて後固定を行ない、型のごとくエタノール系列で脱水後、エポキシ樹脂に包埋

した。試料はマイクロームにて1 $\mu$ mの連続切片を作成、トルイジンブルー染色を施し、凝固部中央を通る切片を光学顕微鏡で観察した。一部は超薄切片を作成し、酢酸ウラン、クエン酸鉛の二重染色を行なって透過型電子顕微鏡で観察した。

### III 結 果

#### 1. 臨床所見

##### (1) 眼底所見

光凝固時、凝固斑の大きさは凝固出力に比例した大きさになった。凝固斑の大きさには3波長間で差はみられず、視神経乳頭の直径から換算すると凝固斑の直径は、弱度凝固では約300 $\mu$ m、中等度凝固では約400 $\mu$ m、強度凝固では約550 $\mu$ mであった。凝固斑は、弱度凝固では網膜深層の灰白色の混濁としてみられ、中等度凝固、強度凝固では中央が白色（いわゆる hot spot）で、周囲に灰白色の混濁がみられた（図1）。630nmの強度凝固では脈絡膜出血が見られた（図1、矢印）。網膜血管を直接凝固すると、弱度凝固では3波長とも網膜血管への影響は見られなかったが、中等度凝固、強度凝固では、577nm、590nmで網膜血管が細くなり、577nmでより著明であった。また網膜血管の狭細は動脈よりも静脈に著明であった。これに対し630nmでは網膜血管の狭細は見られないか、ごく軽度であった。また577nmを用いて出力200mWで網膜静脈の第1分枝の直接凝固を行なった部では、血管壁が凝固により破裂し、網膜硝子体出血を生じ、24時間後にはその部より末梢の網膜静脈の拡張、蛇行と網膜出血がみられた。

光凝固1週間後には凝固斑はほぼ瘢痕化して淡い褐色を示し、中等度凝固、強度凝固では凝固斑の中央部には、褐色の色素沈着がみられた。3波長間の違いは明らかではなかったが、網膜血管の直接凝固部の血管の狭細は577nm、590nmで持続していた。

光凝固1～3カ月後には凝固斑は瘢痕化し、中央部の色素沈着が増強した。網膜血管の狭細はいずれの波長でもみられず、血管の口径は回復していた。

##### (2) 蛍光眼底造影所見（図2および図3）

凝固24時間後では動脈相早期には凝固斑中央部に脈絡膜の低蛍光部がみられ、後期には凝固斑全体からの強い蛍光漏出が見られた（図2A）。蛍光漏出の程度には3波長間で大きな差はみられなかった。網膜血管の直接凝固を行なった部では、577nmでは網膜血管の狭細が著しく、一部網膜血管が途絶するところがみられ、

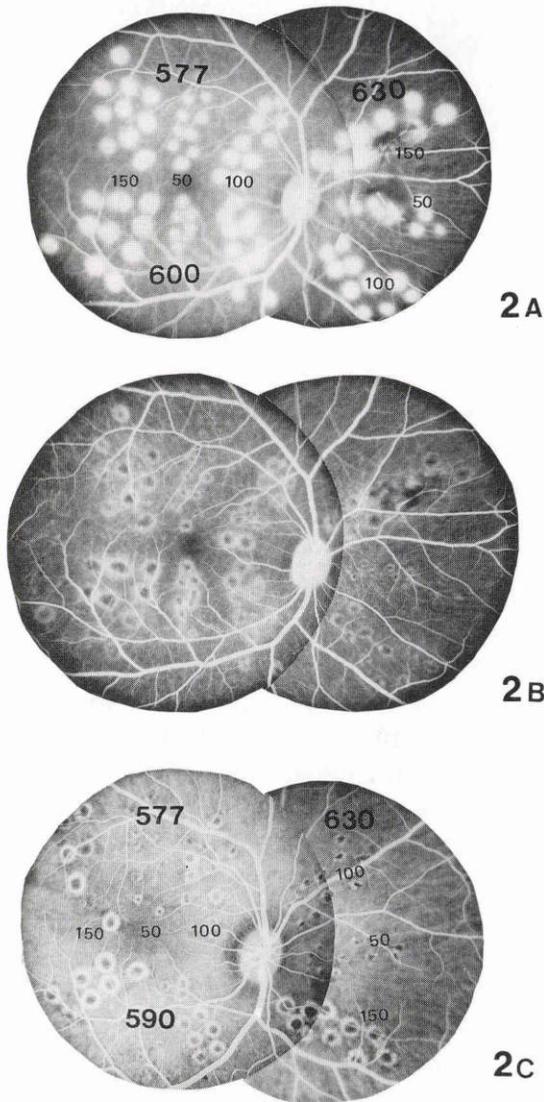


図2 光凝固後の蛍光眼底造影写真。A：光凝固後24時間：光凝固斑から著明な蛍光漏出を認めた。3波長間に蛍光漏出の差はみられなかった。B：光凝固後1週間：凝固斑の蛍光漏出は減弱し、中央部の低蛍光とその周囲に輪状の過蛍光を示した。3波長間に著明な差は認められなかった。C：光凝固後3カ月：1週間後と比べて凝固斑中央部の低蛍光の部はやや縮小していたが、その周囲の輪状の過蛍光には変化がなかった。

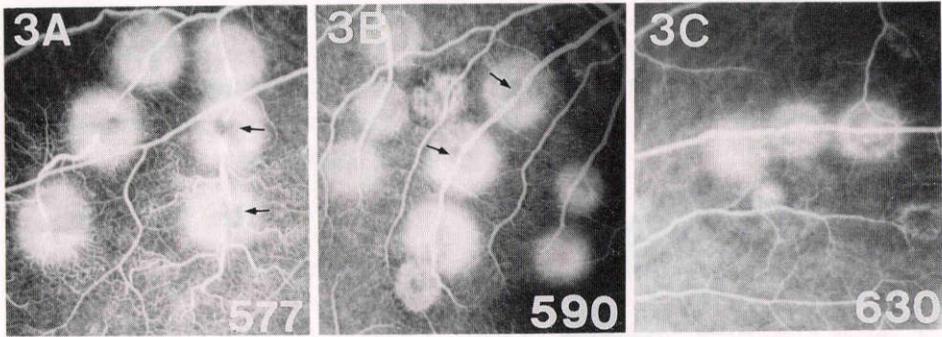


図3 網膜血管直接凝固の蛍光眼底造影写真(光凝固24時間後, 網膜静脈第2分枝).  
A: 577nm (150mW) の所見: 網膜静脈は凝固部で狭細し, また一部には途絶が見られた(矢印). 凝固斑より末梢では細血管の拡張, 蛇行が著しい. B: 590nm (150mW) の所見: 網膜静脈の凝固部での狭細が見られるが, 途絶は見られなかった(矢印). C: 630nm (150mW) の所見: 網膜静脈の狭細はみられないか, みられてもごく軽度であった.

