

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

—有色および白色家兎眼における凝固効果の比較検討(図4)

尾花 明・三木 徳彦(大阪市立大学医学部眼科学教室)

要 約

ダイ・レーザーの4種類の波長(577, 590, 610, 630nm)をもちいて、有色および白色家兎眼底を光凝固し、凝固斑を形態学的に比較検討した。577nmでは有色および白色眼とも同程度に凝固され、577nmはメラニン色素の非存在下でも脈絡膜毛細血管内のヘモグロビンに吸収されて、網脈絡膜凝固ができることが確かめられた。590nmでは白色眼での凝固程度が軽く、ヘモグロビンへの吸収はやや少ないと思われた。610, 630nmでは白色眼において577, 590nmと同じ凝固条件では凝固斑は形成されず、明らかな形態学的変化をきたすにはさらに強度の凝固を要したので、そのエネルギー量を577nmの場合と比較した。正常眼における凝固巣形成にはメラニンによる吸収が主となるが、種々の病態でメラニンのない時にはヘモグロビン吸収率の違いによる影響が顕性化する。(日眼会誌 93:844-851, 1989)

キーワード: ダイ・レーザー, メラニン, ヘモグロビン, 白色家兎, 形態学的研究

The Effect of Melanin and Hemoglobin on the Dye Laser Photocoagulation in Pigmented and Albino Rabbits

Akira Obana and Tokuhiko Miki

Osaka City University Medical School, Department of Ophthalmology

Abstract

Photocoagulation was performed in pigmented and albino rabbits using four different wavelengths of the dye laser (577nm, 590nm, 610nm and 630nm), and each photocoagulated lesion was examined histologically. The 577nm dye laser produced chorioretinal coagulation in albino rabbits, which was almost the same as that in pigmented rabbits. This result confirmed that the 577nm dye laser was well absorbed by hemoglobin in the choriocapillaris, and could produce the sufficient coagulation even if there was no melanin pigment. The 590nm dye laser produced chorioretinal coagulation in albino rabbits, but it was weaker than that in pigmented rabbits. It was considered that this was because the absorption by hemoglobin of the 590nm dye laser was less than that of the 577nm dye laser. The 610 and 630nm dye laser could not yield appropriate coagulation in albino rabbits under the same conditions as in the 577nm dye laser. More intense coagulation, that is longer duration and higher power, was required to make chorioretinal coagulation in albino rabbits using the 610 and 630nm dye laser. In photocoagulation of normal fundus, melanin is the main substance of laser absorption, but in various disorders lacking melanin, the differences of the hemoglobin absorption rate becomes important. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 93: 844-851, 1989)

Key words: Dye laser, Melanin, Hemoglobin, Albino rabbit, Histological study

別刷請求先: 545 大阪市阿倍野区旭町1-5-7 大阪市立大学医学部眼科学教室 尾花 明
(平成元年5月15日受付, 平成元年7月7日改訂受理)

Reprint requests: Akira Obana, M.D. Department of Ophthalmology, Osaka City University Medical School 1-5-7 Asahimachi, Abeno-ku, Osaka 545, Japan

(Received May 15, 1989 and accepted in revised form July 7, 1989)

I 緒 言

可視光領域の波長を有するレーザーで眼底を光凝固する場合、レーザー光を吸収する物質としてはヘモグロビン、メラニン、キサントフィルなどが知られており¹⁾、なかでもメラニン色素は主たる吸収物質とされている²⁾。しかし病巣によってはヘモグロビンが凝固効果に大きな影響を持つ場合³⁾⁴⁾がある。とくにダイ・レーザーの波長領域では生体外の実験からヘモグロビンに対する吸収率の変化が顕著⁵⁾⁶⁾であるから、波長の選択にあたってこの点を十分考慮に入れる必要がある^{7)~10)}。

そこで今回は生体眼において、ダイ・レーザー各波長のヘモグロビン吸収差による凝固効果の違いを形態学的に調べることに重点をおいた。この場合有色眼を使った実験¹¹⁾ではレーザー光がメラニン色素に吸収され、その影響が強くあらわれるためにヘモグロビンでの吸収の差による形態学的変化の違いが出にくいと思われる。そこでメラニン色素を持たない白色家兎眼において光凝固を行ない、その結果を有色家兎眼のものと比較検討した。

