

実験的上直筋拘縮

—特にその発生時期について—

松田 整二 沢 正博 竹田 眞

札幌医科大学眼科学講座 (主任 中川 喬 教授)

Experimental Contracture of Superior Rectus Muscle

— Period for Development of Contracture —

Seiji MATSUDA, Masahiro SAWA and Makoto TAKEDA

Department of Ophthalmology, Sapporo Medical College

(Chief : Prof. T. Nakagawa)

It is not rare to confirm the extraocular muscle contracture clinically in case of antagonist paralysis. Precise descriptions, however, regarding the development of the contracture of extraocular muscles have not been mentioned in previous reports. The rabbit superior rectus muscle was contracted without stretch by the antagonist. The inferior rectus muscle was extirpated. It was confirmed that the remnant of the inferior rectus muscle was attached behind the equator of the eyeball. Mild contracture of the superior rectus was observed 90 days after the operation for *in vivo* and *in vitro*. But we couldn't find out any significant morphological change by use of a light microscope. Contracture of the superior rectus muscle was observed 360 days after the operation, histologically. Hypertrophy of slow fibers and an increase of the connective tissue in the slow muscle fiber bundle were observed. In conclusion, the functional contracture occurred within 90 days after the extirpation of the antagonist, however, histological changes were demonstrated within 360 days.

(Received January 21, 1987 and accepted March 16, 1987)

Key words: Passive load, Superior rectus muscle, Muscle contracture, Rabbit, Antagonist resection

1 緒 言

外眼筋麻痺が発生すると眼球はその拮抗筋の作用方向へと偏位する。この麻痺が全く改善せず、しかも一定期間以上継続すると、麻痺筋の拮抗筋は持続的短縮の状態となる。この状態を臨床的に古くから拮抗筋拘縮と呼びならわしてきた¹⁻⁴⁾。この拮抗筋拘縮は手術治療に対し大きな影響を及ぼすため、この拘縮の発生の有無を適確に把握する必要があり forced duction test の有用性、必要性が報告されている⁵⁻¹²⁾。また、この forced duction test の定量化もなされており¹³⁻²⁸⁾、拘縮筋の受動的伸長張力曲線の著明な伸長不良も報告されている。しかし拘縮の発生には比較的長期間一定の状態が必要とされるのみで^{3,5)}、その発生時期、発生要因などについては不明のままである。

一方、病理学的には筋線維の fibrosis を認めたとする報告²⁹⁾があるのみで発生段階での報告はない。我々はウサギ下直筋を切除し同側上直筋を持続的短縮状態におき、これを拮抗筋拘縮のモデルとし、受動的張力測定及び組織学的方法を用い拘縮の発生時期について検討したので報告する。

2 実験方法

2.1 対象

成熟白色家兎(体重 2~3 kg) 32羽を使用した。内訳は 2羽を予備実験群、10羽を対照群、20羽を実験群とした。実験群はさらに以下の3群に分けられた。すなわち下直筋切除後約 90日目に全身麻酔下に生体内で受動的張力発生を測定した後、4日以内に摘出筋標本についてその受動的張力及び強縮を検討した5羽、術後

150 日目に摘出筋標本につき受動的張力及び強縮を検討した 10 羽, 並びに術後一年間飼育し組織学的検討のみをした 5 羽である。

対照群は手術操作の影響を考慮し下直筋部の結膜の剝離及び再付着を施行した。同手術後約 60 日間ケージ内で飼育した後, 摘出筋標本の受動的張力及び強縮を検討した。

2.2 拘縮筋の作製

実験群の下直筋切除術は, 常に左眼とし結膜を輪部にて切開剝離し下直筋を露出した。強膜附着部より 10 mm 以上後方の筋を鉗子にて掴み同筋の強膜附着部側を切除離断した。これにより新しい筋付着部は眼球赤道部より後極側になり, 下直筋は機能しない状態となった。なおこの手術操作及び以下に述べる緊張性迷路反射³⁰⁾の等尺性張力の測定及び生体内の受動的張力測定には, Ketalar® 15 mg 筋注, Fluothane®, nitrous oxide, oxygen によるマスク麻酔下 (GOF) にて行った。

2.3 予備実験

ウサギの緊張性迷路反射が全身麻酔下に抑制されるか否かを調べるため, 我々が試作した length-tension forceps を使用し全身麻酔下での上記反射による上直筋の等尺性張力発生の有無を測定した。同 forceps にて

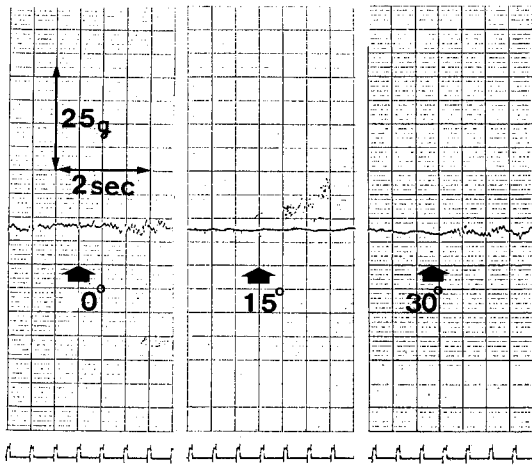


Fig. 1 Isometric tension of tonic labyrinthine reflex of rabbit under general anesthesia. Isometric tension of the left superior rectus muscle evoked by the tonic labyrinthine reflex was measured by tension forceps. The rabbit body and neck was rotated from 0° position to 30° on the longitudinal axis. The tension development of the superior rectus muscle was not observed under general anesthesia.

