

AMCoR

Asahikawa Medical College Repository <http://amcor.asahikawa-med.ac.jp/>

日本医学写真学会雑誌 (2001.06) 39巻2号:P26～32.

共焦点レーザー走査検眼鏡(SLO)による眼底撮影の臨床的有用性第5報 増殖性糖尿病網膜症におけるレーザー波長の有効開口径

福井勝彦、磯部裕成、石子智士、五十嵐弘昌、吉田晃敏

走査型レーザー検眼鏡 (SLO) による眼底撮影による臨床的有用性 第5報
(増殖性糖尿病網膜症におけるレーザー波長の有効開口径)

福井勝彦¹⁾, 磯部裕成²⁾, 石子智士¹⁾, 五十嵐弘昌³⁾, 吉田晃敏¹⁾

- 1) 旭川医科大学眼科学講座
- 2) 旭川医科大学附属病院 遠隔医療センター
- 3) 釧路赤十字病院 眼科

Clinical Usefulness of Fundus Photography with the Confocal Scanning Laser Ophthalmoscope (SLO) V (Effective Appertures for Various Wavelengths of Proliferative Diabetic Retinopathy)

Katsuhiko Fukui¹⁾, Hironari Isobe²⁾, Satoshi ishiko MD. PhD¹⁾, Hiromasa Igarashi MD. PhD³⁾, Akitoshi Yoshida MD. PhD¹⁾

- 1) Department of Ophthalmology Asahikawa Medical College
(2-1-1 Midorigaokahigashi Asahikawa 078-8510, Japan)
- 2) Telemedicine Center Asahikawa Medical College Hospital
(2-1-1 Midorigaokahigashi Asahikawa 078-8510, Japan)
- 3) Kushiro Red Cross Hospital
(21-14 Shineimachi Kushiro 089-0032, Japan)

Abstract :

The effects of changes in wavelength and confocal open aperture of a confocal scanning laser ophthalmoscope(SLO) used for examination of cases of proliferative diabetic retinopathy on the quality of the images were investigated.It was found that images with higher resolution could be obtained by using a 633nm helium laser with an open aperture of C3(4mm) or a 780nm diode laser with an open aperture of C2(2mm).In the case of a laser with a long wavelength, an increase in the open aperture resulted in poorer resolution of images due to an increase in the indirect reflected light included in the return beam and, thus, a reduction in contrast.A the other hand, in the case of on argon laser with a short wavelength of 488nm, since the indirect reflected light from behind the retinochoroid in the return beam is limited, there was less limitation on the open aperture than there was in the case of the 633nm helium laser or the 780nm diode laser. In a confocal scanning laser ophthalmoscope, the confocal open aperture is

limited by the wavelength used. In observations using a 488nm argon laser, an aperture with a large focal depth can be used. In the case of an SLO using a confocal system, if the aperture set at the same focal point as that of the laser spot is increased, indirect reflected light from sites anterior to the focus area will increase, and this may cause a reduction in image resolution. In morphological observations using an SLO confocal system, wavelength and aperture can be selected according to the purpose, but in the case of the a laser with a long wavelength, unlike a laser with a short wavelength, an increase in aperture results in a reduction in the image resolution.

Key Words:

confocal aperture, confocal system, diabetic retinopathy, laser wavelength, SLO

I. はじめに

糖尿病網膜症は糖尿病に合併する網膜病変で、血液中の糖の代謝異常により、毛細血管瘤、網膜の浮腫、軟性白斑や出血が発生する。病変が進行すると硝子体内への出血や増殖性変化、さらに硝子体の変性収縮による網膜剥離などを引き起こし、その眼底所見から、非増殖性の単純網膜症と新生血管や増殖性変化を伴う増殖網膜症に分けられる。新生血管は血管構築が脆弱で破綻しやすく、孔硝子体膜に沿って進展し硝子体内に侵入し、硝子体の増殖性変化が進むと牽引されて断裂し、硝子体出血を引き起こし重篤な視力障害を起こす。

低輝度のレーザーを網膜上にスポット状に集光して水平-垂直方向に走査し、その反射光を高感度の検出器で捉えて画像に構築する共焦点レーザー走査検眼鏡 (SLO: scanning laser ophthalmoscope)^{1,2)}は、合焦点時のスポットと共役な位置に、共焦点開口絞りを設置することにより共焦点光学系³⁻⁹⁾が構成されている。原理的には開口径の小さい共焦点絞りでは、焦点を合わせた部位から直接的反射光を入射させて、焦点深度の浅い極めて平面的な像⁶⁾が得られる。一方、開口径を大きくすると、合焦点の前後からくる直接的反射光および間接的反射光(散乱光)も入射し、焦点深度の深い所見を観察^{7,8)}することができる。