II 方 法

1. 実験動物

白色および有色家兎において検眼鏡的に異常がなく、有色家兎においてはメラニンによる色調がほぼ一定と思われる眼を使用した。

2. 実験方法

白色または有色家兎眼の後極部を、コヒレント社製 920 アルゴン/ダイ・レーザー光凝固装置にて以下のごとく凝固を行なった。使用波長は黄色(波長577nm)、橙色(波長590nm)、橙赤色(波長610nm)、赤色(波長630nm)の4種類で、凝固条件は500 μ m, 0.2sec., 100 mW とした。さらに白色家兎眼には、波長610nm ダイ・レーザーおよび630nm ダイ・レーザーを用いて、光凝固時に細隙灯顕微鏡下で灰白色の凝固斑が見える程度まで凝固条件を強めた凝固を追加して行なった。すなわち610nm ダイ・レーザーでは500 μ m, 0.5sec., 280mW と500 μ m, 1.0sec., 300mW, 630nm ダイ・レーザーでは500 μ m, 2.0sec., 400mW と500 μ m, 2.0sec., 600mW で施行した。光凝固30分後と1週後に眼球摘出し、カルノフスキー液中で凝固部を切出して細切し、さらに2%オスミウム酸液にて二重固定後、エタノール系列で脱水し、エポキシ樹脂に包埋した。Porter-

Blum MTIIB 型ウルトラマイクロームにて光学顕微鏡(以下光顕)用切片を作製し、トルイジンブルー溶液で染色後光顕にて観察、超薄切片を作製後酢酸ウランニールとクエン酸鉛で二重染色し、日立 HS-9 透過型電子顕微鏡(以下電顕)にて観察・撮影した。

III 結 果

1. 577nm

1-1. 凝固30分後

光顕的には有色および白色家兎眼とも、凝固中心部で内外顆粒層細胞の配列が乱れ、網膜色素上皮細胞が凝固されて、脈絡膜毛細血管は閉塞していた(図 1a)。電顕では有色・白色眼とも内境界膜・神経線維層は正常であったが、神経節細胞には膨化したミトコンドリアや空胞がみられた。内網状層は細胞突起が腫脹し、内顆粒層の細胞はミトコンドリアに腫脹のみられる程度のもので、核の膨化、細胞内小器官の崩壊消失したもので見られた。視細胞には核濃縮や核崩壊がみられ、内外節も破壊されていた。網膜色素上皮細胞は細顆粒状で凝固壊死となり、ブルッフ膜との間隙にフィブリン様物質がみられた。脈絡膜毛細血管内皮細胞および壁細胞も凝固壊死となり、管内には血栓や壊死細胞とこれらを貪食したマクロファージと思われる細胞がみられた(図 1b)。脈絡膜細動静脈の壁構成細胞も細顆粒状を呈し、細胞の概形は保っているものの凝固壊死となり、脈絡膜外層には細胞間浮腫が認められた。

1-2. 凝固1週後

光顕的には有色および白色家兎眼とも内境界膜は保たれ、凝固中心部では内顆粒層細胞の配列が乱れ、外顆粒層の細胞は消失していた(図 1c, d)。電顕では有色・白色眼とも神経線維は腫大し、細胞様小体もみられた。神経節細胞にはミトコンドリアの腫脹や細胞内浮腫が認められた。内網状層の細胞突起は空胞変性となり、内顆粒層細胞は数が減少し、一部にミトコンドリアの腫脹や細胞全体が空胞状となったものがみられた。視細胞は消失し、かわりにグリア細胞とマクロファージがみられた。網膜色素上皮細胞は再生し、脈絡膜毛細血管層には線維芽細胞、マクロファージ、基底膜をもつ細胞がみられた。脈絡膜細動静脈の管腔は開存していたが、脈絡膜間質には線維芽細胞と膠原線維が増加していた。これらの所見は有色眼と白色眼の間でとくに著明な相違は認められなかった。

2. 590nm

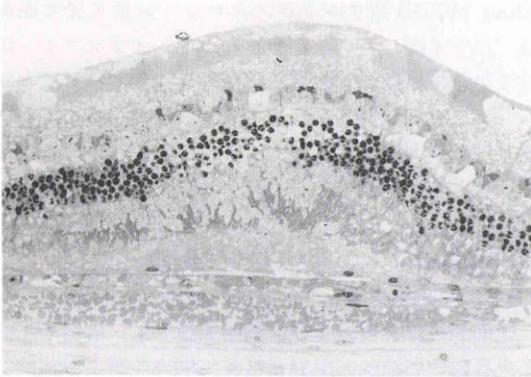


図 1a 577nm による白色眼，光凝固30分後の光顕写真（トルイジンブルー染色，×100）
内外顆粒層細胞の核配列が乱れ，内外節は凝固されている。網膜色素上皮細胞は障害され，脈絡膜毛細血管は閉塞している。