静脈の凝固部では, それより末梢の細血管の拡張蛇行がみられた. 590nm でも中等度の狭細が見られたが, 630nm ではこの現象は見られなかった(図3).

凝固1週間では凝固斑の蛍光漏出はおさまり, 凝固斑の中央には脈絡膜蛍光の低蛍光部がみられ, 凝固斑の辺縁は輪状の過蛍光を示した(図2B). 凝固斑中央の低蛍光部の直径は3波長間で大きな差は見られなかったが, 弱度凝固では590nmで低蛍光部が最も大きい傾向が見られた. 網膜血管の直接凝固部では網膜血管からの蛍光漏出はなく, 577nm, 590nmの凝固部では血管狭細, 口径不同が続いていた.

凝固1~3カ月後には弱度凝固では, 凝固斑中央の低蛍光部はやや縮小する傾向がみられたが, 中等度以上の凝固斑では1週間後とほぼ同じ大きさの低蛍光を示していた(図2C). 凝固斑の辺縁の輪状の過蛍光は続いていたが, 境界が明瞭となり, 一部の凝固斑では色素沈着による mottled pattern を示した.

## 2. 病理組織学的所見

### (1) 光凝固24時間後の所見

組織学的には, 弱度凝固では3波長間の凝固効果に大きな差はみられなかった. すなわち網膜に対する凝固効果は, 網膜色素上皮層を中心として外顆粒層までに, 視細胞の核濃縮, 空胞化, 細胞間浮腫を主とした組織の凝固壊死が見られ, それより内層には障害は見られなかった. 脈絡膜毛細血管は, 凝固部で血栓により閉塞していたが, 脈絡膜中血管には影響は見られなかった(図4).

中等度凝固では視細胞, 網膜色素上皮層, 脈絡膜毛

細血管を中心として同様の凝固効果が見られた. 577nmでは視細胞の核濃縮の他, 外網状層, 内顆粒層の一部にも浮腫がみられ, より網膜内層にまで障害が及んでいた. 脈絡膜には600nm, 630nmにおいて脈絡膜中血管にも血栓形成による閉塞がみられ, 凝固効果は577nmよりも脈絡膜の深層に及んでいた(図5).

強度凝固では, 3波長とも網膜色素上皮の凝固壊死(核の淡染化, 細胞の空胞変性)が著明で広範囲に及び, また著しい視細胞の空胞化が認められた. 600nm, 630nmでは内顆粒層の一部まで核の濃縮, 空胞変性がみられたが, それより内層には障害はほとんど見られなかった. しかし577nmでは, 網膜の内層にまで凝固効果が及ぶ傾向があった. 脈絡膜では3波長とも毛細血管とその深部の中血管にまで血栓形成, 閉塞が見られたが, 577nmでは脈絡膜深層の障害が軽度であったのに対し, 600nm, 630nmではより深部の脈絡膜中血管層にまで血栓形成, 血管壁の凝固がみられ, 630nmでは軽い脈絡膜出血を起こすところがあった. 脈絡膜のメラノサイトの凝固効果は630nmが最も強く, 深部まで凝固壊死に陥っていた.

網膜血管の直接凝固によって, 弱度凝固では3波長間に組織学的な差は見られず, 凝固効果は網膜外層と脈絡膜毛細血管に局限しており, 網膜血管に対する直接の影響はみられなかった. 凝固効果の組織学的差異は強度凝固で著明であった(図6). すなわち577nmの出力150mW強度凝固では内境界膜にまで及ぶ網膜全層の凝固効果が見られ, 特に網膜血管壁とその周囲の神経線維層, 神経節細胞の凝固効果が強くみられた(図

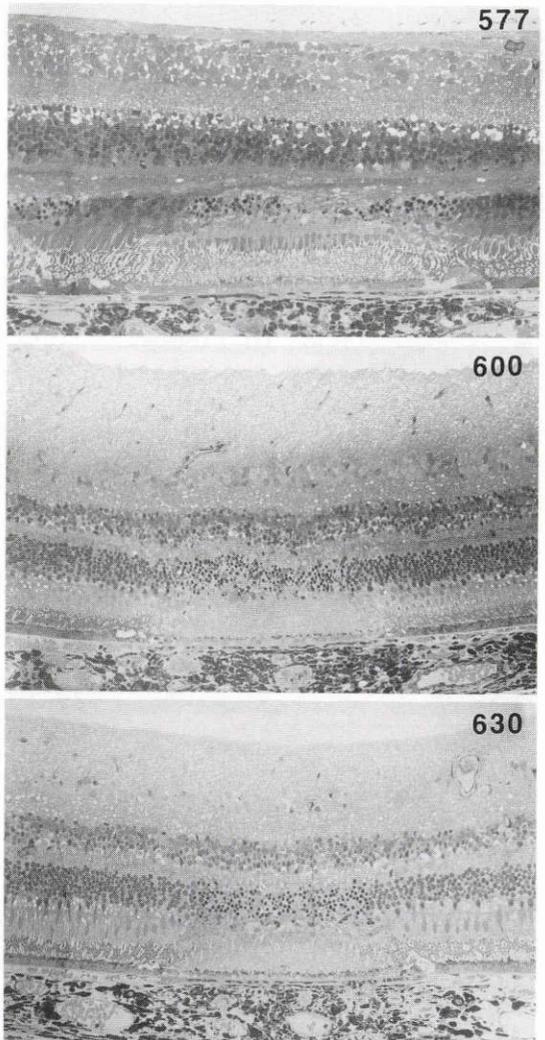
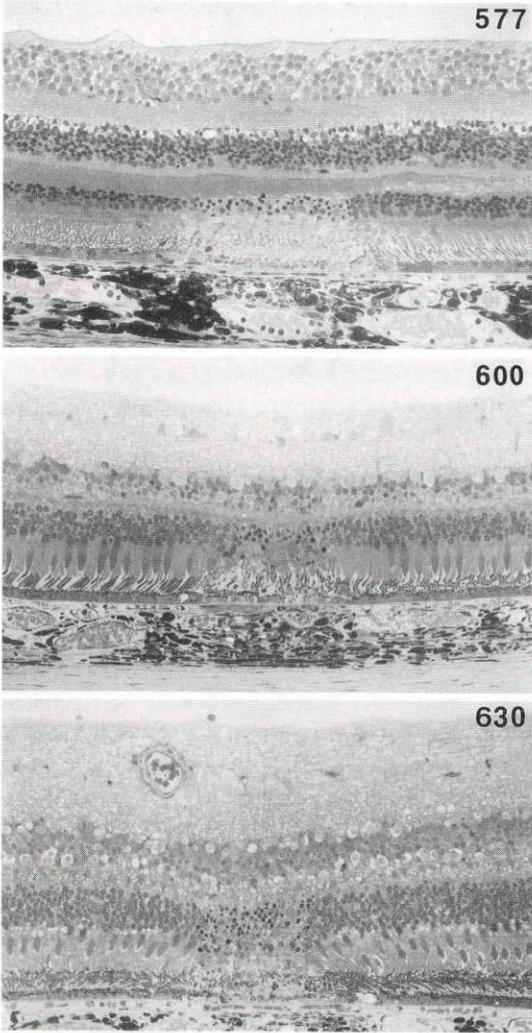