眼球は、球状であり増殖網膜症では、発生する病態も立体的な広がりを形成し焦点深度の深い観察手段^{4,5,8)}は有用性は高いが、間接的反射光(散乱光)は解像度を低下させる。今回我々は、共焦点レーザー走査検眼鏡による眼底撮影の有用性として、三次元的な病態を形成する糖尿病網膜症の線維増殖組織に対して、波長の違う3種類のレーザー共焦点開口径の変化による画像を検討し、解像度からレーザー波長における有効開口径を検討したので報告する。

硝子体¹⁾は水晶体と網膜の間にある眼球容積の70~80%をしめる硝子体腔を満たしている透明で粘調なゲル様組織で中間透光体として眼内の光を網膜まで通過させる。硝子体の引き起こす網膜変化は古くから指摘されてきたがその構成成分は99%を水が占め透明度が高く光反帰率が低いため、被写体としてその記録は困難であった。硝子体の検査法²⁾としては、細隙灯顕微鏡 slit-lamp microscope と硝子体検査用レンズを用いて硝子体のチンダル現象を増幅させた光学断面像の観察が確立された。しかしながら、網膜に隣接する部位の硝子体ゲルは膠原線維の密度は高いものの脈絡膜からの後方散乱(choroidal glow)によりチンダル現象を捕捉することが難しく、さらに硝子体検査用レンズによる観察視野や瞳孔経から眼内に入射させる細隙灯顕微鏡スリット光の照明系と観察系軸の傾斜角や光学的切片の有効面積に制限があり、撮影^{3,4)}には熟練を要する。近年開発された走査型レーザー検眼鏡^{5,6)} (scanning laser ophthalmoscope)は、焦点面でのレーザースポットが小さく焦点深度が深いいため眼内病変の検索に有用であることが報告されており、共焦点方式^{7,14)}では間接的反射光⁸⁾を制限して画像を再構築することにより網脈絡膜からの散乱光を抑制して硝子体ゲルを直接観察^{7,9,10)}することが可能である。今回我々は眼球運動をさせ、硝子体ゲルの波動運動を起こさせることによって硝子体病変を検出する動的観察法を見いだしたので報告する。

II. 方法

1. 対象

糖尿病網膜症の疾患で硝子体内に線維性増殖が発生し眼内に三次元的病巣を形成している症例を用いた。撮影装置は、ローデNSTOCK社製の走査型レーザー検眼鏡(scanning laser ophthalmoscope)でアルゴンブルー(488nm)、ヘリウムネオン(633nm)、ダイオードレーザー(780nm)を使用し、それぞれのレーザー波長に対して開口径の異なる4種類の共焦点絞り C1 (開口径 1mm)、C2 (開口径 2mm)、C3 (開口径 4mm)、C4 (開口径 10mm) を変換させて撮影した。共焦点光学系の原理図と焦点深度、レーザーの波長特性による組織深達性、開口径に対応する網膜上の観察範囲の模式図を示す(図 1abc)。なお、SLOの写真はS-VHSビデオで記録したものを再生しモニター画面を撮影した。使用感光材料はフジフィルム社製のネオパンSSで露光条件はF5.6, 1/30秒でコダック社製D-76を用い20度7分で現像処理した。比較対照として広角撮影用のキャノン社製眼底カメラCF60-Z (Canon Tokyo, Japan) でカラー眼底撮影を行った。

III. 結果

1. カラー眼底写真

眼底カメラで撮影した所見を示す。網膜全体に汎網膜光凝固の癍痕と視神経乳頭から耳側および鼻側に走行する動静脈の血管が、白色の線維増殖組織に牽引され細小血管は蛇行し、眼底後極部は、広範囲に線維性増殖組織で被われていた (図 2)。

2. アルゴンブルー (488nm)

波長の短いアルゴンブルーで、網膜から水晶体側方向へ 1.7dipter (3dipter : 約 1mm) 焦点シフトして線維性増殖組織を観察した。C1 (1mm) の開口径では、視神経乳頭から上下方向に広がる線維性増殖組織が捉えられたが、黄斑部領域からの情報は制限されていた。C2 (2mm) および C3 (4mm) の開口径では、口径が大きくなるにしたがって黄斑部の増殖膜の情報も明瞭になり、C3 (4mm) の開口径では、最もコントラストの高い画像として捉えられた。一方、最大の C4 (10mm) の開口径では、C3 (4mm) より解像度は、やや低下するものの線維性増殖組織の所見も明瞭であり、後方の視神経乳頭の所見も観察できた (図 3)。

3. ヘリウムネオンレーザー (633nm)

アルゴンブルーと同じ焦点シフトの位置で、網膜の深層から脈絡膜にかけての画像の観察に適しているヘリウムネオンでは、C1 (1mm) および C2 (2mm) の開口径で後方の視神経乳頭が観察できた。C3 (4mm) の開口径では、視神経乳頭所見や線維性増殖組織が最も明瞭に観察できた。一方、最大の C4 (10mm) の開口径では、さらに焦点深度が深くなり、視神経乳頭の全体像が明瞭に観察できたが、散乱光の入射が増え線維性増殖組織の所見が不明瞭となり解像度が低下した (図 4)。

