

眼精疲労に対する低周波帯域超音波療法の試み

聖マリアンナ医科大学・眼科

太根 節直・小松 章・大庭 久貴

I はじめに

眼精疲労は眼科領域でももっとも心因性の影響を強く受けやすい疾患の一つといわれ、その治療には種々の方法と特に多くの薬剤が使用されてきたが、特に物理療法の効果や薬効の判定でも、自覚症状の改善を基にした主観的判定の報告が多くみられ、またプラセボ効果も相当に出る可能性が含まれていて、真の治験成績の判定の困難さが痛感されていた。

一方、眼精疲労を訴える患者からは、明かな単一の発生要因を探り出せないことが多く、単に視覚的要因のみでなく、全身疾患、精神的状態、および環境状況など種々の因子が原因的に複合していることが多く、本症は一の疾患ではなく、多彩な症候群として理解されるべきであると考えられる。

しかし、荻野および鈴村らは、いずれの病型の眼精疲労においても、多くはなんらかの調節機能異常が認められることを報告している。たとえば鈴村は眼精疲労様訴えのある症例を、微動調節の周波数分布測定を主な視標としてみたとき、調節機能の異常を約70%の例に見出している。このような点から、氏は調節機能は眼局所の異常のみならず全身的異常を敏感に反映するもので、眼精疲労の最大公約数的要因といえると述べている。

従来より、眼精疲労や特に調節機能改善には、まず原因の探究を行ない、眼鏡矯正、機能訓練、薬物療法、手術、体質、精神状態、環境の改善などが行なわれてきたが、超音波等の狭義の物理的療法はあまり行なわれていなかった。今回、著者らは、低周波帯域超音波治療器を使用し、主として調節機能の異常によると思われる眼精疲労（いわゆる調節性眼精疲労）の患者に対し、網膜血管径と流速脈波、ならびに眼精疲労の自覚症と調節機能に及ぼす影響を検討する機会を得たのでその結果を報告する。本

装置は音波発振数は約6～12 kHz（多数波共振複合発振）で、生体に対するマイクロマッサージ効果が期待されるものである。

II 本機の概要

本機は山本らにより最初に臨床実験に供せられたもので、電源に電池（6V-単3×4）等を使用し、接合型トランジスタに、エミッターベース抵抗、同調コイル、コンデンサーを組み合わせて、ハートレー回路を形成させ、磁歪振動子をこれに結合せしめて発生した第2高調波を利用した。磁歪振動子は材料に珪素鋼板等を用い、6 kHzの発振を探っている。一方、ハートレー発振回路は12 kHzとなるように作り、 $F = 2 \cdot f_0$ なる波形を生ぜしめたわけである。音響出力100 mW/cm²を目標として作成されている。眼接着用導子は鉄を材料としニッケル・クローム1号めっき、3 cmφの中空釣鐘型に作られている共振体である（図1）。

振動波型および投射距離は直接法で図2のごとく、ほぼ均一な波型が得られ、水中隔離5 cmでようやく波型の消失をみる。

生体、特に眼球に対する超音波の副作用はDonnによれば、1 W/cm²/5分以内であれば安全とされるので、本機

図 1 低周波帯域超音波治療器

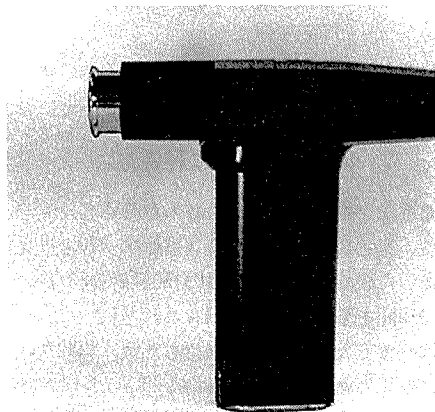
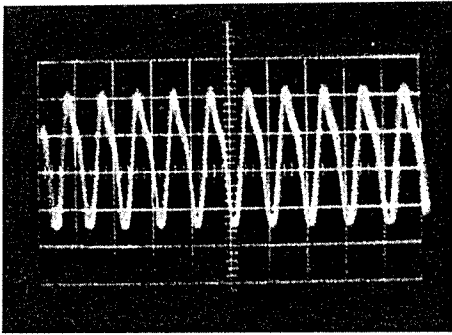