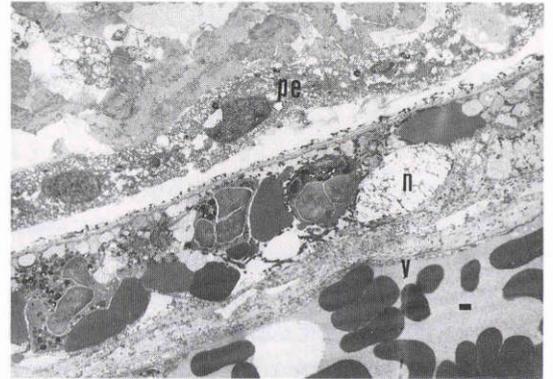


図 1b 577nm による白色眼，光凝固30分後の電顕写真（バー；1 μ m）
網膜色素上皮細胞 (pe) は凝固され，脈絡膜毛細血管内皮細胞核 (n) は膨化が高度である。管腔は閉塞しマクロファージがみられる。脈絡膜細静脈 (v) の内皮細胞も胞体が顆粒状を呈している。

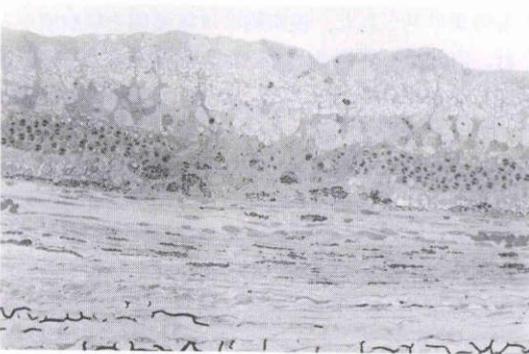


図 1c 577nm による有色眼，光凝固 1 週後の光顕写真（トルイジンブルー染色，×100）
内境界膜を除く網膜全層に障害がみられ，脈絡膜毛細血管層には管腔がみられない。

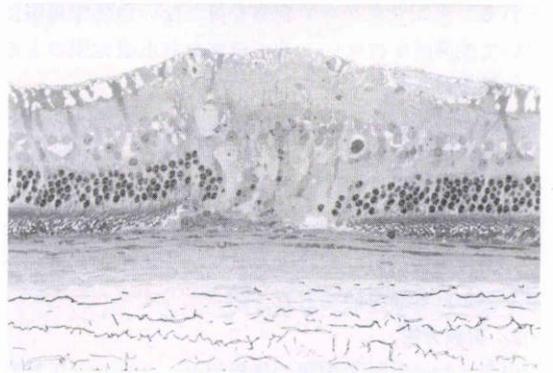


図 1d 577nm による白色眼，光凝固 1 週後の光顕写真（トルイジンブルー染色，×100）
内境界膜を除く網膜全層に障害がみられ，脈絡膜毛細血管層には管腔がみられない。

2-1. 凝固30分後

光顕的には有色眼では内顆粒層の細胞配列がわずかに乱れ，外顆粒層細胞の数が減少して配列が乱れ，内外節が崩壊していた。網膜色素上皮細胞は破壊され，脈絡膜毛細血管は閉塞していた。脈絡膜細静脈の狭窄とそれより外層の脈絡膜間質の浮腫がみられた。

白色眼では網膜色素上皮細胞の破壊と脈絡膜毛細血管の閉塞，視細胞層の軽度の破壊がみられたが，他の網脈絡膜各層には顕著な異常はみられなかった。

電顕的には有色眼では内網状層の細胞突起や内顆粒層細胞のミトコンドリアに腫脹がみられた。視細胞は崩壊し，網膜色素上皮細胞と脈絡膜毛細血管の壁構成

細胞は凝固壊死となり，管腔は閉塞していた。脈絡膜細動静脈壁も凝固されていたが管腔は完全には閉塞していなかった。

白色眼では網膜色素上皮細胞，脈絡膜毛細血管内皮細胞は凝固壊死となり，管腔内に血栓や壊死物質が認められた。

2-2. 凝固 1 週後

光顕的には有色眼では内境界膜は保たれていたが内顆粒層の細胞配列が乱れ，外顆粒層の細胞は消失していた（図 2a）。

白色眼では光顕的には内境界膜は保たれ、内顆粒層の細胞配列が乱れていた。外顆粒層の細胞は消失していたが、有色眼の場合と較べて消失したのは狭い範囲であった(図2b)。

電顕的には有色眼では神経線維層に細胞様小体(cyloid body)がみられ、内網状層細胞突起は空胞様の変性となり、内顆粒層の細胞は数が減少し、一部に空胞様変性がみられた。視細胞は消失してグリア細胞がみられ、網膜色素上皮細胞は再生していた。脈絡膜毛細血管が消失し線維芽細胞がみられた。

白色眼では神経線維層は正常で、内顆粒層の細胞数がわずかに減少し、残存した細胞にもミトコンドリアの腫脹が軽度みられた。網膜色素上皮細胞は再生し、脈絡膜毛細血管は線維芽細胞に置き換えられていたが、その脈絡膜毛細血管腔の消失部の水平方向の広がり577nmの場合と比べて狭かった。

3. 610nm

3-1. 凝固30分後

有色眼では光顕的には内顆粒層の細胞配列がわずかに乱れ、外顆粒層の細胞に崩壊と配列の乱れがみられた。網膜色素上皮細胞は凝固されて脈絡膜毛細血管は閉塞し、脈絡膜細動脈も障害されていた。