図4 弱度凝固(24時間後)の光顕所見(トルイジンブルー染色, ×150, 数字は波長を示す。以下同じ。) 3波長間に著明な差がみられず, 凝固効果は網膜外層と脈絡膜毛細血管板および脈絡膜内層に限局していた。

図5 中等度凝固(24時間後)の光顕所見(トルイジンブルー染色, ×150), 577nmでは, 内顆粒層の一部にまで空胞変性がみられ, 他の2波長よりも内層にまで凝固効果が及んでいた。600nm, 630nmでは脈絡膜中血管にまで凝固効果が及んでいた。

7A). 網膜血管の内皮細胞には核濃縮がみられ, 内腔には血小板, 白血球, 赤血球による壁在血栓がみられたが血管腔の完全閉塞は生じていなかった。凝固斑周囲の網膜毛細血管には, 基底膜を残して, 血管壁を構成する細胞(内皮細胞, 壁細胞)が凝固壊死に陥り, 内腔は赤血球で完全閉塞を起こしているのが見られた(図7B)。また577nmを用いた出力200mWでの血管直接凝固部では網膜血管壁の凝固壊死による網膜内出血, 硝子体出血と漿液性網膜剝離がみられ, 網膜全層

の凝固効果が強く, 特に網膜内層の強い障害を示す cytooid body が見られた。

これに対し630nmを用いた網膜血管の直接強度凝固部では, 網膜血管及びその周囲組織には障害は見られず, 網膜内層はよく保たれていた。すなわち凝固効果は網膜外層から脈絡膜の比較的深層の中血管層までに限局していた(図6)。両者の中間の600nmを用いた凝固部では網膜外層から脈絡膜中血管層の比較的深層までの凝固効果は, 630nmの場合と類似していたが,

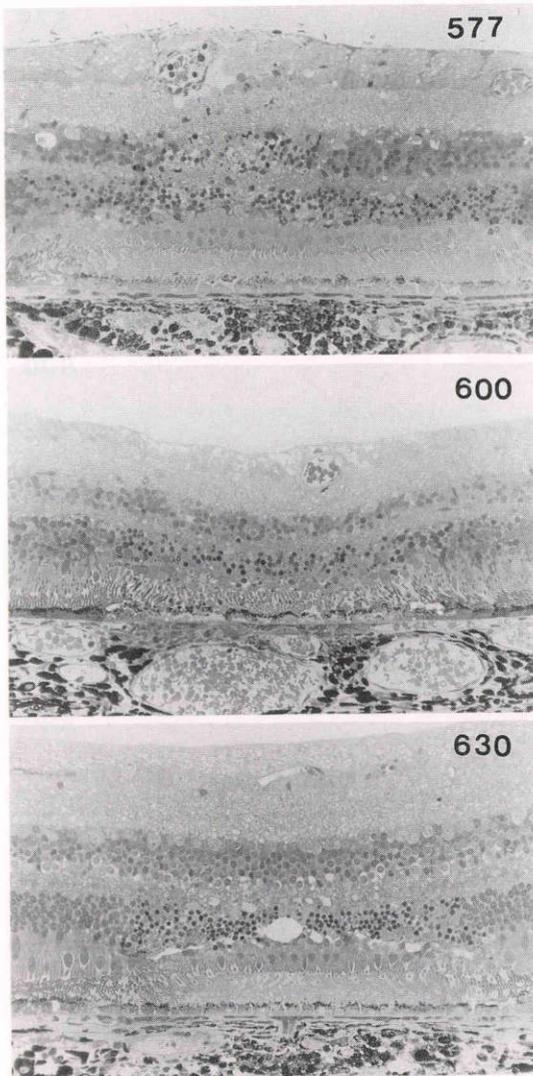


図6 強度凝固(150mW, 24時間後)の光顕所見(トルイジンブルー染色,  $\times 150$ )。577nmの所見: 網膜血管壁の凝固, 内皮細胞の核濃縮と血管周囲組織の空胞化がみられ, 網膜全層の凝固効果を示した。血栓形成は見られない。600nmの所見: 網膜血管周囲の神経線維層に障害が見られた。網膜外層から脈絡膜中血管層にまで凝固効果が及んでいる。内顆粒層の障害は少なかった。630nmの所見: 網膜血管および網膜内層には障害は見られず, 凝固効果は網膜外層から脈絡膜の中血管層までに限局していた。

網膜血管周囲の神経線維層に空胞変性がみられ, この点が630nmと異なっていた。しかし網膜全層の凝固効果とはならず, 内顆粒層の障害は少なかった。またこの波長では脈絡膜毛細血管は凝固斑中央で血栓により