眼球輪部を掴み頭位を水平 0° の傾きより垂直 30° 方向へ徐々に動かし, 上直筋の等尺性張力を測定した。この結果 (Fig. 1) 全身麻酔下では, 緊張性迷路反射による上直筋の張力発生はほとんど認められなかった。このことより生体内での受動的張力の測定のさいの体位はほぼ水平とした。

2.4 生体内受動的張力測定 (Fig. 2)

生体内受動的張力の測定には五十嵐ら^{26,27)}の作製した length-tension forceps を一部改良したものを使用した。すなわち同 forceps の移動距離を正確に測定するため, 五十嵐らの磁気センサーによる移動距離測定にかえて linear image sensor (沖電気工業, OPA1024) を使用した。この forceps の先端より 10 mm に設置した点光源を一眼レフカメラを通し同カメラフィルムの位置においた上記センサーで直接的にとらえることにより実際の forceps の移動距離を比例直線的に X-Y レコーダー (理化電機工業, RY-113) に入力することができた。張力発生測定法は全て五十嵐ら^{26,27)}の方法に従った。この張力測定の対照群は同一ウサギの手術未施行眼すなわち右眼を選んだ。また calibration は各測定毎に行った。

2.5 筋標本の受動的張力及び強縮 (Fig. 3)

筋標本の作製は竹田ら³¹⁾の方法に従い行った。但し筋標本は whole muscle とした。作製された筋標本を Barmack³²⁾の方法を応用し 36°C の Krebs Ringer 液変法 (同液の磷酸緩衝液を Tris-HCl 緩衝液に置換した

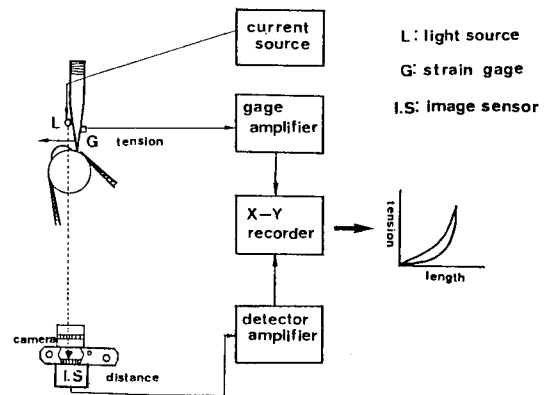


Fig. 2 Block diagram of the length-tension forceps and method.

The eyeball is grasped and rotated at the limbus by the forceps with an attached light source and strain gage.

Then the distance is calculated by the image sensor and the passive load was measured by the strain gage under general anesthesia.

Both data are recorded by the X-Y recorder.

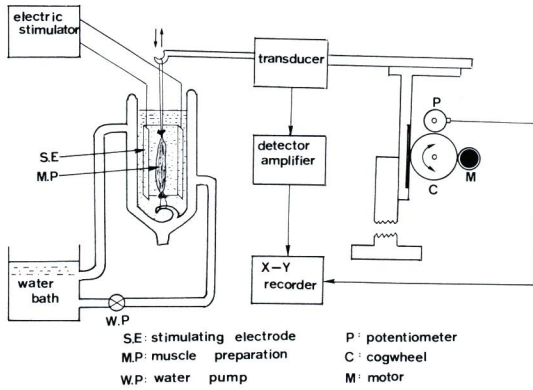


Fig. 3 Block diagram of the apparatus for measurement of length-tension curve and tetanus. The whole muscle is stretched by the motor drive and electrically stimulated with each 1 mm of stretching. Stretching ratio is 0.3 mm for one second.

pH 7.1~7.2 としたリンゲル液)中 100%酸素通気下にて受動的張力及び、強縮性収縮を同時に記録した。受動的張力の測定にはアイソメトリックトランスデューサー(日本光電工業, TB-653T)を用い、移動距離はその距離をポテンシオメータを経て X-Y レコーダーにて記録した。筋は 0.3 mm/sec の速さでモータードライブにて伸長された。強縮は 1 mm 伸長毎に 100 Hz, 200V で 0.8 msec の pulse 幅の矩形波刺激で記録した。使用した装置は電気刺激装置(日本光電工業, SEN-1101) isolator (日本光電工業, SS-101J) 並びに白金板の massive electrode である。

2.6 組織学的検討

下直筋切除術後 150 日群 10 筋と対照筋 5 筋は 20% フォルマリン固定後、マツソントリクローム(Gomori 変法)³³⁾ 染色された。又術後 360 日群の 5 羽は、実験筋対照筋を同時に一括して摘出され(Fig. 4 参照)、同様に検討された。

2.7 統計学的処理

実測値に関する統計学的分析には t-検定を用いた。なお有意水準は 5% とした。

3 成 績

3.1 拘縮筋の作製

下直筋切除術の効果判定には緊張性迷路反射及び筋標本を利用した。すなわち覚醒下のウサギの体位を変えると上記反射により下にした眼球は上転し、上になった眼球は下転する。このことより下直筋切除術眼が上になるように体位を変え、眼球が下直筋の作用がおこ



Fig. 4 The photograph of resected left inferior rectus muscle. Note that the new insertion of the left inferior rectus muscle to the eyeball is behind the equator. Bilateral inferior oblique muscles were resected to observe the inferior rectus muscles.

らず上転したままであるか否かを、また筋標本作製時には下直筋附着部が眼球赤道部を越えているか否かを肉眼的観察及び写真に記録し判定した。この結果下直筋切除群 17 例に上記反射では下直筋の作用が認められないこと、また切除下直筋附着部が眼球赤道部より後極側にあることが確認された(Fig. 4)。残り 3 例はいずれも下直筋切除後 150 日に機械的応答のみを調べた群に属し、下直筋切除術が充分ではなく上記反射が認められた。

3.2 生体内受動的張力 (Fig. 5)

全身麻酔下での受動的張力測定の典型例を Fig. 5 に示す。伸長にさいし、過伸展の影響すなわち筋線維の断裂等をさける目的で 10 mm 以内の伸展量にとどめ、なおかつ張力にして 20 g 以上の牽引はおこなわなかった。左方の曲線は実験眼(左眼)を、右方の曲線は対照眼(右眼)を示す。この曲線は眼球を静止位より他動的に変位することにより得られる伸長相と再び元の位置に戻す際に得られる回帰相の 2 本の曲線よりなる。この伸長相は 2 つの成分よりなる。すなわち初期の比較的立ちあがりの緩やかな成分と後期の立ちあがりの急な成分よりなる。初期成分は筋及び附属結合組織を含めた弾性抵抗を、後期成分は更にそれに加え筋の弾性限界をあらわしているものと思われる。

