東医大誌　58(3) : 260～268, 2000

経尿道的前立腺蒸散術において電極形状と切除出力が組織に及ぼす影響

荒井好昭[1)]　並木一典[1)]　塩沢寛明[1)]
清水　亨[2)]

[1)]東京医科大学泌尿器科学講座
[2)]東京医科大学病院病理部

【要旨】 経尿道的前立腺蒸散術（Transurethral electrovaporization of the prostate: TVP）において，電極の形状,切除電流の出力が蒸散層，熱変性層に及ぼす影響などを検討し，蒸散効率の優れた電極形状，最適な出力などを定めることを目的に本研究を行った．

電極形状の違いによる蒸散効果の比較では，蒸散効果を示す気泡の発生は，溝付きローラー電極で多くみられ，円筒状電極では大きさが安定しなかった．ジグザグ溝付きローラー電極が大きさが最も安定した気泡を形成した．

出力及び荷重の違いによる蒸散層の比較測定では，出力が増加するに従い蒸散層も深くなった．また10 gから40 gまでの荷重に比例して蒸散層が増加し，40 gで蒸散層は最大となり，それ以上の荷重では蒸散効果は低下した．

出力の違いによる熱変性層の比較測定では，150 Wで熱変性層は最大となり，それより高出力では減少する傾向がみられた．

【結論】 溝付きローラー電極は円筒状電極に比べ蒸散効率に優れていた．電極荷重は蒸散層の深さに影響を与える因子であり，ある荷重（40 g）において最大であった．出力の増大に伴い蒸散層は増大したが，熱変性層は150 Wを境に減少した．

過度な高出力は合併症を生じる危険性がある．理想的にはジグザグ溝付きローラー電極を使用し，150 Wの出力で40 g程度の荷重でTVPを実施するのが最良である．

はじめに

前立腺肥大症（Benign Prostatic Hyperplasia: BPH）の外科的治療法は，ループ電極を用いた経尿道的前立腺切除術（Transurethral Resection of the Prostate：TURP）がいまだgold standardである[1)]．しかし，出血，TUR症候群などの合併症を伴い易いことや，手技が困難なため熟練を要することなどの問題点がある[2～5)]．そこで，minimally invasive therapyの考えから，近年になりTURPに代わる治療として，TUMT[6)]（Transurethral Microwave Thermotherapy），VLAP[7)]（Visual Laser Ablation of the Prostate），TUNA[8,9)]（Transurethral Needle Ablation of the Prostate）など様々な治療法が開発，施行されてきている．しかし安全性や手技の容易さではTURPを上回るものの，治療効果では及ばないのが現状である[4,5)]．TURPに使うループ電極に代わり，組織との接触面積を大きくし，蒸散層，熱変性層（乾燥凝固層）を厚くするローラー電極を用いた経尿道的前立腺蒸散術（Transurethral electrovaporization of the prostate: TVP）は，1995年にKaplanら[10)]により報告されて以来，その臨床上の有用性に関する報告は多い[11,12)]．

2000年2月2日受付，2000年2月11日受理
キーワード：前立腺電気蒸散術，蒸散効果，電極形状，前立腺肥大症
（別刷請求先：〒160–0023 東京都新宿区西新宿6–7–1　東京医科大学泌尿器科学講座　荒井好昭）