完全閉塞し, 脈絡膜深層の中血管の一部にも壁在血栓の形成などの凝固効果が及んでいた(図6及び図8A)。

### (2) 光凝固1週間後の所見(図9)

弱度凝固, 中等度凝固では組織学的に差異を見なかった。凝固された視細胞の消失がみられ, 網膜下には色素顆粒を持ったマクロファージが遊走していた。網膜色素上皮は凝固部中央にも再生による修復が見られ, 扁平化した色素上皮が2~3層に重層し, Bruch膜上を覆っていた。脈絡膜毛細血管は, 577nmでは凝固斑辺縁から血行の再開通が見られたが, 他の2波長では凝固斑中央の脈絡膜毛細血管は血栓により閉塞していた。

強度凝固では, どの波長も外顆粒層より外層が消失し, 網膜下腔には色素上皮細胞が多数増殖して重層し, また色素顆粒を持ったマクロファージが多数遊走していた。600nm, 630nmでは内顆粒層より内層に障害は見られなかったが, 577nmでは内顆粒層までマクロファージが遊走しており, 内層の障害が他の2波長より強く生じていた。脈絡膜毛細血管は, いずれの波長でも凝固部で血栓により閉塞していた。また24時間後には血栓で閉塞していた脈絡膜の中血管には, 血栓はみられず開存していた。

網膜血管の直接凝固部では, 577nmにおいても網膜の太い血管には血栓や内腔の狭窄はなく, 正常に開通していたが, 周囲の網膜毛細血管にはなお内腔狭窄及び一部に閉塞がみられた(図10)。網膜血管周囲の障害をうけた神経組織には色素顆粒を持ったマクロファージ, 色素上皮細胞と思われる細胞が遊走していた。

### (3) 光凝固1~3カ月後の所見(図11)

凝固後, 1~3カ月経過すると3波長間の組織学的な特徴は少なくなっていた。すなわち, 弱度, 中等度凝固では網膜においては視細胞層の消失と, 網膜下への色素顆粒を持ったマクロファージの遊走, 網膜色素上皮の再生, 重層化がみられたが, 網膜内層はよく保たれており, 3波長間の差異はほとんどみられなかった。

強度凝固では凝固部網膜は外顆粒層より外層が消失し, Bruch膜上には扁平な細膜色素上皮が不規則に断続的に配列し, これに外網状層およびグリタ組織が直接接していた。577nmでは神経節細胞, 外顆粒層の細胞配列の乱れがみられ, 網膜内層の障害が残存していた。3波長とも網膜内層の構造は比較的良く保たれ, 網膜細血管はいずれの波長でも開存していた。脈絡膜