4. ダイオードレーザー (780nm)

組織深達性深く脈絡膜の深層まで波長が透過ダイオードでは、C1 (1mm) から網膜層および視神経乳頭内の形態や血管の走行が観察できた。線維性増殖組織は、脈絡膜深層からの後方散乱による間接法で、黒い陰影として捉えられた。C2 (2mm) の開口径では、線維性増殖組織のコントラストも高く、後方の網膜所見も明瞭に捉えられた。一方、C3 (4mm) の開口径では、散乱光が増加し、網膜表層および線維性増殖組織の解像度が低下した。最大の C4 (10mm) の開口径では、線維性増殖組織の観察は困難であった (図 5)。

IV. 考察

レーザーを応用した眼底観察装置は、従来からの眼底カメラで捉えられたが像よりコントラストが明瞭に描出され、さらに新たな情報も明らかにされつつ

あるが、各疾患に対する有用性や応用例が確立されているとは言えない。その原意として、テレビモニターで表示される画像は走査線数 525 本で、毎秒 30 フレームでリアルタイムに鮮明に動的観察できるが、プリントされた静止画像では解像力が低下^{3,4)}する。

硝子体の観察法^{4,7,9)}として、後部硝子体剥離⁹⁾のある疾患では、波長の短いアルゴンレーザーを用い眼球運動により網膜から剥離した後部硝子体膜を波動させた観察が有用であるが、増殖性糖尿病網膜症では、新生血管は、後部硝子体剥離例では硝子体に進入せず、後部硝子体が未剥離の症例で、硝子体に進入し増殖変化を増悪する。網膜から剥離していない後部硝子体膜に癒着している線維性増殖組織は、眼球運動でも波動は制限され網膜の前方に三次元的に発生する。このような疾患の把握には、より焦点深度の深い観察手段が必要とされている。共焦点レーザー走査検眼鏡では、共焦点の開口径によって焦点深度の深い検索が可能と報告されているが、波長の異なるレーザーに対して、開口径の変換による画像の評価を件とした報告はされていない。

今回我々は、糖尿病網膜症で発生した線維性増殖組織を共焦点開口径を変換させて画像を検討した結果、組織深達性の優れた長波長のレーザーでは、後方の視神経乳頭や網膜表層の把握が明瞭であった。しかし、開口径を大きくしていくと散乱光が増加し、633nm のヘリウムネオンでは C3 (開口径 4mm)、780nm のダイオードでは C2 (開口径 2mm) が限界で、それ以上広い開口径での画像はコントラストが下がり解像度が極端に低下した。一方、網膜の表層の観察に優れた短波長の 488nm のアルゴンで開口径を変化させた結果、最小径 (開口径 1mm) では、検出器に取り込まれる反射光が少なく画像情報は制限されるものの、C3 (開口径 4mm) から C4 (開口径 10mm) と開口径を拡大するにしたがって情報量が増加し、C3 (開口径 4mm) で最も良好な画像情報が得られた。また、最大径の C4 (開口径 10mm) でも散乱光の影響は少なく、線維性増殖組織の把握も十分可能であり、ヘリウムネオンやダイオードに比較して開口径に制限はなかった。これらのことより、共焦点光学系の装置では、網膜面より前方に発生する線維性増殖組織のような三次元的病巣の観察には、開口径は、各々の波長に同一に対応するのではなく、波長により制限があることがわかった。

その理由の一つとして、波長特性から脈絡膜の深層から後方散乱してくる波長の長いレーザーでは、開口径を大きくすると合焦点面の前方からの散乱光も入射し、画像解像度から開口径を小さくしなければならなかった。反面、短波長のアルゴンブルーでは、網膜の表層からの後方散乱を捉えている。

二つ目の理由として、直径 10mm 程度の平行光束を角膜から眼内に入射すると、光学的特性から眼底では、1/10 の直径 1mm に集光する。本装置では、眼底からの帰還ビームは、網膜と共役点である共焦点開口部で制限され、共焦点開

口絞りの直径の 1/10 が、観察できる網膜の範囲^{1,2)}である。画角 40 度では合焦点領域は、 $30\mu\text{m}$ のレーザースポットで照射し、最小絞りの C1 (開口径 1mm) では、レーザースポットの約 3 倍の直径 $100\mu\text{m}$ の範囲を観察している。一方最大絞りの C4 (開口径 10mm) では、瞳孔領でのレーザービームの直径に殆ど等しい直径 1mm で、レーザースポットよりもはるかに広い範囲からの反射を観察している。共焦点とは、原理的には、焦点または焦点部を通して検出が行われるということを示しているものの、最小開口径でも $30\mu\text{m}$ のレーザースポットの範囲だけの直接的な反射光のみを捉えているのではなく、開口径が大きくなるほど合焦点の前後からの散乱光が増え、長波長レーザーでは、先に述べた波長特性による後方散乱光と相まって線維性増殖組織の画像に影響し、解像度から開口径に制限があるものと考えられる。