一方、白色眼では有色眼と同じ凝固条件では光凝固施行時に凝固斑が生じず、組織切片標本の光顕的観察でも凝固部位が確認できなかった。強度凝固例では光顕的に網膜内層は正常で、外顆粒層の細胞数が減少するとともに配列が乱れていた。網膜色素上皮細胞、脈絡膜毛細血管は崩壊し、脈絡膜細動脈内に血栓形成がみられた。電顕では視細胞内外節は崩壊し網膜色素上皮細胞は凝固壊死となり、胞体は空胞状または細顆粒状を呈していた。脈絡膜毛細血管の内皮細胞・壁細胞も同様に壊死となり、管腔内には壊死産物やそれらを貪食したと思われるマクロファージがみられた(図3a)。脈絡膜細静脈壁構成細胞(内皮細胞、平滑筋細胞)は細顆粒状を呈したり、空胞形成や核の膨化がみられ、管腔内にはマクロファージが存在した。脈絡膜外層でも線維芽細胞の胞体が細顆粒状を呈したり、空胞形成がみられ、細胞間浮腫が顕著で膠原線維は断裂していた。

3-2. 凝固1週後

有色眼では光顕的には内顆粒層の細胞配列に乱れと、外顆粒層の細胞および内外節の消失がみられた。脈絡膜毛細血管層には血管腔はみられなかった。電顕的には内顆粒層細胞突起の腫脹が軽度みられ、内顆粒

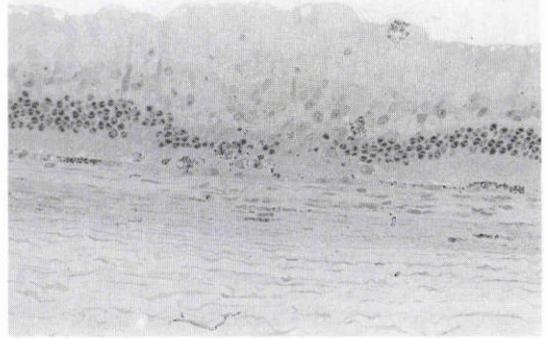


図2a 590nmによる有色眼、光凝固1週後の光顕写真(トルイジンブルー染色, ×100)
内境界膜を除く網膜全層に障害がみられ、脈絡膜毛細血管層には管腔がみられない。

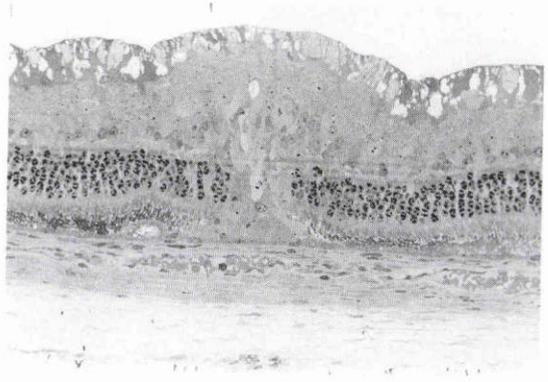


図2b 590nmによる白色眼、光凝固1週後の光顕写真(トルイジンブルー染色, ×100)
内網状層から内層の網膜には障害はみられず、内顆粒層に軽度の細胞配列の乱れがみられる。視細胞は消失しグリア細胞により置き換わっているが、グリア細胞の増殖のみみられる範囲は有色眼に比べやや狭い。

層の細胞には空胞変性がみられた。視細胞は消失し、その部位にグリア細胞が増殖していた。網膜色素上皮細胞は再生し、脈絡膜毛細血管層には線維芽細胞がみられた。

白色眼では有色眼と同じ条件による凝固では1週後も検眼鏡的に凝固斑がみられず、また組織切片の光顕的観察においても凝固部位が確認できなかった。強度凝固では光顕的に内顆粒層の細胞配列の乱れと外顆粒層細胞、内外節の消失、脈絡膜毛細血管の閉塞がみ

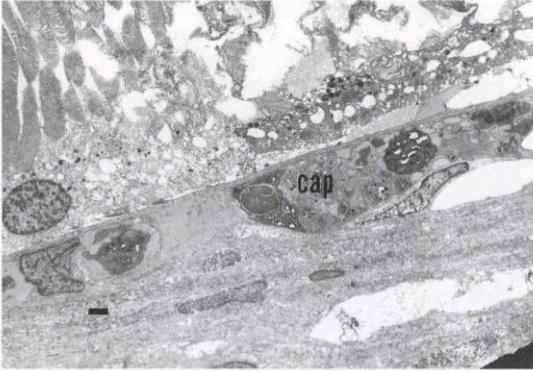


図 3a 610nm による白色眼, 光凝固30分後の電顕写真 (バー: 1 μ m)