各成分に近似直線を作製しその傾き(g/mm)にて弾性抵抗を表わすと Table 1 のごとくなる。実験眼初期成分平均 3.6 g/mm、後期成分 18 g/mm に対し対

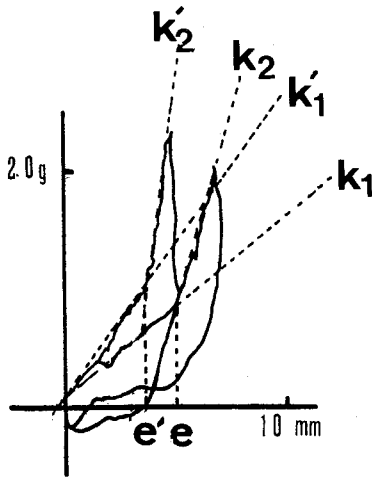


Fig. 5 Passive load under general anesthesia. The left shifted curve is of the affected eye and the right shifted curve is the control. This curve consisted of early and late phases, and both phases of the affected eye are steeper than that of the control.
 K_1 : estimated line of early phase in normal eye.
 K_2 : estimated line of late phase in normal eye.
 K'_1 : estimated line of early phase in affected eye.
 K'_2 : estimated line of late phase in affected eye.
 e : crossing point of K_1 and K_2 .
 e' : crossing point of K'_1 and K'_2 .

照眼ではそれぞれ 1.5 g/mm, 6.2 g/mm といずれの成分も実験眼の弾性抵抗が増しており, 統計学的有意差が認められた (初期成分: $p < 0.005$, 後期成分: $p < 0.01$). 次に 20 g へ達する伸長量 (mm) を実験眼と対照眼とで比較すると実験眼は静止位より平均 4.2 mm の伸長量にて 20 g に達するのに対し対照眼のそれは 6.4 mm であり統計学的有意差 ($p < 0.005$) をもって短い伸長量にて一定の値に達した.

また, Scott¹⁶⁾ と同様に各成分の近似直線の交点を利用し眼球変位量を計測すると実験眼では平均 3.9 mm, 対照眼では 5.7 mm でありこれも統計学的有意差 ($p <$

0.01) をもって実験眼の方が短かった.

3・3 筋標本の受動的張力及び強縮

筋標本の機械的応答は以下の 3 群に対し検討した. すなわち下直筋切除術後, 約 90 日目に観察した群 (Fig. 6) と同手術後約 150 日の群 (Fig. 7) 及び対照群である (Fig. 8). 筋標本の受動的張力と強縮を同時記録したのは筋標本の受動的伸長張力曲線のみでは原長を知ることができず, 得られる曲線が指数関数的になり (Fig. 9), 前述の Scott¹⁶⁾ の方法が用いられないためである. このため強縮を同時記録し, 最大強縮の得られる伸長

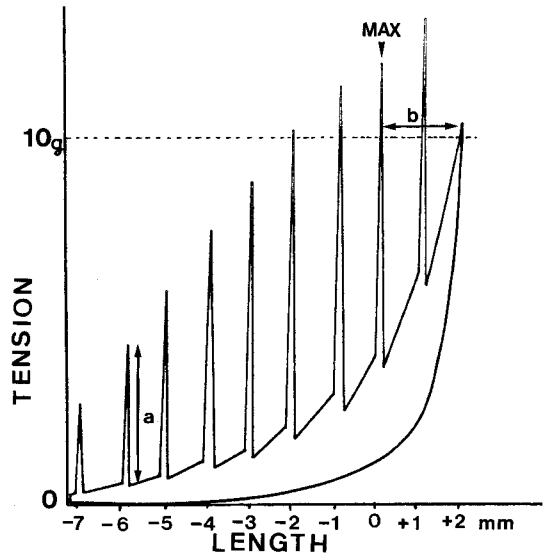


Fig. 6 Tetanus during stretching of affected muscle (90 days after the operation). The muscle was stretched at the rate of 0.3 mm for one second by the motor drive. Tetanus was elicited by 100 Hz, 200 V electrical stimulation in each 1 mm stretching.
 a : tetanus tension development.
 b : length difference between maximum tetanus and 10 g passive load development.
 MAX: maximum tetanus.
 Note the b -value is significantly shortened when compared with the normal muscle in Table 2 and Fig. 7.

Table 1 Values of element in passive load under general anesthesia.

	K_1 (g/mm)	K_2 (g/mm)	d (mm)	e (mm)
control (n=5)	1.5±0.48	6.2±0.87	6.4±0.34	5.7±0.4
affected (n=5)	* 3.6±0.87	** 18.0±7.6	*** 4.2±0.36	**** 3.9±0.2

* $p < 0.005$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.005$ **** $p < 0.01$

d : stretching length for 20 g passive load development

K_1, K_2 and e were explained in Fig. 5

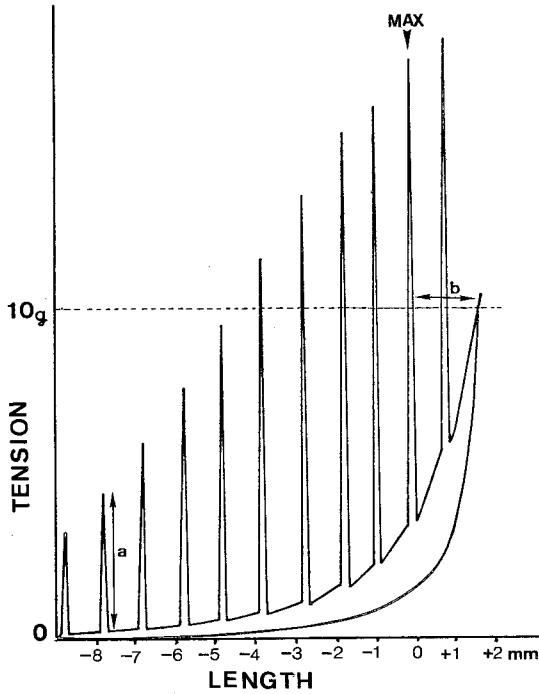


Fig. 7 Tetanus during stretching of affected muscle (postoperative 150 days). Experimental method, a, b value and MAX are the same as Fig. 6.