今回の結果から、網膜表面から水晶体側に三次元的に発生する線維性増殖組織のような病巣の観察には、解像度から短波長のアルゴンでは、開口径に制限されず焦点深度の深い観察も可能である。SLO の共焦点方式による形態学的観察には、波長特性のみならず数種類の開口径の選択が、目的によって変換できるが、波長が長いレーザーでは、短波長と異なり、開口径を大きくすることはかえって画像解像度が低下する。したがって、長波長のレーザーでは、小開口径を用い組織深達性を応用した観察法が有用である。

V. まとめ

眼内に立体病巣を形成する増殖性糖尿病網膜症の症例に対して、共焦点レーザー走査検眼鏡の波長特性と開口径の変化による画像を検討した。大開口径では、焦点深度の深い観察が可能であるが、散乱光の影響が強く、波長の長いレーザーでは、解像度がより低下した。短波長のアルゴンでは、網膜表層からの後方散乱を捉えており焦点深度の深い観察も可能である。共焦点方式による形態観察には、波長特性のみならず数種類の開口径の選択が目的によって変換できるが、波長の長いレーザーでは、短波長と異なり開口径を大きくすると画像解像度が低下する。長波長レーザーでは、小開口径を用い組織深達性を応用した観察法が有用である。

参考文献

- 1) Webb, R.H., Hughes, G.W., Delori FC ; Pomerrantzeff, O: Flyingspot TV ophthalmoscope, Applied Optics 19 : 2991-2997, 1980.
- 2) Webb, R.H., Hughes, G.W., Delori FC ; Confocal scanning laser ophthalmoscope , Applied Optics 26 : 1492-1499, 1987.

- 3) 須藤憲子, 田中隆行, 坂本道子, 大谷倫裕, 岸 章治: 走査型レーザー検眼鏡による眼底の観察, 臨床眼科 46, 763-770, 1992.
- 4) 梯 彰弘, 石子智士, 今野 優, 門 正則, 秋葉 純, 吉田晃敏: 走査レーザー検眼鏡を使用した硝子体ビデオグラフィ, 日本眼科学会雑誌, Vol.99, No.7, 819-823, 1995.
- 5) 山本和則: 特殊 SLO と眼科臨床, SLO と硝子体変化, 眼科, 39, 161-168, 1997.
- 6) 福井勝彦, 加藤祐司, 五十嵐弘昌, 磯部裕成, 吉田晃敏: 共焦点レーザー走査検眼鏡 (SLO) による眼底撮影の有用性 (1) 形態的検索, 日本医学写真学会雑誌, Vol.37, No.3, 119-126, 1999.
- 7) 福井勝彦, 加藤祐司, 五十嵐弘昌, 吉田晃敏, 磯部裕成: 共焦点レーザー走査検眼鏡 (SLO) による眼底撮影の有用性 第2報, 間接光による形態的検索, 日本医学写真学会雑誌, Vol.38, No.1, 1-9, 2000.
- 8) 福井勝彦, 五十嵐弘昌, 磯部裕成, 吉田晃敏: 共焦点レーザー走査検眼鏡 (SLO) による眼底撮影の臨床的有用性 第3報 (黄斑部網膜上膜形成の観察), 日本医学写真学会雑誌, Vol.38, No.2, 29-35, 2000.
- 9) 福井勝彦, 石子智士, 五十嵐弘昌, 磯部裕成, 吉田晃敏: 共焦点レーザー走査検眼鏡 (SLO) による眼底撮影の臨床的有用性 第4報 硝子体病変の動的観察, 日本医学写真学会雑誌, Vol.38, No.3, 62-69, 2000.

<図説>

図 1a.

(左): レーザーを網膜上に集光し高速で走査し画像を再構築する。焦点を合わせたスポットと共役な位置に共焦点開口部を設置し共焦点光学系が構成されている。(中): 小開口径は焦点深度 (↑) が浅い。(右): 大開口径は小開口径は焦点深度 (↑) が深い。

図 1b. 3種類のレーザーの波長特性 (画角 40 度、レーザースポット 30 μm)

長波長のレーザーでは合焦点部位より後方からの散乱光も検出器に取り込まれる。

図 1c. 開口径に対する合焦点部の観察範囲 (画角 40 度、レーザースポット 30 μm)