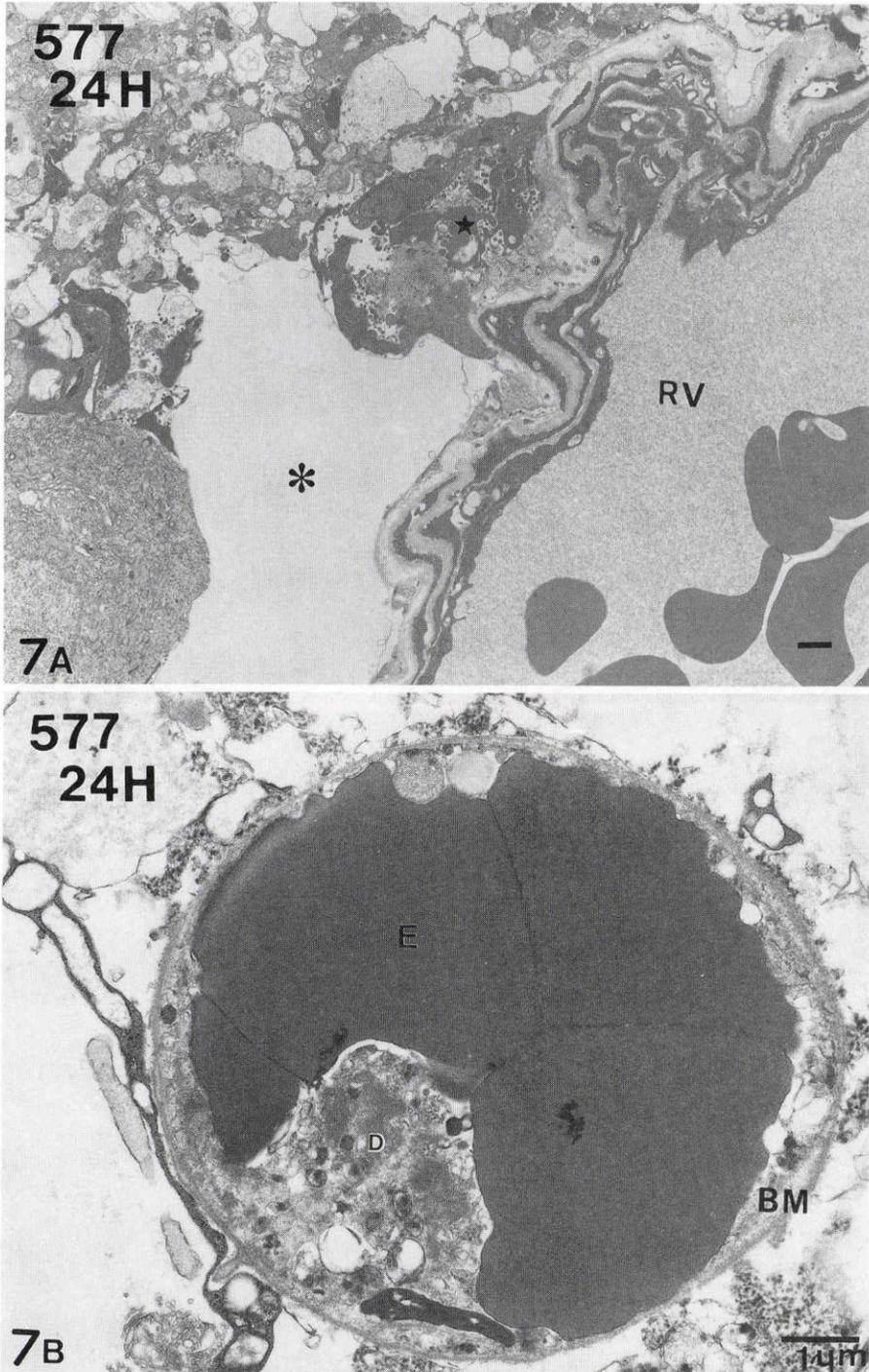


図7 577nm, 強度凝固による網膜血管の電顕像(光凝固24時間後), A: 図6Aにみられる網膜血管およびその周囲組織: 網膜血管周囲には空胞(\*)が生じ, 血管周囲や, Müller細胞と思われるグリア細胞にも凝固壊死(星印)を主体として空胞変性, 細胞内小器官の破壊がみられた. ( $\times 2,500$ , バーは $1\mu\text{m}$ .) B: 網膜細血管に対する凝固効果: 基底膜は保たれているが内皮細胞, pericyteは凝固壊死に陥り, 内腔は赤血球(E), 細胞残渣(D)などにより閉塞していた. 血管周囲組織の破壊が著しい. ( $\times 8,000$ , バーは $1\mu\text{m}$ .)

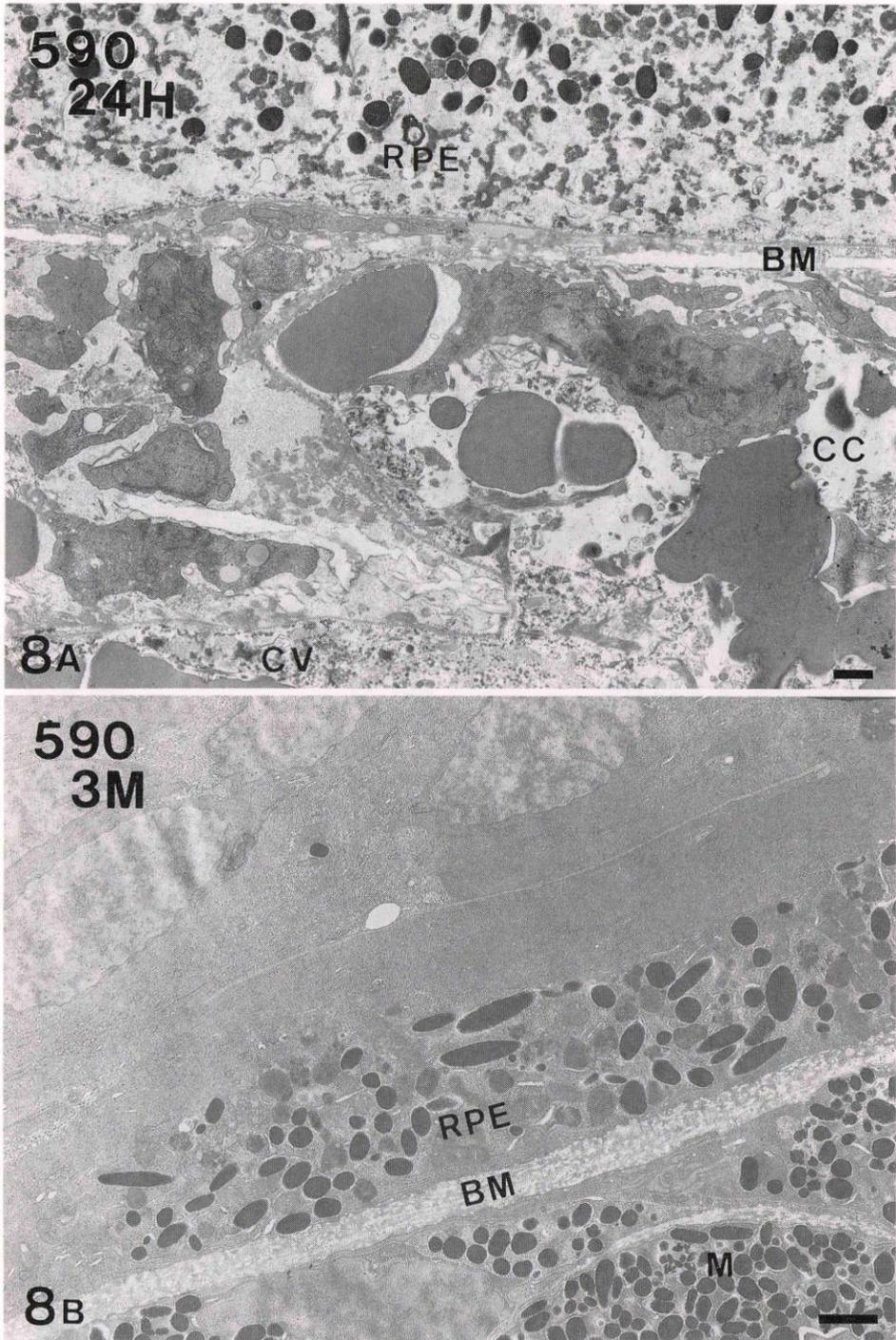


図8 590nm, 強度凝固(150mW)による脈絡膜毛細血管の電顕像。A:24時間後:脈絡膜毛細血管は白血球,赤血球,フィブリンなどにより血栓が形成され,閉塞していた。深部の脈絡膜血管(CV)にも血管壁の凝固壊死,血栓形成が及んでいた。Bruch膜の層状構造も不明瞭になっていた。(×3,000,バーは1 $\mu$ m。)B:3カ月後:凝固部中央で,脈絡膜毛細血管板は完全に消失し,メラノサイト(M)を主とする脈絡膜の結合織により置換されていた。網膜側には扁平な網膜色素上皮(RPE)が増殖し,Müller細胞の突起と接していた。Bruch膜(BM)には障害は見られなかった。(×4,000,バーは1 $\mu$ m。)