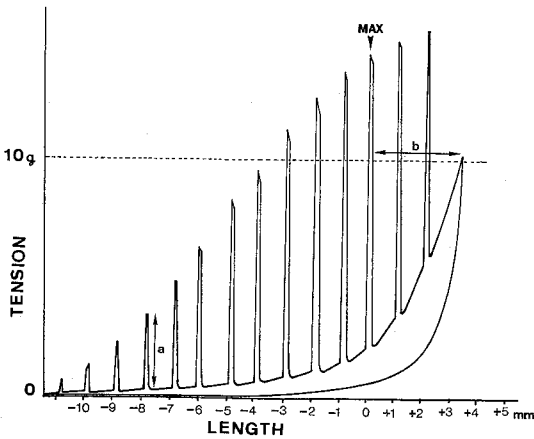


Fig. 8 Tetanus during stretching of control muscle. Experimental method, a, b and MAX are same as Fig. 6.

度を基点とし受動的張力の検討を行った。

3.3.1 術後 90 日群

筋標本を作製すると他眼の上直筋を損傷するため対照には前述の対照群を使用した。最大強縮を 100%とし

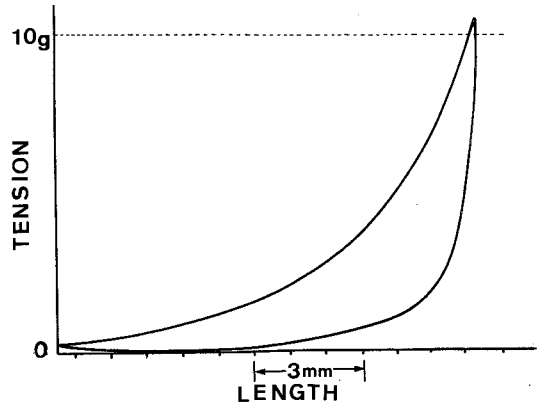


Fig. 9 Length-tension curve. The whole muscle was stretched at the rate of 0.3 mm for one second by the motor drive, and returned at the same speed. Upper curve is the stretching phase and the lower one is the relaxing phase. Difference between the two phases might be explained by the hysteresis of muscle.

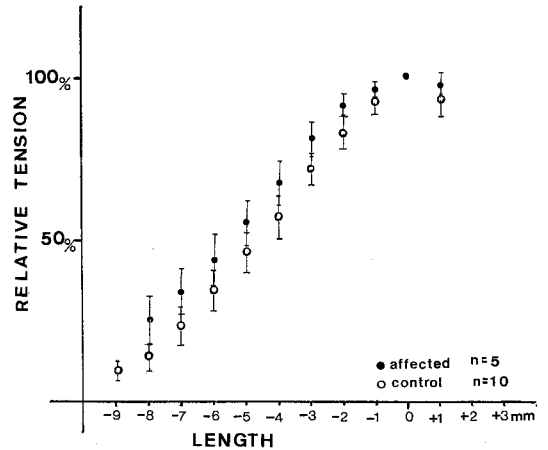


Fig. 10 Relative tensions of tetanus in the affected muscle (postoperative 90 days) and the control. Relative tensions were recorded in each muscle length. 100% : MAX (explained in Fig. 6) Note that each relative tension of tetanus in the affected muscle is higher than the normal muscle.

た各伸長度毎の強縮を Fig. 10 に示した。対照群と比較すると実験群では各伸長度にて高い収縮力を示していた。またこの収縮力の差は短い伸長度ほど著明であった。またこの収縮力の差は短い伸長度ほど著明であった。また b の値 (Fig. 6 参照) は、実験群では 1.85 ± 0.15 mm であるのに対し対照群では 2.78 ± 0.4 mm で

Table 2 The length from stretching value for MAX to that of 10 g.

	postoperative 90 days	postoperative 150 days		control
b mm		n=7		n=3
	1.85±0.15	2.08±0.16	2.75±0.18	2.78±0.4

* p<0.005 ** p<0.01

b: value is explained in Fig. 6

あった (Table 2). すなわち有意に ($p<0.005$) 短い伸長度にて 10 g へ達することが確かめられた。

3.3.2 術後 150 日群

下直筋切除が充分に行われた 7 羽と対照群を各収縮力について比較すると Fig. 11 のごとく各伸長度において実験群の方が高い収縮力を示し、この傾向は短い伸長度ほど著明であった。また b の値は (Fig. 6 参照) 実験群では 2.08 ± 0.16 mm, 対照群では 2.78 ± 0.4 mm であり、統計学的有意差 ($p<0.01$) を認めた。すなわち実験群は対照群に比べ少ない伸長度で 10 g の張力発生へと到達した。次に下直筋切除が不充分的 3 羽と対照群とを比較すると Fig. 12 のようになる。対照群に非常に近似した収縮力を示しなおかつ b の値も 2.75 mm で

あり対照群との間に有意差はなかった。

3.4 組織学的検討

術後 150 日に機械的応答を調べた筋標本のマッソントリクローム染色 (Fig. 14) では病的所見²⁹⁾ すなわち結合組織の増加、筋の萎縮並びに肥大等の著明な変化は認めなかった。しかし対照群の遅筋線維が結合組織により筋線維束に分れているのに対し実験群では筋線維束の形成は不明瞭となっていた。術後一年間飼育し眼球及び附属組織を一括して組織染色を行ったものでは (Fig. 16) 結合組織の増加に伴い遅筋線維数の減少と肥大を認めた。また筋線維束の形成はほぼ完全に消失していた。

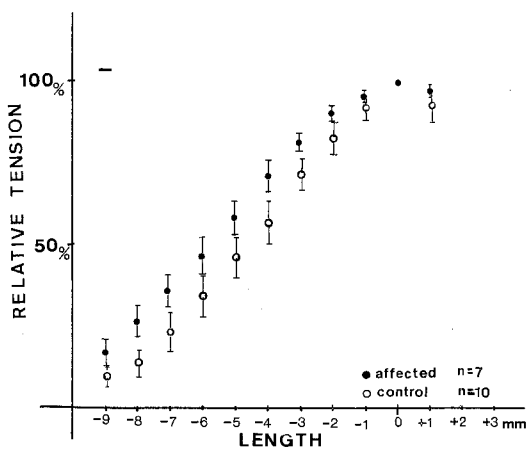


Fig. 11 Relative tension of tetanus in the affected muscle (postoperative 150 days) and the control.
affected: group with defective tonic labyrinthine reflex.
100%: MAX (explained in Fig. 6)
Note that each relative tension of tetanus in the affected group muscle is higher than the normal muscle.