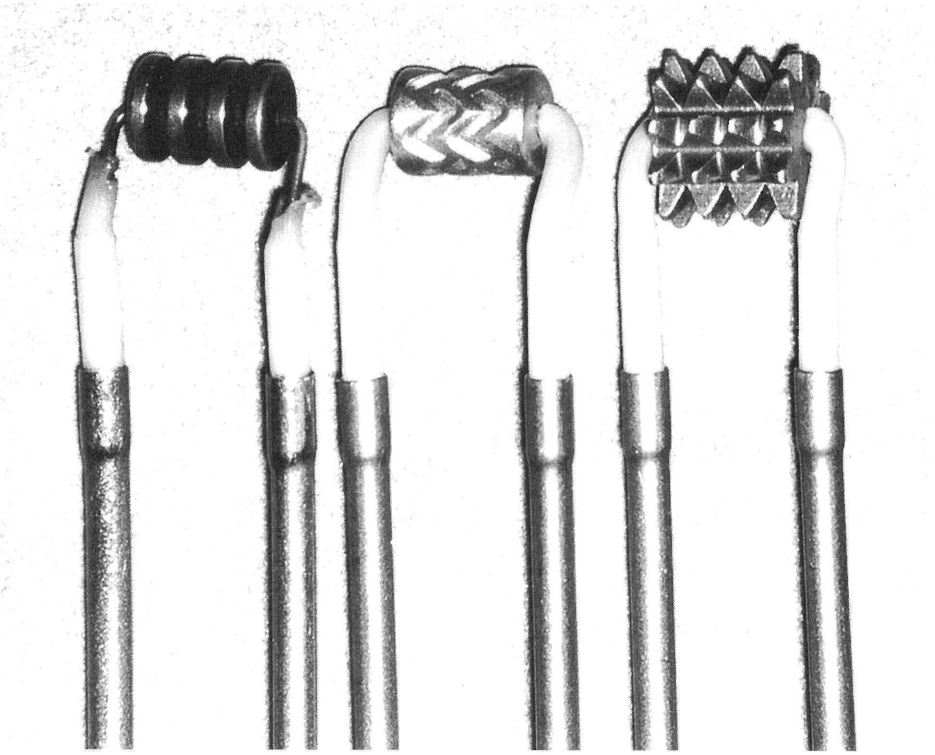


Fig. 1　Rollers tested: (from right to left); Multiple spiked roller Zigzag grooved roller Vertical grooved roller

TVPは，組織を蒸散するとともに，その下層を深く熱変性させて止血を図るものである．しかし，電極の形状や出力が組織に与える影響は，まだ十分には解明されていない[13~15]．また一般に高出力で実施するため，発生する漏れ電流量が増加することによる合併症も考慮しなければならない．

そこで，より適正で安全な治療を行うために模擬TVP実験を行い，電極の形状及び出力が組織蒸散層及び熱変性層に及ぼす影響などを検討し，蒸散効率の優れた電極，最適な出力などを定めることを目的に本研究を行った．

対象と方法

［実験1］切除面への電極荷重の測定

透明なトレーにソルビトール液［日研化学（株)］を満たし，トレーの底面に約200 gの豚精肉を固定し，全体を計量器に乗せ実験系とした．ストレート溝付きローラー電極［幅4.1 mm，直径3.0 mm，3列のストレートな溝付き，オリンパス光学（株)，Fig. 1］を用いて出力200 Wでの模擬TVPを臨床経験8年以上の3人の実験者が各5回施行し，切除面に加わる荷重を測定した．

［実験2］電極形状の違いによる蒸散効果の比較

電極の移動速度，荷重を一定に保つ実験治具（Fig. 2）を作成し，牛精肉に対し模擬TVPを行い，その組織蒸散の様子，特に気泡（air bubble）の発生状態を高感度ビデオカメラ（毎秒500コマ）で撮影し観察した．

電極はストレート溝付きローラー電極（前述，Fig. 1），ジグザグ溝付きローラー電極［幅4.0 mm，直径3.0 mm，2列のジグザグな溝付き，オリンパス光学（株)，Fig. 1］，スパイク付きローラー電極［幅4.0 mm，最大直径4.9 mm，多数のスパイク付き，オリンパス光学（株)，Fig. 1］の3種類に加え，表面平滑な円筒状ローラー電極［ϕ1，3，5 mm，オリンパス光学（株)］を用いた．

いずれも電極の移動速度は10 mm/sec，荷重は30 gで一定とし，出力は200 Wとした．

［実験3］出力，荷重の違いによる蒸散層の比較測定

実験2と同様に実験治具を用い，豚精肉に対し，ストレート溝付きローラー電極を用いて模擬TVPを行った．電極移動速度は10 mm/secで一定とし，出力は150，200，250 Wで，荷重は10，20，30，