凝固条件 (500 μ m, 1.0sec., 300mW) の強度凝固施行例。網膜色素上皮細胞は壊死となり, 脈絡膜毛細血管 (cap) の管内には壊死産物やマクロファージと思われる細胞がみられる。

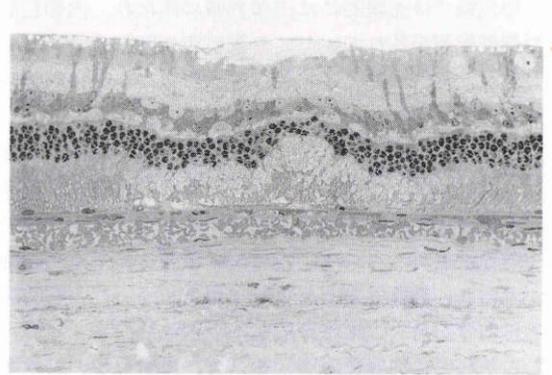


図 4a 630nm による白色眼, 光凝固30分後の光顕写真 (トルイジンブルー染色, $\times 100$)

凝固条件 (500 μ m, 2.0sec., 400mW) の強度凝固施行例。網膜外層の軽度障害と脈絡膜毛細血管の閉塞がみられる。

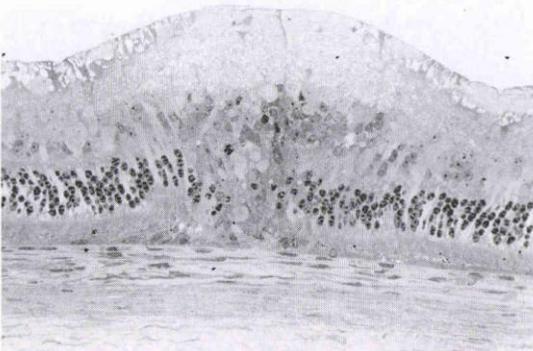


図 3b 610nm による白色眼, 光凝固1週後の光顕写真 (トルイジンブルー染色, $\times 100$)

凝固条件 (500 μ m, 0.5sec., 280mW) の強度凝固施行例。内網状層から外層の網膜に障害がみられる。脈絡膜毛細血管層には血管腔はみられない。

られた (図 3b)。電顕では網膜色素上皮細胞は再生し, 脈絡膜毛細血管は一部で消失, 線維芽細胞がみられた。また基底膜様物質に囲まれた中に不整な形をした胞体を持つ幼弱内皮細胞と思われる細胞がみられる部位もあった。脈絡膜静脈は狭窄し, 脈絡膜間質の線維芽細胞は増加していた。

4. 630nm

4-1. 凝固30分後

有色眼では光顕的に外顆粒層の細胞配列が乱れて内外節は破壊され, 網膜色素上皮細胞は凝固されていた。

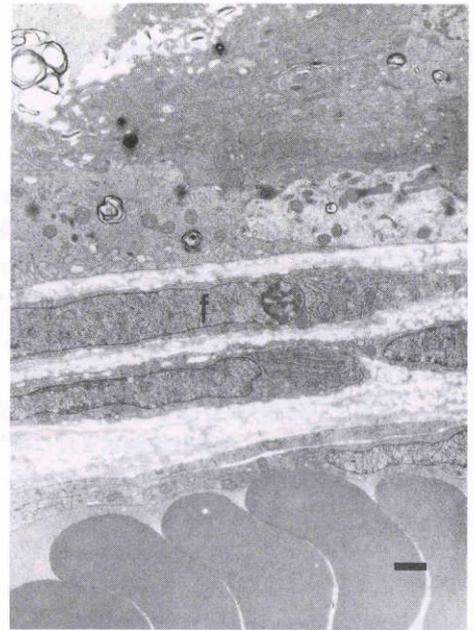


図 4b 630nm による白色眼, 光凝固1週後の電顕写真 (バー: 1 μ m)

凝固条件 (500 μ m, 2.0sec., 600mW) の強度凝固施行例。網膜色素上皮細胞は再生し, 脈絡膜毛細血管層には線維芽細胞 (f) がみられる。

脈絡膜毛細血管は閉塞し, 脈絡膜は浮腫状であった。電顕的には神経線維は正常であったが神経節細胞のミトコンドリアの腫脹がみられた。内網状層の細胞突起

が腫脹し、内顆粒層細胞のミトコンドリアの腫脹がみられた。視細胞は崩壊し、網膜色素上皮細胞は凝固壊死となっていた。脈絡膜毛細血管壁構成細胞は壊死となり、管腔は閉塞していた。脈絡膜外層の間質細胞も凝固されていた。