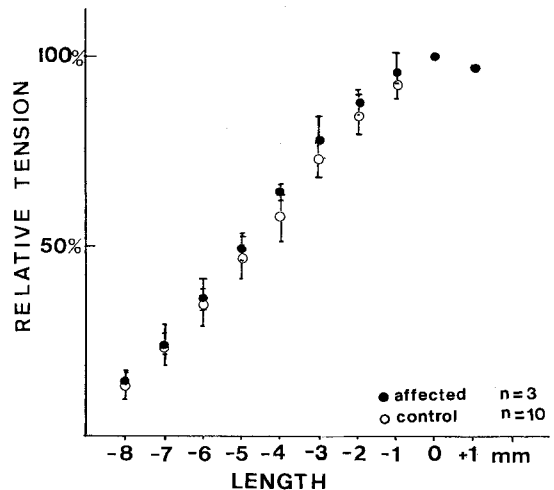


Fig. 12 Relative tension of tetanus in the incomplete affected group (postoperative 150 days) and the control.
affected: a group with remaining tonic labyrinthine reflex.
100%: MAX (explained in Fig. 6)
Note that each relative tension of tetanus is almost the same as the normal muscle.

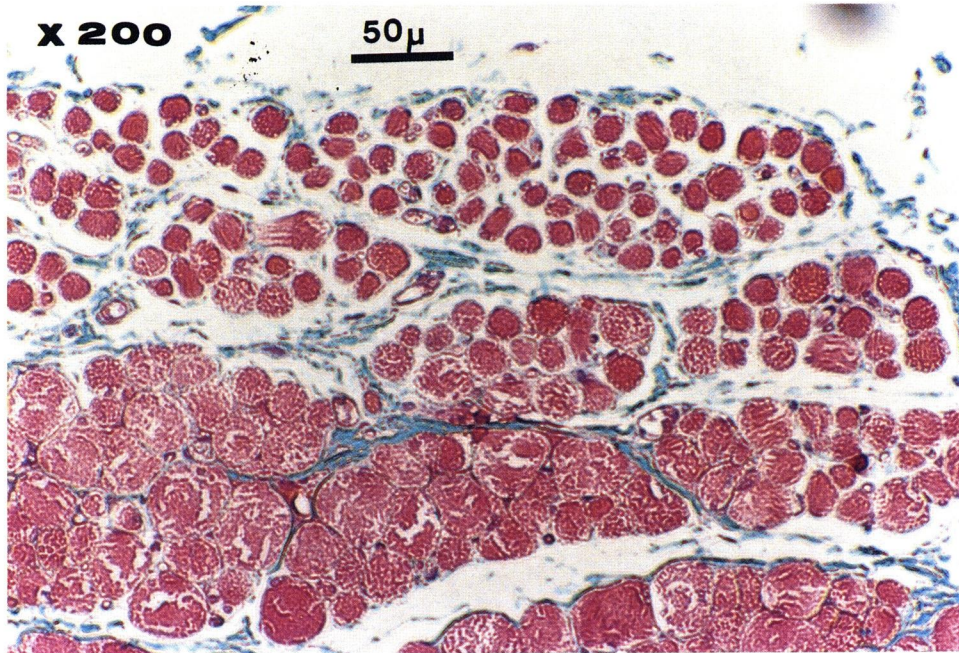


Fig. 13 Superior rectus muscle of the control. (Masson's trichrome staining)
The slow muscle fibers are enclosed by the connective tissue and forming lobular structure. $\times 200$

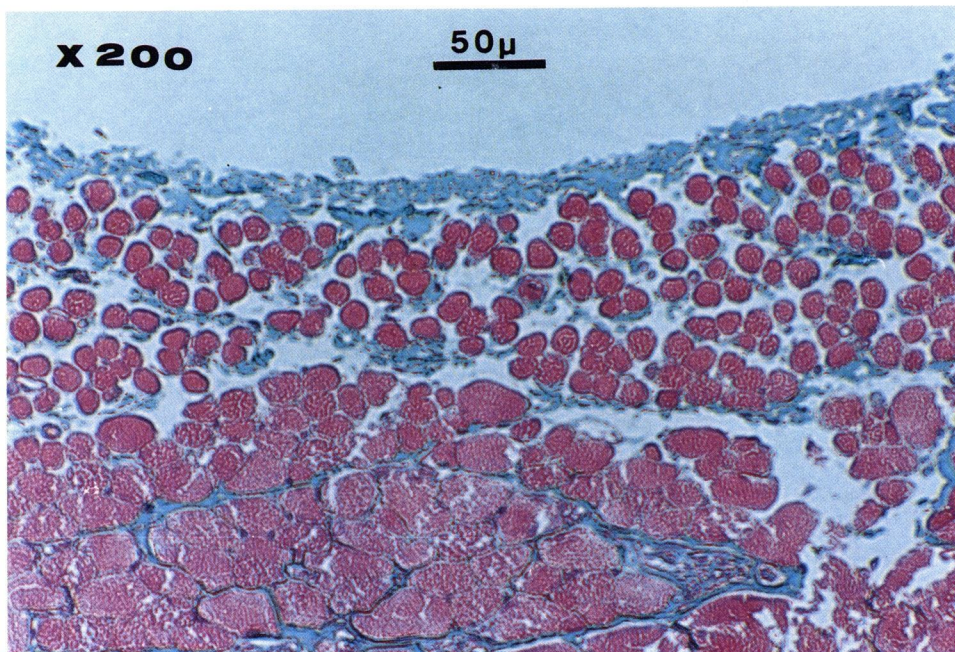


Fig. 14 Superior rectus muscle of the affected group (150 days after the operation).
There are not clear lobular structure of slow muscle fibers compared with the control (Fig. 14).
(Masson's trichrome staining) $\times 200$