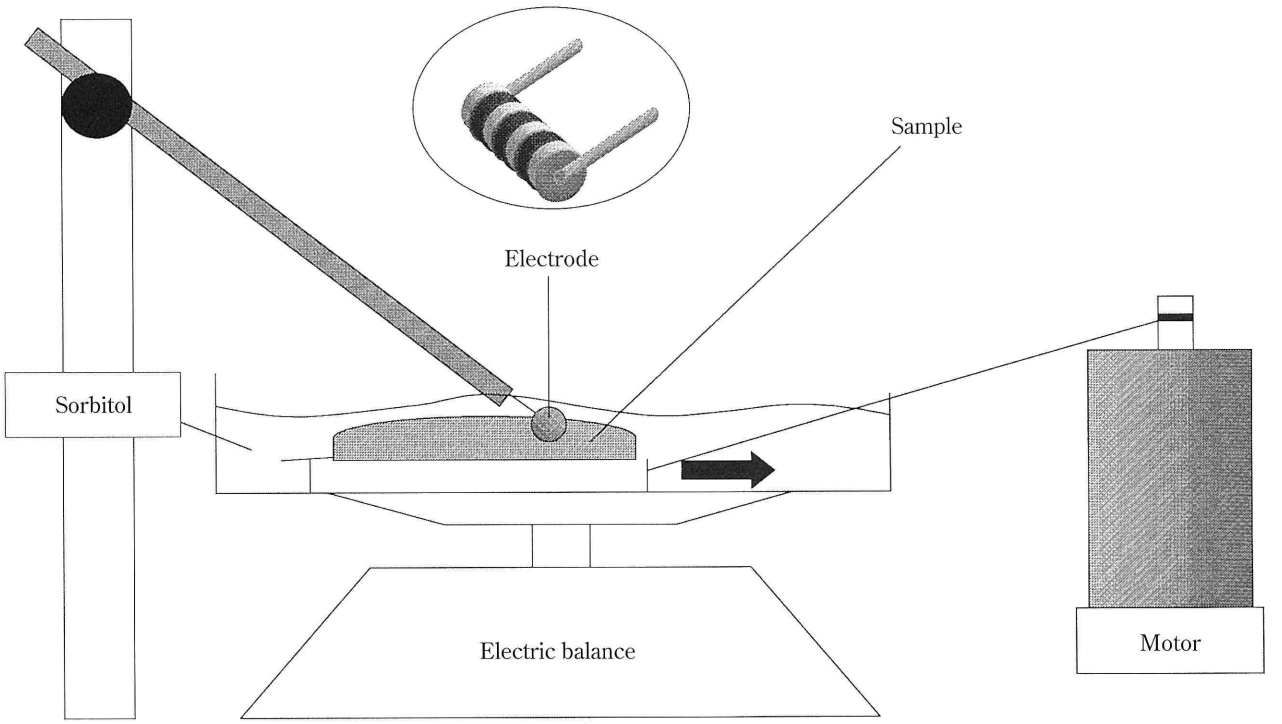


Fig. 2 The special jig (moving stage); The sample is on the board that could be pulled using the motor. Then an electrode attached to the sample, the motor can pull the board at constant velocity at constant pressure. Sample: Porcine Muscle, n. e.: Neutral Electrode

40，75，100 g とした．蒸散は各条件毎に3回施行した．組織試料は10% ホルマリンで固定後，パラフィン包埋し，蒸散した部位のうち中心部の2箇所を組織切片として光学顕微鏡下にマイクロメーターを用いて，組織欠損部を蒸散層として計測した．

［実験4］出力の違いによる熱変性層の比較測定

(1) 実験治具を用い，豚精肉に対し模擬 TVP を施行した．ストレート溝付きローラー電極で出力130，150，180，200，220，250，300 W にて各3回施行した．電極移動速度は10 mm/sec，荷重は30 g で一定とした．

実験標本はすぐに10% ホルマリンで固定し，パラフィン包埋後，両端を避けて，3箇所を組織切片とした．標本は Hematoxylin-Eosin 染色と Azan 染色を行い，光学顕微鏡下にマイクロメーターを用いて熱変性層の深さを計測した．

(2) 全身麻酔下の2頭の豚の腹壁を正中切開し，腹腔内にソルビトール液を満たした．豚の肝臓表面を1人の実験者がストレート溝付きローラー電極で模擬 TVP を施行し，その熱変性層の深さを測定した．出力は130，150，180，200，220，250 W の6段階で行い，できるだけ荷重を一定にするよう努めた．生体変化をできるだけ再現するように，蒸散をしてから3時間後に豚を安楽死させ，肝臓を切除し，10% ホルマリンで固定後，パラフィン包埋した．切除標本は Hematoxylin-Eosin 染色と Azan 染色を行い，光学顕微鏡下にマイクロメーターを用いて熱変性層の深さを計測した．

熱変性層の実験では，計測すべき標本が損傷を受けやすい．このため，標本作成を完全な形で行えなかったものは対象から外した．

尚，この実験での豚の取り扱いについては東京医科大学動物実験指針を遵守した．

本研究において，サージカルユニットは UES-20［オリンパス光学（株）］を用い，出力は切開モードとした．また，蒸散層及び熱変性層の深さの測定は一人の実験者が行い，先入観を排除するために，標本番号のみ記したプレパラートで計測をおこなった．

結　　果

［実験1］切除面への電極荷重の測定

3名が各5回行った蒸散での荷重は 20.0 ± 6.12 g，24.0 ± 8.22 g，26.0 ± 4.18 g（平均 ± SD）であり，

全体では，23.3±6.45 g であった．

［実験 2］電極形状の違いによる蒸散効果の比較

蒸散状態を示す気泡の発生数は溝付きローラー電極で多くみられた．円筒状電極では気泡発生数は少なく，また大きさも安定しなかった．ジグザグ溝付きローラー電極，ストレート溝付きローラー電極，スパイク付きローラー電極の順で大きさが安定した多数の気泡を形成していた．円筒状電極はϕ1 mm，ϕ3 mm，ϕ5 mm の順で気泡の発生数が多く，ϕ3 mm のものが，円筒状電極の中では大きさが最も安定していた．