白色眼では610nmの場合と同様に、有色眼と同じ凝固条件では凝固斑が細隙灯顕微鏡および光顕にて確認されなかった。強度凝固では光顕的に外顆粒層の細胞数がわずかに減少し、視細胞は浮腫状で外節の一部は消失していた(図4a)。網膜色素上皮細胞は一部空胞状になり、脈絡膜毛細血管は閉塞していた。電顕では視細胞内外節は破壊され、網膜色素上皮細胞は細顆粒状または空胞状となっていた。脈絡膜毛細血管内皮細胞は細顆粒状を呈し、核の高度膨化がみられた。脈絡膜細静脈の内皮細胞や平滑筋細胞、また脈絡膜間質の線維芽細胞も細胞質は細顆粒状で、細胞間浮腫がみられた。

4-2. 1 週後

有色眼では光顕的に内網状層はトルイジンブルーで淡く染色され、内顆粒層の細胞数の減少と配列の乱れがあり、外顆粒層の細胞は消失していた。網膜色素上皮細胞は再生していたが、脈絡膜毛細血管には血管腔は認められなかった。電顕的には神経線維はごく一部に腫脹したものを認めたが多くは正常で、神経節細胞にはミトコンドリアの腫脹がみられた。内網状層細胞突起は腫脹、空胞変性がみられた。視細胞は消失しグリア細胞が増殖していた。

白色眼の強度凝固では光顕にて内外顆粒層の細胞配列に軽度の異常を認め、外境界膜が不明瞭でグリア細胞の増殖を認めた。網膜色素上皮細胞は再生していた。電顕では神経線維は正常、神経節細胞にはミトコンドリアの腫脹を軽度認めた。内網状層細胞突起の腫脹はごく一部に限られ、内顆粒層細胞にミトコンドリアの腫脹を認めた。脈絡膜毛細血管層には線維芽細胞がみられたり(図4b)、内皮細胞の消失した基底膜様物質が線維芽細胞や膠原線維の間にみられた。また一部に未熟な内皮細胞で形成された管腔もみられた。脈絡膜細動静脈は正常であったが、脈絡膜間質に空胞変性や層状の封入体(lamellar inclusion body)をもつ細胞が認められた。

IV 考 察

ダイ・レーザーを網脈絡膜凝固に使用する場合の波長選択は、すでに報告されているように⁵⁾⁷⁾⁻⁹⁾ダイ・

レーザー各波長の、メラニン、酸化ヘモグロビン、還元ヘモグロビン、キサントフィルに対する吸収率曲線を参考にして行なわれている。この吸収率曲線からは黄色および橙色ダイ・レーザーは網膜色素上皮細胞・脈絡膜のメラニン色素と網膜および脈絡膜の血管内のヘモグロビンに吸収されて熱に変わり、一方橙赤色および赤色ダイ・レーザーはヘモグロビンにほとんど吸収されないことから、主に網膜色素上皮細胞・脈絡膜のメラニン色素に吸収されて熱を発生するものと考えられている。したがって老人性黄斑変性などでみられる脈絡膜新生血管のように、しばしばメラニン色素を持たない網膜色素上皮細胞に覆われている病変の凝固には、ヘモグロビンによく吸収される黄色または橙色ダイ・レーザーの使用がよいとされる。しかし生体内では、血管の太さを考えると血管内のヘモグロビンに吸収されるエネルギー量は少なく、ヘモグロビン全体の吸収はメラニン色素の吸収に比べて網膜光凝固でわずかな役割しか持たないとの報告⁵⁾もあり、光凝固におけるメラニン色素とヘモグロビンの役割は十分理解されているとは言えない。また種々の光吸収物質に対する吸収率曲線はあくまでも生体外において計測された結果であり、生体内においてその吸収率曲線から推測されるとうりの凝固効果が得られるかどうかは、実際に生体眼で凝固を行なって確かめる必要があると思われる。そこで今回はメラニン色素の影響を受けない白色家兎眼において、ヘモグロビン吸収率の異なるダイ・レーザーの4種類の波長を用いて光凝固効果を観察し、その結果を踏まえて、メラニン色素をもつ有色眼と同じ4種類の波長で凝固した場合にメラニン色素とヘモグロビンが凝固巢の形成に対してどのような役割を果しているかを考察した。

黄色ダイ・レーザー(波長577nm)では凝固30分後および1週後ともに、白色眼と有色眼との凝固効果に形態学的に顕著な差はなかった。黄色ダイ・レーザーは酸化ヘモグロビン、還元ヘモグロビンの両方によく吸収されるといわれる⁵⁾ことから、白色眼ではレーザー光が主に脈絡膜血管とくに脈絡膜毛細血管内のヘモグロビンに吸収されて熱を発生したものと推測される。脈絡膜細動静脈内のヘモグロビンによる吸収も考えられるが、その血流速度や今回得られた結果において脈絡膜の凝固の程度が強くないことを考えると、やはりレーザー光は脈絡膜毛細血管で吸収されたものと思われた。したがって波長577nmのレーザー光は脈絡膜毛細血管内のヘモグロビンに十分吸収され、白色眼でメ