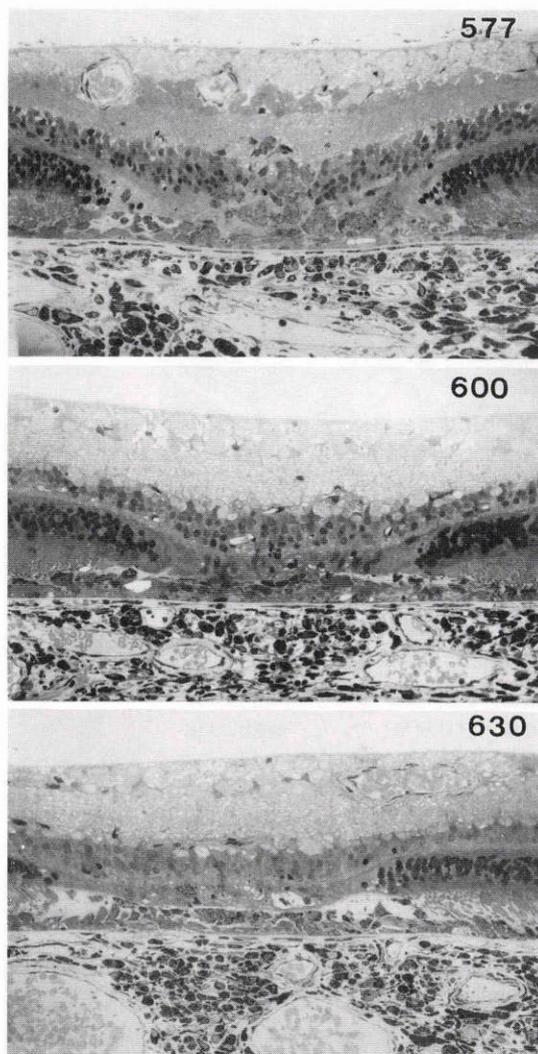


図9 強度凝固(150mW), 光凝固後1週間の光顕所見 (トルイジンブルー染色,  $\times 150$ ). 577nmでは内網状層にまで色素顆粒をもった細胞が遊送しており, 内層の障害が他の2波長に比べて強くみられた. 3波長とも外顆粒層から外層は消失し, 網膜下腔には色素上皮細胞の増殖, 色素顆粒をもったマクロファージの遊走がみられた.

毛細血管は凝固部中央ではいずれも閉塞消失しており, 脈絡膜メラノサイト, 線維芽細胞などの結合織により置換されていたが, 凝固部の辺縁では血行の再疎通がみられ, この再疎通の傾向は, 凝固出力に関係なく577nmで最も強くみられ, 630nmがこれに次いでいた. 590nmでは脈絡膜毛細血管は凝固部中央で最も広く閉塞消失していた(図8B).

#### IV 考 按

同一凝固条件下でレーザー光の波長を変えて光凝固を行なった場合, その凝固効果には標的組織に対するレーザー光の波長すなわち色の違いによる吸収率(熱変換率)と, 波長の長さによる中間透光体における透過率と組織深達性が関係する. 混濁のない眼内透光体における透過率は色素レーザー波長の範囲内ではほとんど変化がない<sup>11)</sup>. すなわち本実験のように正常サル<sup>12)</sup>の眼底組織において光凝固を行なう場合には, 波長ごとの眼内組織に対する吸収率と組織深達性が凝固効果に最も影響する. 眼底に存在する主な色素には, 血管内に存在するヘモグロビン, 網膜色素上皮や脈絡膜メラノサイトに存在するメラニン, 黄斑部の内, 外網状層に存在する黄色色素キサントフィルの3つがある. 色素レーザーの波長の範囲内ではメラニン, キサントフィルに対する吸収率には大きな違いはなく, 著明に変化するものはヘモグロビンに対する吸収率である<sup>1)~6)</sup>.

我々は, 現在までに確認されている吸収率曲線<sup>1)~5)</sup>, あるいはその理論値<sup>6)</sup>から, 色素レーザーの黄色波長のうち, 酸化ヘモグロビンに対する吸収率がきわめて高い577nmを, また色素レーザーのうち最も長波長であり組織深達性の度い630nmの赤色波長を, また両者の中間の波長として590nmあるいは600nmの橙色波長を選び, この3種の波長を用いて3段階の強さで実験的に光凝固を行ない, 網膜脈絡膜に対する凝固効果を組織学的に観察した.

結果として, 3波長間の凝固効果は, 弱度凝固では差が少なく, 中等度, 強度凝固において差がみられた. すなわち3波長間の組織所見の違いは, 網膜血管のない部では凝固効果の組織深達性が主であり, 黄色波長では, 波長が短いので橙色, 赤色波長よりも網膜の内層に影響を及ぼしやすいという結果が得られた. 一方, 最も波長の長い630nmでは, クリプトンレーザーに似て<sup>8)~12)</sup>, 網膜内層は障害しないで, 逆に脈絡膜の深層まで凝固効果が及び, 最も組織深達性に優れていた.

波長間の組織所見の違いは, 網膜血管の直接凝固において最も顕著であった. すなわち577nmの黄色波長では網膜血管壁の凝固作用とその周囲組織に対する凝固効果が強いことが特徴的であり, 逆に630nmの赤色波長では網膜血管および周囲組織, すなわち網膜内層の障害はみられなかった. 一方, 橙色は両者の中間的な凝固効果を示し, 網膜血管にも吸収された. これら

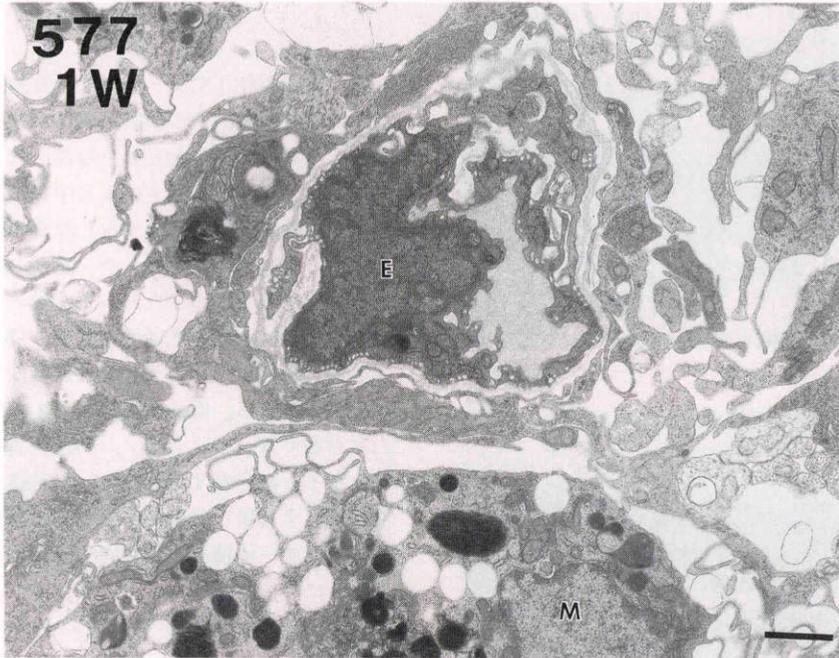


図10 577nm, 1時間後の凝固部網膜血管の電顕像. 網膜毛細血管の内皮細胞(E)は, 細胞質に空胞 (pinocytotic vesicle)が多く, 血管内腔は狭窄していた. 周囲には色素顆粒を持ったマクロファージ(M)の遊走が見られた. ( $\times 6,000$ , バーは $1\mu\text{m}$ .)