C1 (開口径 1mm) 100 μm、C2 (開口径 2mm) 200 μm、C3 (開口径 4mm) 400

μm 、C4（開口径 10mm） $1000\mu\text{m}$ と開口径の 1/10 の範囲を観察している。

図 2. 眼底カメラによるカラー眼底写真

血管は線維増殖組織に牽引され蛇行し後極部は、広範囲に増殖線維膜（矢印）で被われている。

図 3. アルゴンブルー（488nm）a:C1（開口径 1mm）、b : C2（開口径 2mm）、c : C3（開口径 4mm）、d : C4（開口径 10mm）

C : C3（開口径 4mm）が最もコントラストが高く明瞭に観察できた。b : C2（開口径 2mm）もしくは d : C4（開口径 10mm）でも十分な情報が得られる。

図 4. ヘリウムネオン（633nm）（488nm）a:C1（開口径 1mm）、b : C2（開口径 2mm）、c : C3（開口径 4mm）、d : C4（開口径 10mm）

線維増殖組織の観察所見は、アルゴンより低下するが C : C3（開口径 4mm）が最も良好で視神経乳頭（↑）が観察できる。d : C4（開口径 10mm）では散乱光の影響で解像度が低下する。

図 5. ダイオード（780nm）（488nm）a:C1（開口径 1mm）、b : C2（開口径 2mm）、c : C3（開口径 4mm）、d : C4（開口径 10mm）

線維増殖組織は黒い陰影（↑）、視神経乳頭および血管も明瞭に観察できる。b : C2（開口径 2mm）が最も明瞭であり、c : C3（開口径 4mm）で散乱光の影響が強く解像度が低下し d : C4（開口径 10mm）では不明瞭。

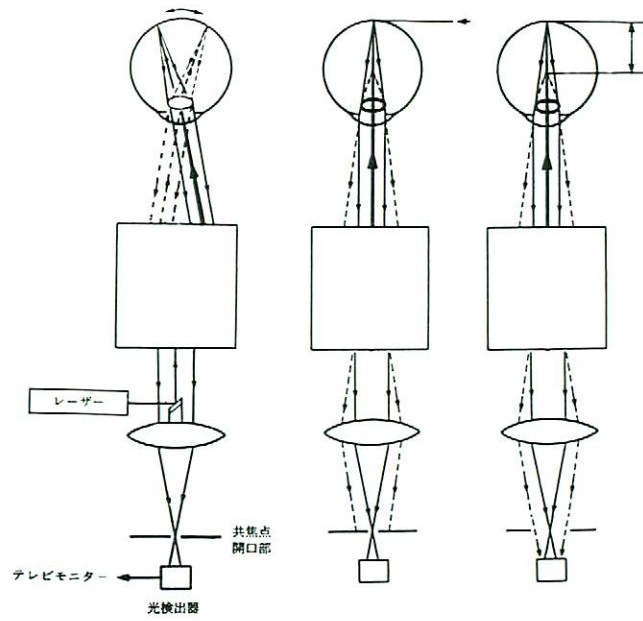


図 1 a .

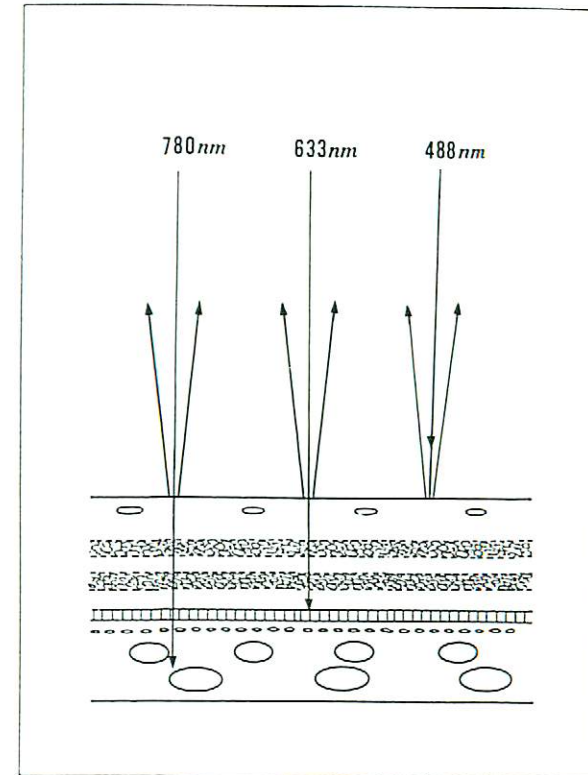


図 1 b .