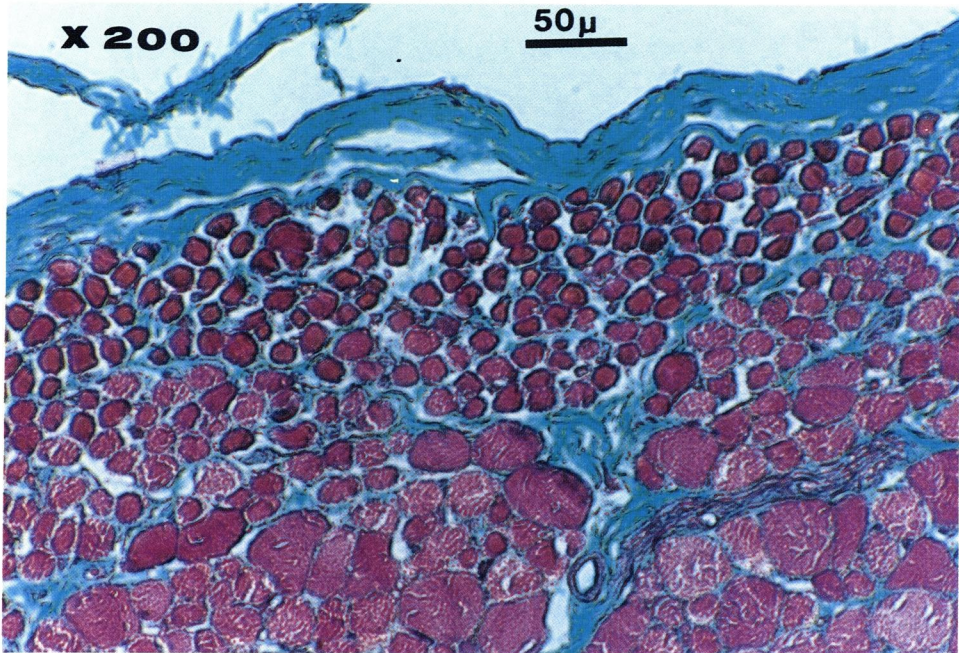


Fig. 15 The right superior rectus muscle: the control for Fig. 16.
(Masson's trichrome staining) $\times 200$

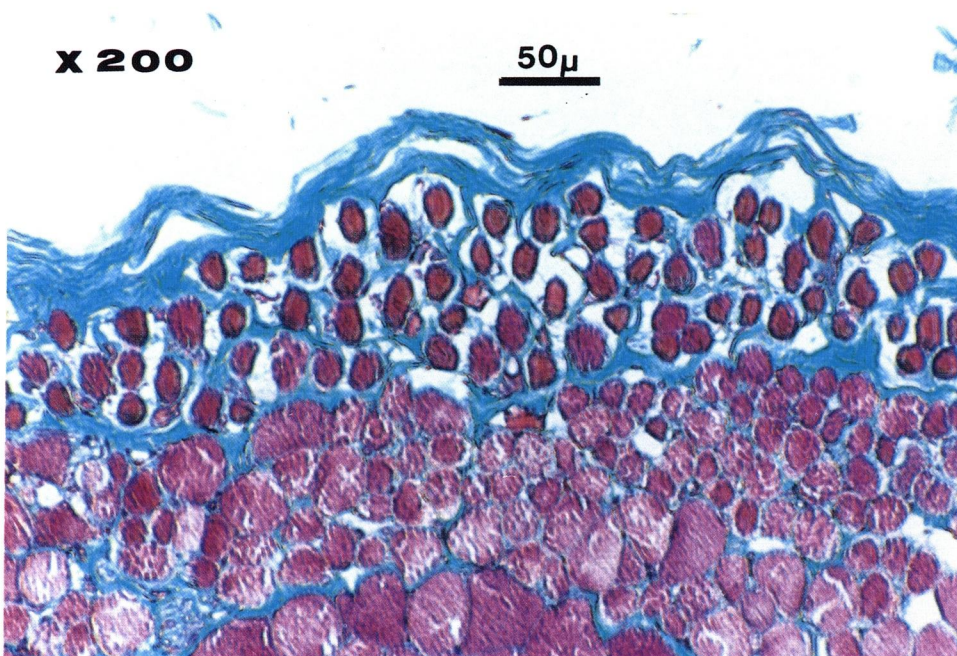


Fig. 16 The left superior rectus of the affected group (360 days after the operation).
(Masson's trichrome staining) $\times 200$
Thickening of connective tissue and a slight hypertrophy of slow muscle fibers are found.

4 考 案

眼科臨床領域での外眼筋麻痺に見られる拮抗筋の拘縮と称される状態は、第1の点は眼球が拮抗筋の作用により常に偏位した眼位にあること、第2の点はこの拮抗筋の持続的短縮と受動的伸長張力曲線の著明な伸長不良である。今回の我々の実験モデルはこの点、下直筋切除により眼球が常に上転位に偏位し緊張性迷路反射にても下転眼球運動が欠損することより上記の第1の点と良く合致する。また生体内受動的張力の測定にて実験眼すなわち上転に偏位した眼球の受動的伸長張力曲線が反対眼のそれより伸長不良を示している点で上記の第2点と良く合致し、実験モデルとして良く適合していると考えられた。この生体内受動的伸長張力曲線の測定を全身麻酔下で行った目的は、その筋の神経支配の影響を少なくするためである。このことは予備実験で全身麻酔下での緊張性迷路反射がほとんど張力を発生しないことにより示された。

下直筋切除後90日ですでに実験眼で受動的伸長不良と弾性抵抗の増大を認めたことは、拘縮が発生していることをうかがわせ、しかも神経支配の影響が少ない状態であることを加味すれば何らかの組織学的変化をともなっていると考えられた。しかし五十嵐ら²⁷⁾によれば強い拘縮が存在すると受動的伸長張力曲線が直線的に直ちに弾性限界へ到達するとしているが、このことを考えると90日の群での拘縮の程度は弱いものと考えられた。