図 2 超音波振動波型



の出力範囲では通常の使用時間である10分を越えなければ危険はないと思われる。

III 対象患者の選定

1979年1月から6月までの間に、眼疲労、眼窩痛、ないし視蒙感を訴えて来院した外来患者の中より、15才以上35才以下のもの、下記の選定基準に従って調節性眼精疲労と診断されたものを選抜した。

- (1) 簡易法による眼球運動検査により、眼位、輻湊、開散その他の異常の認められないもの。
- (2) 屈折検査による眼鏡矯正後も、眼精疲労の改善されないもの。
- (3) 細隙灯顕微鏡検査および結膜の視診によって異常の認められないもの。
- (4) 眼底検査で眼底に異常のないもの。
- (5) 眼圧が20 mmHg 以下（ゴールドマン圧平眼圧計）のもの。
- (6) 糖尿病、循環器・呼吸器障碍その他の眼精疲労の原因となりうる全身疾患のないもの。
- (7) 問診その他で心因的影響が強いとは考えられないもの。

これらの患者に本試験の趣旨を説明し、協力の得られた男子18名、女子14名計32名を対象とした。

IV 検査、ならびに評価方法

本機の使用法：本機を接眼部をあらかじめアルコール綿にて清拭し、患者自身に把握させ（重量約340gで保持に便利）、閉眼した眼瞼に密着させ、10分間照射を行なった。照射回数は1日3回とし、2週間連続し、これを1クールとした。

併用薬剤は差支えないことを確認した後、実験開始3日前に投与を中止した。

検査項目は、以下のごとくである。

- 1) 自覚症状：

照射後に自覚症状の消失したものを著効、軽快したもの、あるいは自覚症状が消失したが照射を中止すると眼精疲労が再発するものを有効、不変または悪化のものを無効とした。

調節機能検査としては、つぎの2)と3)を行なった。

- 2) アコモドポリレコーダー HS・9D型による調節緊張および弛緩時間の反復測定：

遠視標は遠点に、近視標は近点より2cm 遠方の位置に置いた。この位置は同一患者においては、試験期間中一定とした。遠近視標の切り換えは5秒間隔とし、視標が明視できたとき被験者にボタンを押させ、これを10回反復して記録した。

記録されたグラフより、左右眼別に、緊張時間、弛緩時間をそれぞれ測定して平均値を出し、薬剤投与前と投与後の値を比較するとともに、全体のパターンを鈴村の判定法に従い比較検討して評価を行なった。

- 3) 石原式電動近点計による近点の連続反復測定：

左右眼別に調節近点を10回連続して測定した。鈴村の近点パターン簡易判定法に従い、10回の測定値の平均値を基線として、これより短縮あるいは延長した幅をグラフに測定順にプロットしてゆき、図形を描いた。薬剤投与前後の図形を比較して評価を行なった。

- 4) 網膜血管の口径変動と血流流速脈波の測定：

眼底写真を利用し、スライド投影面より乳頭縁部の動・静脈の口径変動率を調査した。また、超音波ドプラー法により、Ultrasonic Flow meter MUV 1101装置、およびPolygraph PM-25 を使用し、乳頭面上の網膜動脈の血流速度を測定し、その変動率を、投射前後で比較した。

V 実験成績

- 1) 自覚症状：

32例に使用した結果、著効8例（25%）、有効14例（44%）、無効10例（31%）であった。著効および有効例のうち、特に三叉神経痛を訴えるものにはその消退効果が印象的であった。

- 2) 緊張・弛緩時間の反復測定による成績：

表1に対象患者の超音波照射前後の検査成績を示す。表2に示すごとく、照射1週目および2週目の成績ではともに、照射前のそれと比べ全般的に改善の傾向を示している（U検定、危険率5%以下）。