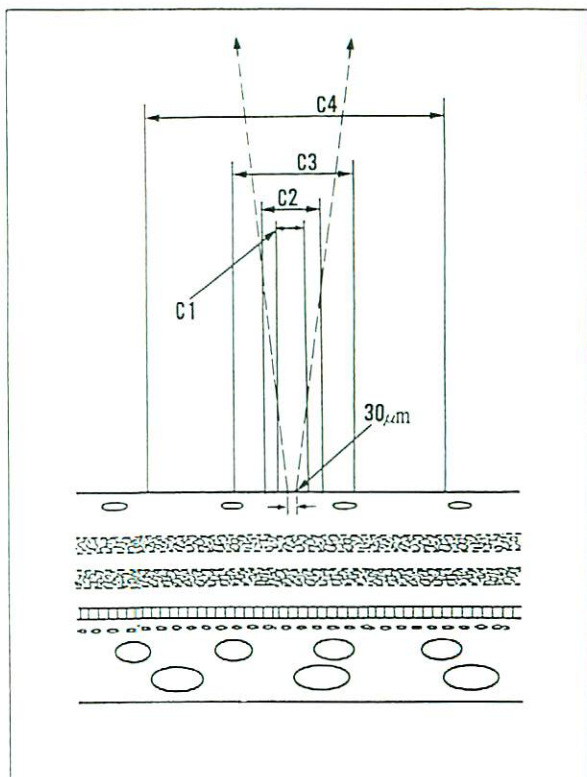


图 1 c .