生体内受動的張力の測定は上直筋及び結膜、テノン氏膜等の附属結合織を含めた眼窩全体の弾性を計測しているため上直筋のみの筋標本を作製し、同筋の受動的張力を測定する必要があると考えた。前述のように筋標本では筋の静止長が不明であるため真島の説³⁴⁾を応用した。すなわち張力は最大の値を100%とし筋長はこの最大張力が得られる場合を100%として描くのが普通であるとし、また筋長100%はその筋が生体内にあってしかも関節の肢位を中間位としたときの筋長、すなわち生体長とおおむね一致するとの説である。このことより我々の筋標本の静止長は最大強縮を発生する伸長度と考えた。この静止長を基点として10gへの到達距離が対照群より短いということはすなわち弾性限界に早く到達することを示し、筋の伸長不良を示しているものと考えられた。

次に各々の伸長度での強縮で、各収縮力が対照群のそれより増していることは、Hill³⁵⁾の提唱する筋の直列弾性要素ではなく収縮要素に何らかの変化があること

を推測させる。これが何であるかは未だ解明されていないがHuxley³⁶⁻³⁹⁾によるフィラメント滑走機序及び連結橋説にのっとりこの時期の拘縮を説明しようとするならば電子顕微鏡的観察が必要と考えられた。以上の成績より生体内で90日では拘縮が発生していることが確認された。

次に下直筋切除後150日の群に対し摘出筋標本の受動的張力及び強縮と組織学的検討を行った。この群ではすでに強い拘縮が発生していると考えられるため、また牽引により筋線維の断裂が予想されるため、生体内での受動的張力測定は行わなかった。この際の拘縮の判定には緊張性迷路反射を利用した。ここで注目されるのは拘縮がおこっていると思われた7羽の反応は90日の群と大差なかったが、下転眼球運動が残っている3羽の反応がFig. 12のように対照群と良く一致することである。このことより拘縮の発生には眼球の不動という条件が必要であると考えられた。

術後150日の群の組織学的検討では対照群との間に差をほとんど認めなかった。従って下直筋切除後150日での拘縮は生理学的な収縮要素に何らかの変化をきたしていると思われるが、光顕レベルでの変化すなわち結合組織の増加、筋線維の肥大や萎縮といった著明な変化は認められなかった。

このため下直筋切除をおこなったウサギを更に一年間飼育し、眼球及び附属結合織を含めた眼窩全体の筋標本を作製した。この結果眼窩側に分布する遅筋線維系⁴⁰⁻⁴³⁾に結合組織の増加と遅筋線維の肥大を認めたことは非常に興味深い。何故ならこの遅筋線維はtonic contractionの性質をもち⁴⁰⁾眼位保持機能に関与すると予想されており、常に一定の眼位をとる拘縮筋でも遅筋線維系が一番影響を受けやすいと推測されるからである。また斜視手術の一法であるFaden手術、これは眼球の衝動性運動には影響せず眼位のみをかえる手術法であるが、この手術法の病理組織標本で、遅筋線維系の軽度萎縮を認めたとする報告⁴⁴⁾と考え合わせ、遅筋線維系が眼球運動とくに眼位の変化に対する影響を受けやすいと考えられた。以上の組織学的検討より麻痺発生後約1年を経ると組織学的変化を伴った拘縮がおこると推測された。

5 結 論

- 1) ウサギの緊張性迷路反射は全身麻酔にて抑制された。
- 2) 下直筋切除術により、同側上直筋に拘縮と同様の筋の弾性変化が認められた。

- 3) この拘縮の発生は下直筋切除術後 90 日で認められた。また、この時期の筋標本も弾性抵抗の増加を認め術後 150 日も同様であった。
- 4) 筋標本の組織学的変化は、術後 150 日では著明でなく、術後一年を経た筋標本では遅筋線維群に顕著であった。
- 以上の成績より、生体内では拮抗筋拘縮の発生は3カ月で認められるが、組織学的変化を伴った拘縮の発生には一年間の期間が必要と思われた。

(稿を終えるにあたり、中川喬教授の御校閲に深謝いたします。また組織染色に御協力頂いた札幌医大中央組織研究室大谷静治氏に深謝いたします。)