明らかに改善の認められた症例は、1週目で7例、2週目で9例、総合で9例となっている。

また、総合判定における改善率（改善+軽度改善）は9+11/32例、62.5%、不変・悪化は12/32例、37.5%となっている。

3) 近点の反復測定による成績：

表3に示すように、1週目、2週目、総合判定のいずれにおいても、U検定で投射前の成績と比べて有意の差が認められた。

総合判定における改善率(改善+軽度改善)は、3+12/32例、46.9%、不変(または悪化)率は、17/32例、53.1%となっている。

4) 網膜血管の口径変動と血流流速脈波の測定成績：

投射前と投射後10分以内の網膜血管径変動について、眼底写真計測を行なった結果は表4に示すごとくなる。

血管径は乳頭縁、および1乳頭径離れた位置でそれぞれ投射前と比べて、動脈径、および静脈径ともに明らかな拡張を示し、それぞれU検定で有意差(危険率1%)を認めた。動静脈径拡張は検眼鏡的にも明らかに認知しうるほどであった。

また、超音波ドップラー血流計による乳頭面上の網膜中心動脈の流速脈波の計測においては、血流速度の投射前後

における変化では、特に有意の変動は認められなかった。

5) 副作用：

32症例全例において、眼科的および全身的には機能的、および器質的障害、ないし副作用を今回はまったく認めなかった。

VI 考 按

低出力超音波の眼科分野での実験例は本邦においても比較的多くみられ、樋口、河本、井上、中西、奥田らの報告がある。中西は、550 kHz 発振入力120Wattのものを用いて家兎眼に酸性フクシン注射後、血液房水柵透過率が高まることを認め、奥田は1MHz、1~5 W/cm²のものを使用して、家兎眼の第1房水、第2房水の凝固より、血液房水柵の透過性亢進を結論し、また局所加温を調べ、前房、結膜囊、硝子体、眼窩球後組織の順に温度が上昇しているといひ、各組織における熱エネルギーの転換が著明であることを立証した。このような成績は温熱作用によるもので、機械的振動作用(マイクロマッサージ作用)を眼組織に利用しようとした試みに山本らの低周波数低出力の手持超音波治療器がある。

山本らは発振周波数 12 kHz、出力100 mW/cm² 前後のやや不規則な刺激波を利用し、眼瞼上より10分間の接触投射を行なった。その成績では、基礎的には眼球壁硬性の低下、房水流出抵抗の低下、産生率の増加、網膜血管径の括

表1 対象患者の超音波投射前後の調節検査成績

	検査時点	症例数(眼数)	平均値±標準偏差	t 検定
緊張時間 (秒・アコモ ドグラム)	投射前	32例	2.14±0.62	有意差あり (危険率5%)
	投射後	(64眼)	1.86±0.78	
弛緩時間 (秒・アコモ ドグラム)	投射前	〃	2.08±1.09	有意差あり (危険率5%)
	投射後	〃	1.72±0.87	
調節近点 (cm)	投射前	〃	14.26±3.07	有意差あり (危険率5%)
	投射後	〃	12.86±3.12	

表2 超音波投射後の緊張・弛緩時間の反復測定による判定成績

検査時点	改善(症例数)	軽度改善(症例数)	不変(またはやや悪化)(症例数)	計(症例数)	>改善(%)	>軽度改善(%)	不変(またはやや悪化)>(%)
1週	7	9	16	32	21.9	28.1	50.0
2週	9	12	11	32	28.1	37.5	34.4
総合	9	11	12	32	28.1	34.4	37.5

表3 超音波投射後の近点の反復測定による判定成績

検査時点	改善(症例)	軽度改善(症例)	不変(またはやや悪化)(症例)	計(症例)	>改善(%)	>軽度改善(%)	不変(またはやや悪化)>(%)
1週	1	8	23	32	3.1	25.0	71.9
2週	2	12	18	32	6.3	37.5	56.3
総合	3	12	17	32	9.4	37.4	53.2