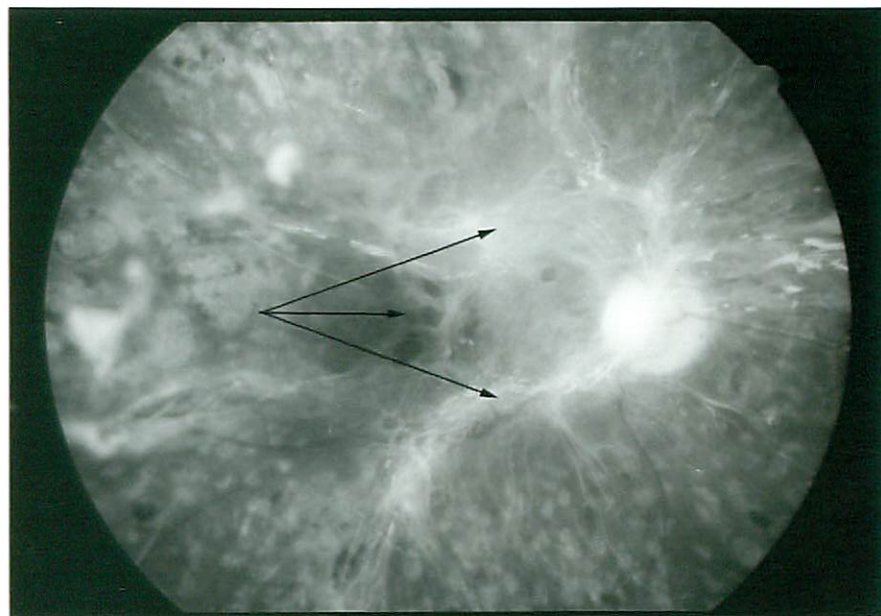
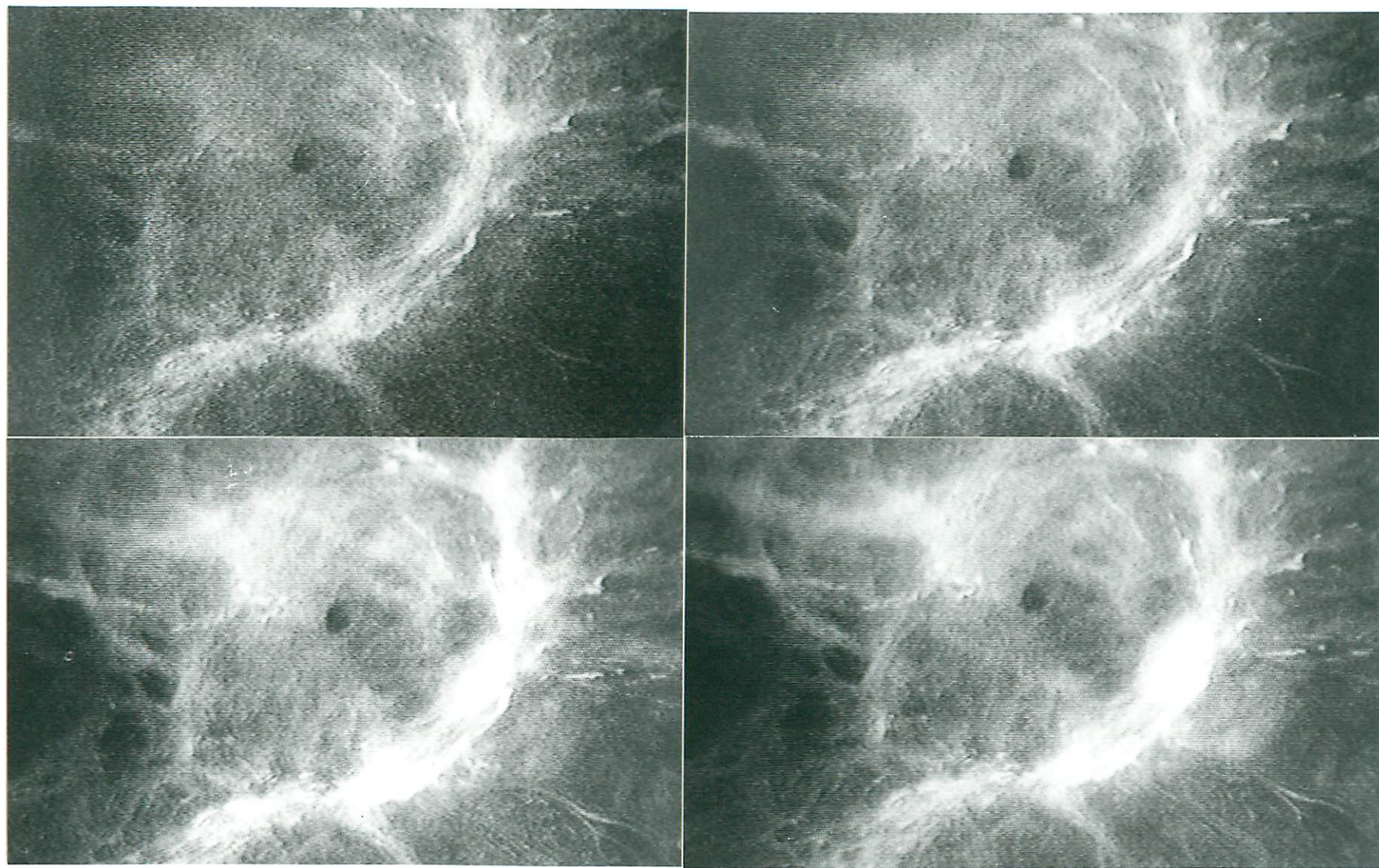
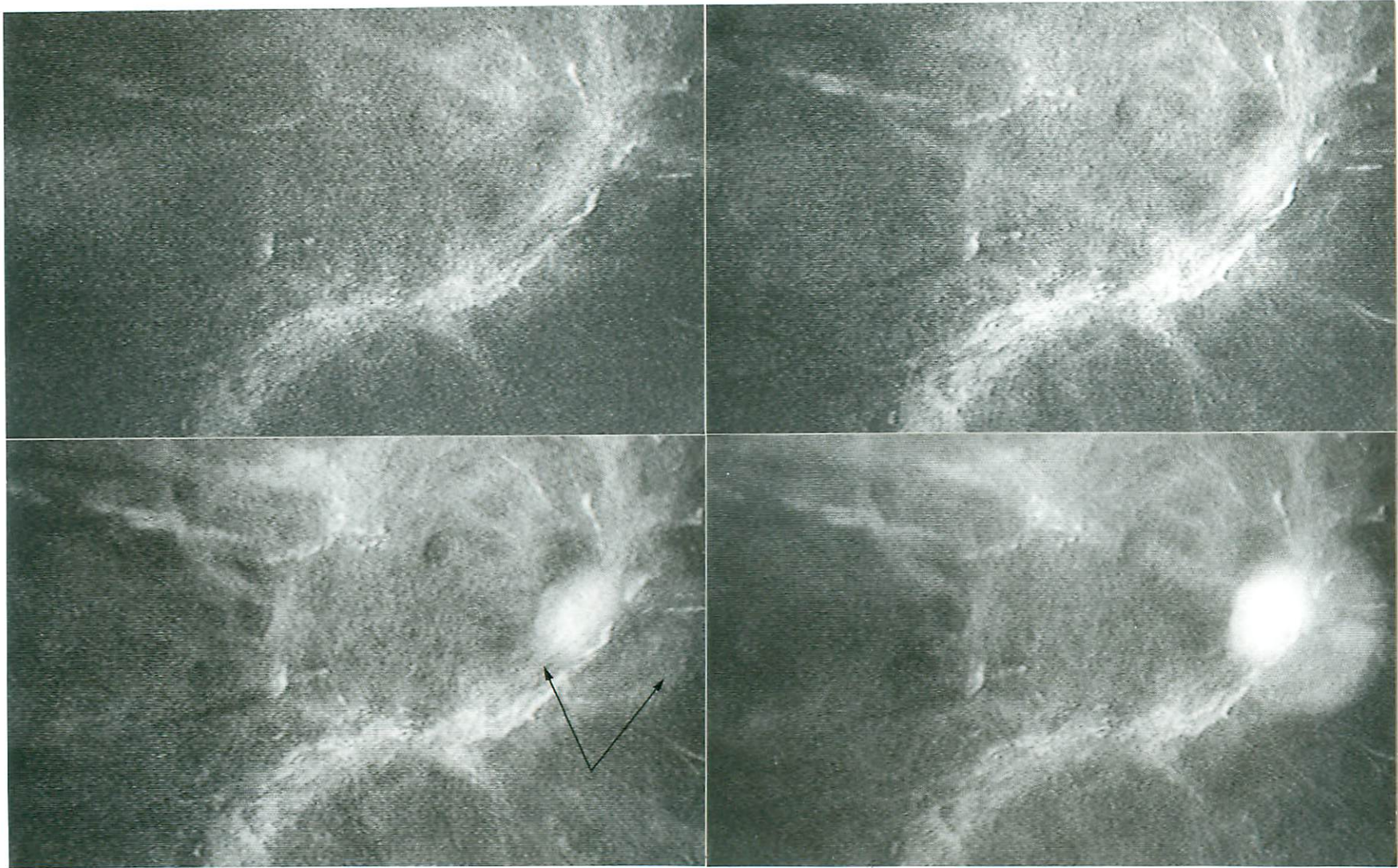