文 献

- O'Connor, R.: Contracture in ocular-muscle paralysis. *Am. J. Ophthalmol.* **26**, 69-71 (1943).
- Lyle, T. K. and Cross, A. G.: Diagnosis and management of paralysis of the extrinsic ocular muscles. *Brit. J. Ophthalmol.* **35**, 511-548 (1951).
- Hugonnier, R. and Hugonnier, S. C.: Evolution of an ocular muscle paralysis, In: Véhonneau-Troutman, S.: Strabismus, heterophoria, ocular motor paralysis. 273-277 Mosby, Saint Louis (1969).
- Lyle, T. K.: Incomitant strabismus, In: Duke-Elder, S.: System of Ophthalmology. **6**, 654-735 Henry Kimpton, London (1973).
- Crone, R. A.: Paralytic squint. General considerations, In: Crone, R. A.: Diplopia. 209-282 Excerpta Medica, Amsterdam (1973).
- Scobee, R. G.: Anatomic factors in the etiology of heterotropia. *Am. J. Ophthalmol.* **31**, 781-795 (1948).
- Goldstein, J. H.: The intraoperative forced duction test. *Arch. Ophthalmol.* **72**, 647-649 (1964).
- Metz, H. S.: Restrictive factors in strabismus. *Surv. Ophthalmol.* **28**, 71-83 (1983).
- Oei, T. H., Verhagen, W. I. M. and Horsten G. P.: Forced duction test in clinical practice. *Ophthalmologica (Basel)* **186**, 87-90 (1983).
- Schilling, R. J.: The prevention of over-correction and under-correction in horizontal strabismus surgery. *Pediatr. Ophthalmol.* **3**, 38-41 (1966).
- Metz, H. S.: The diagnosis and treatment of abduction deficiencies. *Ann. Ophthalmol.* **8**, 683-693 (1976).
- Reinecke, R. D.: Surgical management of third and six cranial nerve palsies. *Int. Ophthalmol. Clin.* **25**, 139-148 (1985).
- Stephens, K. F. and Reinecke, R. D.: Quantitative forced duction. *Trans. Am. Acad. Ophthalmol. Otolaryngol.* **71**, 324-329 (1967).
- Scott, A. B.: Active force tests in lateral rectus paralysis. *Arch. Ophthalmol.* **85**, 397-404 (1971).
- Robinson, D. A., O'Meara, D. M., Scott, A. B. and Collins, C. C.: Mechanical components of human eye movements. *J. Appl. Physiol.* **26**, 548-553 (1969).
- Scott, A. B.: Extraocular muscle forces in strabismus, In: Bach-y-Rita, P. and Collins, C. C.: The Control of Eye Movements. 327-342 Academic Press, New York (1971).
- Collins, C. C., Carlson, M. R., Scott, A. B. and Jampolsky, A.: Extraocular muscle forces in normal human subjects. *Invest. Ophthalmol.* **20**, 652-664 (1981).
- Collins, C. C., O'Meara, D. M. and Scott, A. B.: Muscle tension during unrestrained human eye movements. *J. Physiol.* **245**, 351-369 (1975).
- Madroszkiewicz, M.: Oculomyodynamometry. The strength and work of extraocular muscles in squint. *Ophthalmologica* **161**, 491-498 (1970).
- Madroszkiewicz, A., Madroszkiewicz, M., Krzystkova, K. and Barkowski, S. B.: Value of oculomyodynamometry in traumatic diplopia. Direct ocular muscle force measurements. *Arch. Ophthalmol.* **100**, 445-447 (1982).
- Quéré, M. A., Péchereau, A., and Clergeau, G.: The muscle elongation test in functional squints. *Ophthalmologica (Basel)* **182**, 81-89 (1981).
- Rosenbaum, A. L. and Myer, J. H.: New instrument for the quantitative determination of passive forced traction. *Ophthalmology* **87**, 158-163 (1980).
- Metz, H. S. and Cohen, G.: Quantitative forced traction measurements in strabismus, In: Reinecke, R. D.: Strabismus. **2**, 755-766 Grune & Stratton, Inc. Orlando. (1984).
- 兼子裕高, 古賀 旭, 足立興一: Forced duction test の他覚的表示. 第1報 正常筋と2, 3の病的筋の相違. *日眼会誌* **75**, 1515-1523 (1971).
- 古賀 旭, 岩瀬文治, 兼子裕高: Forced duction test の他覚的表示. 第2報 定量化について. *日眼会誌* **76**, 520-528 (1972).
- 五十嵐保男, 竹田 眞, 沢 正博: 覚醒下における正常ヒト外眼筋の機械的特性に関する研究. *札幌医誌* **54**, 569-581 (1985).

27. 五十嵐保男, 竹田 眞, 沢 正博, 中川 喬: 眼球運動における末梢性機械因子の検討. 神経眼科 **1**, 60-67 (1984).
28. 岩瀬文治, 古賀 旭, 久山 元, 城月裕高: Forced duction testの他覚的表示. 第4報 垂直方向の張力-伸展曲線について. 日眼会誌 **78**, 469-474 (1974).
29. Adelstein, F. E. and Cuppers, C.: Probleme der operativen-Schielbehandlung. Ber. Dtsch. Ophthalmol. Ges. **69**, 580-593 (1969).
30. Hofmann, F. B.: The ocular motor reflexes, In: Duke-Elder, S.: System of Ophthalmology. **6**, 81-83, Henry Kimpton, London (1973).
31. 竹田 眞, 音無克彦, 小野弘美: ウサギ上直筋の機械的応答. 日眼会誌 **79**, 1281-1285 (1975).
32. Barmack, N. H.: Measurements of stiffness of extraocular muscles of the rabbit. J. Neurophysiol. **39**, 1009-1019 (1973).
33. Gomori, G.: A rapid one-step trichrome stain. Amer. J. Clin. Pathol. **20**, 661-664 (1950).
34. 真島英信: 筋収縮の力学. 藤森聞一編: 生理学大系 **7**, 102, 医学書院, 東京・大阪 (1966).
35. Hill, A. V.: The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. Proc. Roy. Soc. **126**, 136-195 (1938).
36. Huxley, A. F.: Muscle structure and theories of contraction. Prog. Biophys. Chem. **7**, 255-318 (1957).
37. Huxley, H. E.: The double array of filaments in cross-striated muscle. J. Biophys. Biochem. Cytol. **3**, 631-647 (1957).
38. Huxley, A. F. and Simmons, R. M.: Proposed mechanism of force generation in striated muscle. Nature **233**, 533-538 (1971).
39. Ford, L. E., Huxley, A. F. and Simmons, R. M.: The relation between stiffness and filament overlap in stimulated frog muscle fibers. J. Physiol. **311**, 219-249 (1981).
40. Kern, R.: A comparative pharmacologic-histologic study of slow and twitch fibers in the superior rectus muscle of the rabbit. Invest. Ophthalmol. **4**, 901-910 (1965).
41. Barmack, N. H.: Laminar organization of the extraocular muscles of the rabbit. Exp. Neurology **59**, 304-321 (1978).
42. Davidowitz, J., Philips, G. and Breinin, G. M.: Organization of the orbital surface layer in rabbit superior rectus. Invest. Ophthalmol. Visual Sci. **16**, 711-729 (1977).
43. 長谷川一郎, 沢 正博, 竹田 眞: ウサギ上直筋の緩筋線維の特性について. 札幌医誌 **52**, 339-350 (1983).
44. 古野久美子, 向野和雄, 石川 哲: Faden手術を中心とした斜視手術後の病理及び組織化学的研究. 日眼会誌 **90**, 561-569 (1986).

別刷請求先:

(〒060) 札幌市中央区南1条西16丁目

札幌医科大学眼科学講座 松田整二