表4 超音波投射前後の網膜血管径の変化率

症番号	症 例	乳 頭 縁		1 乳 頭 径	
		A'/A	V'/V	A'/A	V'/V
1	K. N. 25 凸	1.24	1.16	1.38	1.22
2	Y. K. 35 凸	1.16	1.28	1.26	1.36
3	M. N. 28 凸	1.36	1.13	1.26	1.28
4	Y. K. 18 凸	1.33	1.23	1.35	1.08
5	M. S. 15 凸	1.01	1.12	1.12	1.36
6	J. K. 20 凸	0.85	0.83	1.18	0.95
7	M. M. 28 凸	0.76	0.86	1.08	1.12
8	S. T. 19 凸	1.37	1.46	1.39	1.52
9	Y. S. 32 凸	1.56	1.48	1.62	1.59
10	I. M. 34 凸	1.32	1.16	1.40	0.94
11	M. Y. 22 凸	1.52	1.31	1.42	1.33
12	O. T. 35 凸	1.18	1.22	1.26	1.32
平均 26(才)		1.22±0.06	1.19±0.04	1.31±0.02	1.26±0.04

(注) A：網膜動脈径、A'：同上超音波作用後
V：網膜静脈径、V'：同上超音波作用後

張、細菌発育の抑制、抗生物質の眼内移行の促進などを認め、臨床的にある種の亜急性、慢性眼疾患に有効なりとみとめた。さらに、山本は中心性網膜炎の有効例、偽近視を含む後天性近視の治療で屈折度の平均0.232 Dの減少、視力上昇平均0.185の成績を発表した。田中、中村は中心性網膜炎に、高野は偽近視治療で屈折度の減少について追試し、有効例を報告している。山本らはこの低周波数低出力の超音波の作用機序は超音波の多角作用にあり、いまだ十分には解明に至らないとしている。

Tanev, V. & Todorov, N. は、800 kHz, 0.2W/cm², 5分投射, 1クール15回で、高度近視の視力改善, ERGのb波の増強をみたといひ、さらに1% Hydrocortisoneの前房内移行量を3倍に増加することができ、echophnophoresisと名付けている。

Baum, G. & Greenwood, I は兎眼で実験し、出力、照射時間により、眼球組織の障害度を検討し、(1) Safe Zone (2) Zone of Reversible Damage, (3) Zone of Permanent Damage, の3区分に分け、Safe Zoneの中に治療の可能性を含ませたことは有名である。この表によれば、Christopher, H. M. の10W/cm²/2.5分よりはるかに出力制限が強く、直接組織に接着した場合、0.25W/cm²/5分、1.0W/cm²/3分を組織に障害を与えない出力の限界としている。さらに1.5~2.0W/cm²/5分以内を可逆的組織変化の域としている。今後の治療法の研究にも、このBaum, G.の成績に頼る点が大きき。

今回使用した低周波数帯域超音波治療器では12 kHz・音響出力100 mW/cm²で、10分間投射を行なったゆえに、Baumの持続超音波の眼障害の表からみてSafe Zoneの範囲内にあり、この発振条件では眼障害はなく安全と思われる。

中西は超音波の作用を各氏の実験よりつぎのごとく分類している。

(A) 生物学および生理学的作用

1. 原形質攪拌作用
2. 小粒子の位置変換
3. 細胞内物質の崩壊——変異の出現
4. 細胞の溶解——細菌破壊およびその分析
5. 活動性刺激——筋神経刺激
6. 透過性の増大——薬剤の浸透、水腫形成
7. 血液中 K/Caの減少——血液凝固の促進
8. 血清蛋白粗大側移動
9. 充血および消炎
10. 鎮痛および麻痺
11. 生殖腺に対する選択的作用
12. 発育促進

13. 心臓機能の亢進ならびに呼吸運動促進

(B) 物理化学作用

1. 分散作用
 - a. 乳濁液の生成
 - b. 霧化
 - c. 固体の分散崩壊
2. 凝集作用
3. 加熱作用
4. 酸化作用
5. 解重作用
6. 結晶形成促進作用
7. その他