图 2 .



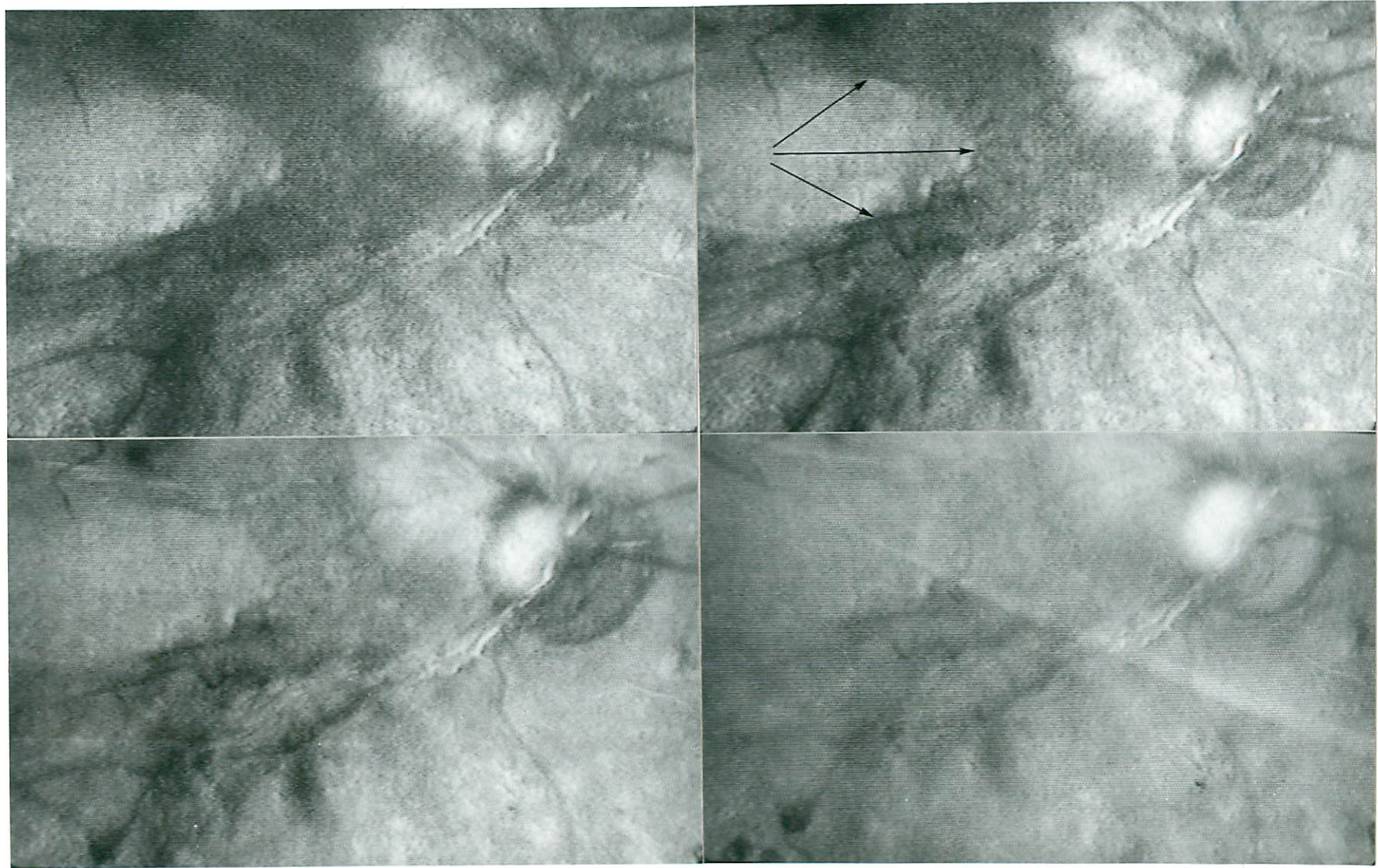
a	b
c	d

图 3.



a	b
c	d

图 4.



a	b
c	d

图 5.