の成績は, 各波長ごとのヘモグロビンに対する吸収率の差が網膜血管に対する凝固効果の違いとしてあらわれたものと考えられた.

Mainsterによると, 577nm黄色波長は, 波長特性の基礎的研究から, 可視光のうちでは542nm(緑色)とともに酸化ヘモグロビンに対する吸収率が最も高い波長であり, アルゴンレーザーの青緑色波長に比して, 2倍以上の吸収係数 (extinction coefficient) を持つとしている<sup>5)</sup>. また Wiederらは568nmの黄色クリプトンレーザーを用いて実験的に網膜血管に対する光凝固を行ない, その凝固効果を緑色アルゴンレーザー (波長514nm), 緑色クリプトンレーザー (波長531nm) と比較し, 網膜血管に対する凝固効果は568nmで最も強かったと報告している<sup>13)</sup>. 577nmを用いた今回の実験では, 出力150mWでは網膜の太い血管の完全閉塞は起こらなかったが, 凝固部周辺の網膜毛細血管にはかなり強い閉塞性変化を及ぼし, その効果が持続していた. アルゴンレーザーの青色(488nm), 緑色(514nm)は波長が短かくヘモグロビンに対する吸収があるので, 網膜の内層まで凝固効果を及ぼし, かつ網膜血管への凝固効果を持っているが, 色素レーザーの577nm

の網膜血管に対する凝固効果は, 従来の青緑色アルゴンレーザーによる報告と比べて, 低出力でもかなり強く現われた.

また酸化ヘモグロビンに対する吸収率は590nmから600nmの橙色波長の間で急激に低下し, L'Esperanceによると, 590nmでは酸化ヘモグロビン吸収率は64%であったものが, 600nmでは17%に減少するという<sup>2)</sup>. このような理論的根拠からすれば, 590nm~600nmではさまざまな凝固効果があるものと予想される. 我々の実験でも590nm~600nmは最も長波長の630nmの赤色波長に似た組織深達性を示し, 凝固効果は網膜外層と脈絡膜内層に強く現われ, さらに, 弱い網膜血管への凝固効果が, ある程度見られた.

Borgesらは色素レーザーの590nm, 595nm, 600nm, 605nmの4種の波長を用いて実験的にサル眼に傍中心窩領域の光凝固を行ない, 凝固効果は網膜外層から脈絡膜毛細血管に限局していて, 網膜内層の障害はみられず, 波長間で組織学的に大差は認められなかったと述べている<sup>14)</sup>. またこれに対し, Smiddyらは595nmと600nmを用いて, 比較的強い凝固で傍中心窩領域あるいは乳頭黄斑線維束の領域を光凝固した際に, 他の

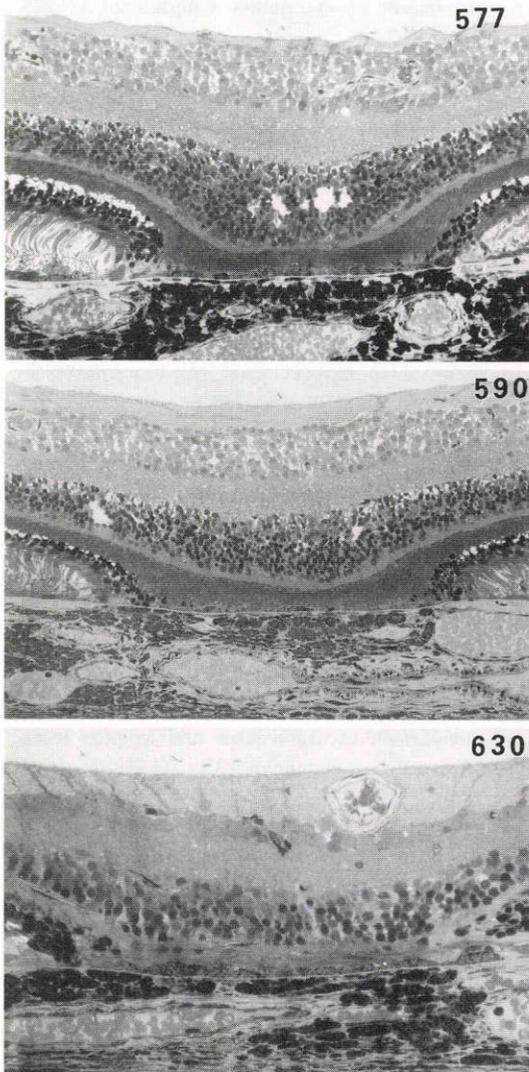
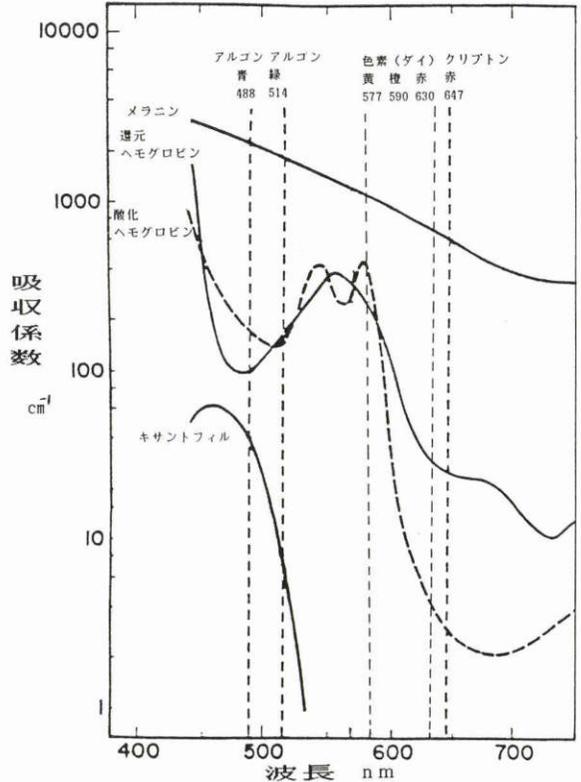