これらの働きを持った超音波を眼治療面に応用するには、その深達度、加熱度、振動度、投射時間などを調整しなくてはならない。周波数が大ならば出力は強く、深達度は少なく、加熱度は高く、したがって眼組織の障害が大なるため、投射時間を十分考慮しなければならない。今回の装置の100 mW/cm², 12 kHz (波長は水中で約12 cm, 空中で3 cm)の出力ではほぼ均一な波型が得られ、G. Baumの表で、また山本らの過去における実験からみても無害なことが確認された。

今回の著者ら、および山本らの実験においても網膜血管径の拡大がみられ、ドップラー血流計測によれば網膜中心動脈の流速には有意の変動がみられなかったが、山本らによる眼底血管圧で特に動脈最低血圧値の上昇をみた成績とも考えあわせて、流量量の増加を生じたと考えてよいであろう。このような超音波による投射部位の血管拡張現象は、その温熱作用、または機械的な縦波による micromassage 作用によると考えられる。すなわち、奥田は家兎眼において、1 MHz, 5 W/cm², 10分間投射で結膜囊5.16°C, 前房5.44°C, 硝子体3.30°C, 球後組織1.01°Cの上昇をみたと言うが、しかし本機の場合には100 mW/cm²では温度上昇はあるとしても、かなり少ないと考えられる。一方、奥田は赤外線や超音波による照射で、眼組織の1~3°Cの上昇をみても網膜血管径拡張度はあまり著明でなかったとしているので、マイクロマッサージ効果の方が血管拡張に対しより強く起因するとも考えられる。同じく Fryらも機械的振動作用説をとっており、Schwan, Bell, Lehmanらの温熱作用説と対立しているが、ともかく、これらの作用を基調として多角的な生体反応の促進が考えられる。

一方、従来より眼精疲労の治療には種々の薬剤が利用されてきたが、薬効の判定も自覚症状の改善を基にした報告が多かった。鈴木、山地らは、この分野に客観的な判定方法として調節機能検査法を応用し、accommodopolyrecorderによる調節緊張・弛緩時間の反復測定、赤外線オプ

トメーターによる調節運動、および微動調節の測定、ならびに石原式近点計による調節近点反復測定などを基盤として薬効判定を行なっている。

今回、われわれの行なった眼精疲労を訴える患者に対する各種調節機能検査において、アコモダポリレコーダーによる調節時間の反復測定法は、調節緊張、弛緩の両面において、調節機能を速さの面で量的にとらえる検査法で、また近点反復測定法も同様なことが言えるが、超音波投射後にはこれらの改善が有意に認められたことは、眼内血流循環の改善を基調とし、さらに Baum や中西らの言う鎮痛、消炎、自律神経系の刺激、酵素作用促進、新陳代謝促進等の多角作用の現われと推測され、これらが毛様体の疲労回復、末梢神経の機能改善、などをもたらしたものと思われる。特に自覚症状のうち三叉神経痛の消退が顕著に認められたことは印象的であった。

今日、超音波診断法は臨床各科において飛躍的な発展を遂げつつあり、広くルーチンに日常臨床で眼科の検査法としても広く応用され始めているが、超音波の治療はなお検討の余地が残されている。副作用の発現投射量と治療有効量とが接近していることも、その一因であるが、なお、工学技術面や臨床応用面での基礎的研究の発展と改善が望まれるが、眼治療の進歩に超音波治療が安全に応用されることは、今回の実験からも十分期待しうるものと思われる。

Ⅶ 結 論

著者らは低周波数帯域超音波（周波数12 kHz、音響出力100 mW/cm²）の超音波治療器（*ソニマック*）を調節性眼精疲労と考えられる32症例に治療的投射応用を試み、つぎの結果を得た。

1) 調節性眼精疲労の自覚症状消退効果は、32症例中著効8例（25%）、有効14例（44%）、および無効10例（31%）であった。特に三叉神経痛の消退が顕著に認められた。

2) 調節機能の改善が、緊張、弛緩時間の短縮、および近点反復測定成績の向上として認められた。これらの効果が自覚症状改善に関連するものと考えられる。

3) 超音波投射後には網膜中心動・静脈の拡張が認められた。しかし、血流速度の有意の変動はみられなかった。

4) 特に忌むべき副作用をみなかった。