ラニン色素がなくても有色眼における凝固とほぼ同様の効果を発現できることがわかった。このことから有色眼における凝固では眼底に到達したレーザー光は網膜色素上皮細胞のメラニン色素に吸収されて凝固効果を発現するのであろうが、吸収されずに残った光は脈絡膜毛細血管内のヘモグロビンに十分吸収されうると思われた。

橙色ダイ・レーザー(波長590nm)で白色眼を凝固した場合、今回の凝固条件(500 μ m, 0.2sec, 100mW)では網膜外層と脈絡膜毛細血管層に凝固をおこなえた。しかしこの白色眼における凝固程度は有色眼におけるものより軽く、また白色眼での黄色ダイ・レーザーによる凝固程度と比べても軽かった。このことは橙色ダイ・レーザーの酸化および還元ヘモグロビンに対する吸収率が黄色ダイ・レーザーより低い⁵⁾ためと思われた。

以上、577, 590nm ダイ・レーザーにおいて今回得られた結果は、報告されている吸収率曲線から推測される効果と矛盾なく一致するように思えた。正常眼における光凝固効果はメラニン色素の影響が主で、ヘモグロビンの影響は少ないと言われ⁶⁾、網膜色素上皮細胞のメラニンを透過した一部のレーザー光のみが脈絡膜毛細血管のヘモグロビンに吸収されるにすぎない。しかしメラニン色素の存在しない状態では、ヘモグロビンがメラニン色素の代わりにレーザー光の吸収物質として働き、凝固巢形成ができることが確認された。

橙赤色ダイ・レーザー(波長610nm)では、白色眼において有色眼と同じ凝固条件では、光頭で認められる程度の明らかな凝固斑は得られなかった。そこで凝固径・凝固時間はそのままにして凝固強度を上昇させたが、光凝固施行時の細隙灯顕微鏡下に凝固斑は認められなかった。しかし凝固径は同じで、凝固時間を0.5sec.または1.0sec.にし、さらに凝固強度を上昇させると明らかな凝固斑が認められ、これを光顕的に観察すると明確な形態学的変化が得られた。赤色ダイ・レーザー(波長630nm)でも同様に有色眼と同じ凝固条件では白色眼を凝固できず、凝固時間を1.0sec.または2.0sec.にし、さらに凝固強度を上昇させると凝固斑が得られた。しかし今回の凝固条件では強度凝固を行っても、網脈絡膜の形態学的変化は有色眼における弱度凝固での変化より弱いものであった。

ところで橙赤色、赤色ダイ・レーザーによる白色眼凝固では、レーザー光は実際にどの物質に吸収されるのであろうか。白色眼強度凝固でみられた変化は有色

眼や白色眼黄色ダイ・レーザー凝固の場合と同様に、網膜色素上皮細胞、脈絡膜毛細血管の障害がもっとも顕著であったことより、やはりレーザー光の吸収部位が網膜色素上皮細胞、脈絡膜毛細血管附近であることが推測され、まずは脈絡膜毛細血管内のヘモグロビンが考えられる。そこでヘモグロビンが主たる光吸収物質になるとして、凝固に際したエネルギー量を、照射面積が一定であるから、

$$\text{幅射エネルギー (mJ)} = \text{凝固強度 (mW)} \times \text{凝固時間 (sec.)}$$

のように計算し¹²⁾、橙赤色、赤色ダイ・レーザーによる白色眼凝固に要したエネルギー量を黄色ダイ・レーザーでのエネルギー量と比較してみる。黄色ダイ・レーザーによる白色眼凝固の際のエネルギー量は100mW \times 0.2sec=20mJで、これに対し1週後に眼球摘出した例において白色眼では、橙赤色(610nm)ダイ・レーザーで280mW \times 0.5sec.=140mJ、赤色(630nm)ダイ・レーザーで600mW \times 2.0sec.=1200mJのエネルギーを要した。これらは黄色ダイ・レーザーの場合の7倍と60倍にあたり、しかもこのエネルギー量でも形態学的変化は黄色ダイ・レーザーの場合より弱かった。このような結果から610, 630nm ダイ・レーザーはすでに報告されている吸収率曲線⁵⁾から考えられるよりも、さらにヘモグロビンに吸収されにくいようにみえる。ただし、ここで述べた強度凝固の各条件は、あくまでも結果の項で提示したごとく眼底に白斑を生じる検眼鏡所見によるものであり、橙赤色、赤色ダイ・レーザーで黄色ダイ・レーザーと同様の凝固効果を得るための条件を決定しようとしたものではない。