図11 強度凝固(150mW), 光凝固後3カ月の光顕所見 (トルイジンブルー染色,  $\times 150$ ). 577nmでは網膜内層, 内顆粒層, 網膜血管周囲に軽い障害がみられるが網膜血管は開通している. 590nm, 630nmでは網膜内層には障害が少なく, 590nmでは脈絡膜毛細血管の閉塞効果が最もよく持続していた.



Mainster MA : Ophthalmology 93 :952 ~958, 1986 より改変

図12 レーザー光の波長と吸収曲線

については、波長特性からのみでは説明できない効果、すなわち未知のレーザー組織間の相互作用が存在する可能性があり<sup>9)</sup>、今後さらに深い検討が必要であると考えられた。

また今回の630nm 赤色波長の凝固効果は、網膜血管に対する影響は少なく、かつ組織深達性が強く、これらは従来の赤色クリプトンレーザーの凝固効果と類似したものであった。

光凝固後晩期になると網膜においては3波長間の組織学的な差は少なくなっていたが、脈絡膜の血行修復に関して3波長間で差がみられた。すなわち577nmでは、最も早く脈絡膜血行が回復し、590nmでは脈絡膜毛細血管の閉塞効果が最も良く持続した。このことは590nmの橙色がメラニンとヘモグロビンの両方に吸収されやすく、しかも組織深達性を兼ね備えているためであると考えられ、590nmは脈絡膜血管の凝固効率が高い波長であることが示唆された。

以上、今回の実験から、色素レーザーによる網膜脈

波長にはみられない網膜全層の障害が見られたが、弱度凝固では両者とも凝固効果は網膜外層に限局していたという事実から、橙色波長を用いる場合には、出力は比較的低出力を用いるのがよいという<sup>10)</sup>。今回の実験結果では、強度凝固(出力150mW)においても強い全層の凝固効果は見られなかったが、Mainsterらにより指摘されているように、橙色領域の実際の凝固効果

絡膜に対する凝固効果は、従来から述べられてきた波長特性を比較的良好に反映していることがわかった。3波長の凝固効果の違いは、組織深達性とヘモグロビンに対する吸収の差から生ずることが判明した。すなわち黄色577nmは網膜血管への凝固効果が強く、また網膜内層へも凝固効果を示す可能性がある。橙色590nm、600nmと赤色630nmは網膜外層と脈絡膜に強い凝固効果を示し、630nmでは網膜血管には凝固効果を示さなかった。また、590nmでは深達性と網膜血管凝固効果がみられた。このような結果から、凝固出力に注意して光凝固を行えば、波長特性を生かした選択凝固が可能であると考えられた。

本研究の要旨は第91回日本眼科学会(昭和62年5月15日)において高橋が報告した。

#### 文 献

- 1) **L'Esperance FA**: Ophthalmic Lasers, 2nd Ed, Mosby, St Louis, 1983.
- 2) **L'Esperance FA**: Clinical applications of the organic dye laser. Ophthalmology 92: 1592-1600, 1985.
- 3) **Peyman GA, Raichard M, Zeimer RC**: Ocular effects of various laser wavelengths. Surv Ophthalmol 28: 391-404, 1984.
- 4) **Trempe CL, Mainster MA, Pomerantzeff O**, et al: Macular photocoagulation optimal wavelength selection. Ophthalmology 89: 721-728, 1982.
- 5) **Mainster MA**: Wavelength selection in macular photocoagulation. Ophthalmology 93: 952-958, 1986.
- 6) **Geraets WJ, Williams RC, Chan G**, et al: The relative absorption thermal energy in retina and choroid. Invest Ophthalmol 1: 340-347, 1962.
- 7) **Boettner EA, Wolter JR**: Transmission of

the ocular media. Invest Ophthalmol 1: 776-783, 1962.

- 8) **加藤直子, 大熊 紘, 板垣 隆他**: アルゴンレーザーとクリプトンレーザーの網膜脈絡膜への凝固効果の検討1. 光凝固後早期の光学顕微鏡所見. 日眼 89: 1294-1300, 1985.
- 9) **加藤直子, 大熊 紘, 板垣 隆他**: アルゴンレーザーとクリプトンレーザーの網膜脈絡膜への凝固効果の検討2. 光凝固後晩期の光学顕微鏡所見. 日眼 90: 283-290, 1986.
- 10) **加藤直子, 大熊 紘, 板垣 隆他**: アルゴンレーザーとクリプトンレーザーの網膜脈絡膜への凝固効果の検討3. 脈絡膜血管鑄型標本による立体的観察. 日眼 90: 898-907, 1986.
- 11) **Marshall J, Bird AC**: A comparative histopathological study of argon and krypton laser irradiations of the human retina. Br J Ophthalmol 63: 657-668, 1979.
- 12) **Peyman GA, Li M, Yoneya S, Goldberg MF**, et al: Fundus photocoagulation with the argon and krypton lasers: A comparative study. Ophthalmic Surg 12: 481-490, 1981.
- 13) **Wieder M, Pomerantzeff O, Schneider J**: Retinal vessel photocoagulation: A quantitative comparison of argon laser and krypton laser effects. Invest Ophthalmol Vis Sci 20: 418-424, 1981.
- 14) **Borges JM, Charles HC, Lee CM, Smith RT**, et al: A clinicopathologic study of dye laser photocoagulation on the primate retina. Retina 7: 46-57, 1987.
- 15) **Smiddy WE, Patz A, Quigley H, Dunkelberger G**: Histopathology of the tunable dye laser in primate retina. Invest Ophthalmol Vis Sci 27(Suppl): 219, 1986.

(第91回日眼総会原著)