ではなぜ今回得られた結果では橙赤色(610nm)、赤色(630nm)ダイ・レーザーのヘモグロビン吸収が既報の吸収率から推測されるより小さかったのであろうか。そこでまずある物質へのレーザーの吸収率に影響を与える要因を考えてみる。生体組織内のレーザービームの透過方向をxとすると、距離にxにおける光強度Iは、入射表面の強度をI₀、減衰係数を γ とする

$$I = I_0 \exp(-\gamma x)$$

となる。減衰係数 γ は吸収係数 α と散乱係数 β とする

$$\gamma = \alpha + \beta$$

となり、

$$I = I_0 \exp\{-(\alpha + \beta)x\}$$

従って、厚さxの物質中をレーザーが透過した際の吸

収率を R (%) とすると,

$$R/100 = (I_0 - I)/I_0$$

$$1 - I/I_0$$

$$= 1 - \exp\{-(\alpha + \beta)x\}$$

となる。つまり吸収率は厚さ x に影響され、 x が小さくなれば吸収率は小さくなる。これまでに報告されているヘモグロビンに対する吸収率曲線、例えば F.A.L'Esperance のもの⁵⁾ではヘモグロビン層の厚さを $100 \mu\text{m}$ として実測されたものである。ところが今回の実験でレーザー光が脈絡膜毛細血管内のヘモグロビンに吸収されたと考え、脈絡膜毛細血管内ヘモグロビン層の厚さは家兎では約 $5 \sim 7 \mu\text{m}$ ¹³⁾とされ、レーザーを吸収する物質の厚さが薄いことにより吸収率がより小さくなったと考えられた。

以上白色眼における網脈絡膜の凝固は、レーザー光がヘモグロビンに吸収されて熱にかわることでなされるものと考えたが、白色眼には前述したもの以外に、例えば網膜色素上皮細胞のリポフスチン顆粒¹⁾などが光吸収物質として働くかどうかも考えてみる必要がある。しかし白色眼の弱度凝固で明瞭な凝固巣を作成できなかった事実は、少なくともメラニンやヘモグロビンのようにレーザー吸収率のよい物質が存在しないことを示している。また赤色レーザーの強度凝固例において脈絡膜の膠原線維層に障害がみられたことから、レーザーの一部が膠原線維で吸収^{11,14)}されたことも推測された。

本論文の要旨の一部は第92回日本眼科学会総会(1988)および International Meeting on Retinal Pigment Epithelium (1988)において発表した。

稿を終えるにあたり、ご校閲を賜った大阪市立大学医学部眼科学教室松山道郎教授に深甚なる謝意を表します。

文 献

- 1) **Slincy DH**: New chromophores for ophthalmic laser surgery. *Lasers and Light in Ophthalmol* 2: 53-61, 1988.
- 2) **Tso MOM**: Retinal photocoagulation therapy: Clinical application and biological basis of therapeutic effects. *Retinal Diseases Biomedical Foundations and Clinical Management*. Pennsylvania, J.B. Lippincott Company, 247-262, 1988.
- 3) **尾花 明, 三木徳彦, 井上一紀他**: 網膜下出血に対するレーザー光凝固の実験的研究. 第3報ダイ・レーザー光凝固による網脈絡膜変化. *日眼会誌* 92: 90-97, 1988.
- 4) **Miki T, Obana A, Inoue K, et al**: Possibility of choriocapillary occlusion under experimental subretinal hemorrhage with lasers of different wavelength. *Laser in surgery and medicine*, in press.
- 5) **L'Esperance FA Jr**: Current application of the dye laser. *Symposium on the laser in ophthalmology and glaucoma update.*, The C.V. Mosby Company, Missouri: 55-80, 1985.
- 6) **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.
- 7) **L'Esperance FA Jr**: Clinical photocoagulation with organic dye laser. A preliminary examination. *Arch Ophthalmol* 103: 1312-1316, 1985.
- 8) **Brancato R, Menchini U, Pece A, et al**: Clinical application of the tunable dye laser. *Retinal Diseases-2 Proceedings of the Retina Workshop in Florence, Italy*: 65-68, 1986.
- 9) **Angioletti LV**: 加齢性黄斑症 (Age-Related Maculopathy) におけるダイ・レーザー光凝固法. *眼紀* 38: 1670-1676, 1987.
- 10) **Mainster MA**: Wavelength selection in macular photocoagulation. *Tissue optics, thermal effects, and laser systems*. *Ophthalmology* 93: 952-958, 1986.
- 11) **Borges JM, Charles HC, Lee CM, et al**: A clinicopathologic study of dye laser photocoagulation on primate retina. *Retina* 7: 46-57, 1987.
- 12) **L'Esperance FA Jr**: *Ophthalmic Lasers Photocoagulation, Photocoagulation, and Surgery*. Second Edition., London, The CV Mosby Company: 85-112, 1983.
- 13) **Prince JH**: *The rabbit in eye research.*, Illinois, Charles C Thomas • Publisher: 144, 1964.
- 14) **菊池 真, 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, 東京, メディカル・プランニング, 56-73, 1981.