［実験 3］出力，荷重の違いによる蒸散層の比較測定

Table に結果を示す．

出力が増加するにしたがい蒸散層も深くなる傾向にあった．

荷重に関しては，10 g から40 g までは荷重に比例して蒸散層が増加する傾向がみられたが，75 g，100 g では荷重が増加しても蒸散層は逆に減少する傾向がみられた．

［実験 4］出力の違いによる熱変性層の比較測定

Azan 染色では Hematoxylin-Eosin 染色に比べ熱変性層の境界がより鮮明であった（Fig. 3）．

（1）Fig. 4 に示したとおり，出力 150 W で熱変性層の深さは最大となり，それ以上の出力では減少する傾向がみられた．

（2）150 W で熱変性層の深さは最大となった．In vitro 実験と同様に，それより高出力では熱変性層は減少した（Fig. 5）．

Table The depth of the vaporized cavity in relation to the pressure on the roller and output power (in vitro experiment); (The vertical grooved roller, moving rate: 10 mm/sec, electrode pressure: 30 g) (n = 3, mean ± SD; mm)

Weight (grams)	Output Power (Watts)		
	150	200	250
10	1.33 ± 0.06	1.80 ± 0.20	2.13 ± 0.15
20	1.53 ± 0.15	2.17 ± 0.42	2.23 ± 0.87
30	1.90 ± 0.46	2.60 ± 0.46	2.47 ± 0.64
40	2.47 ± 0.50	3.00 ± 0.50	3.07 ± 0.31
75	2.41 ± 0.41	2.93 ± 0.19	2.76 ± 0.09
100	1.72 ± 0.17	2.09 ± 0.13	2.34 ± 0.05

考　　察

高齢者人口が増大するなか，治療を要する BPH 症例も増加している．この BPH に対する外科的治療法の中心をなすのは TURP である．しかし，術

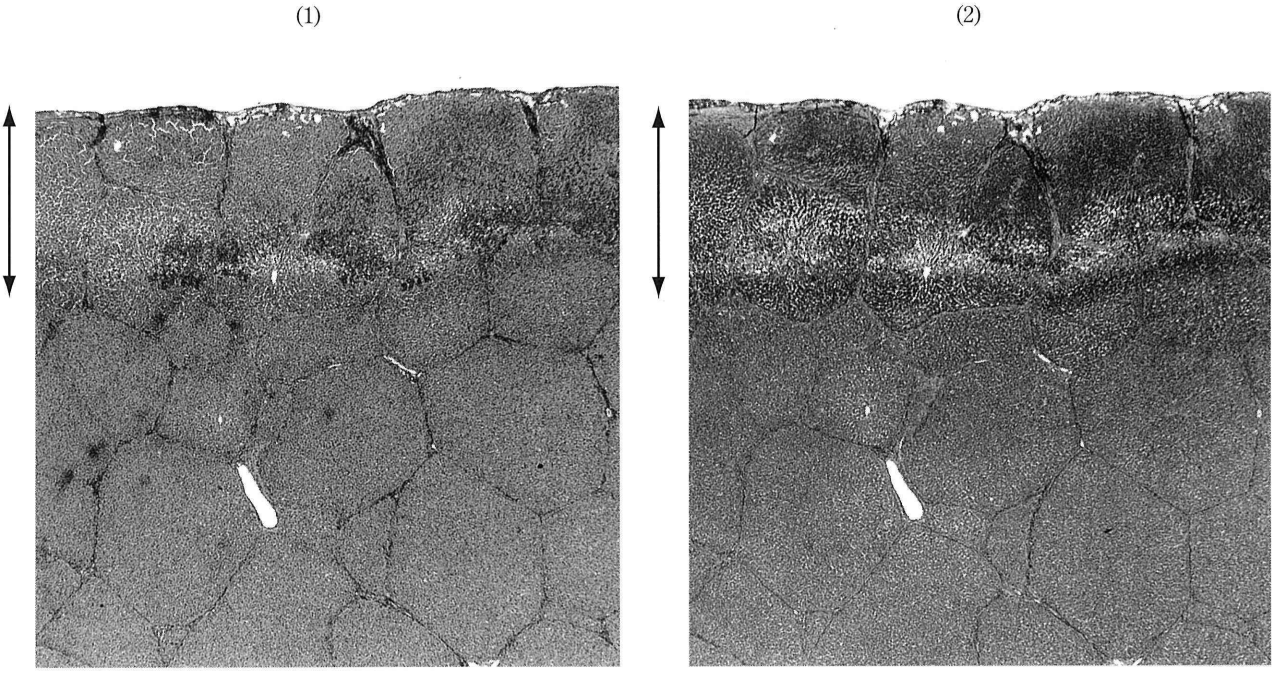


Fig. 3 A microscopic finding: (porcine muscle, × 100); Arrows were showing the desiccated layer.
(1) Hematoxylin-Eosin stain　(2) Azan stain

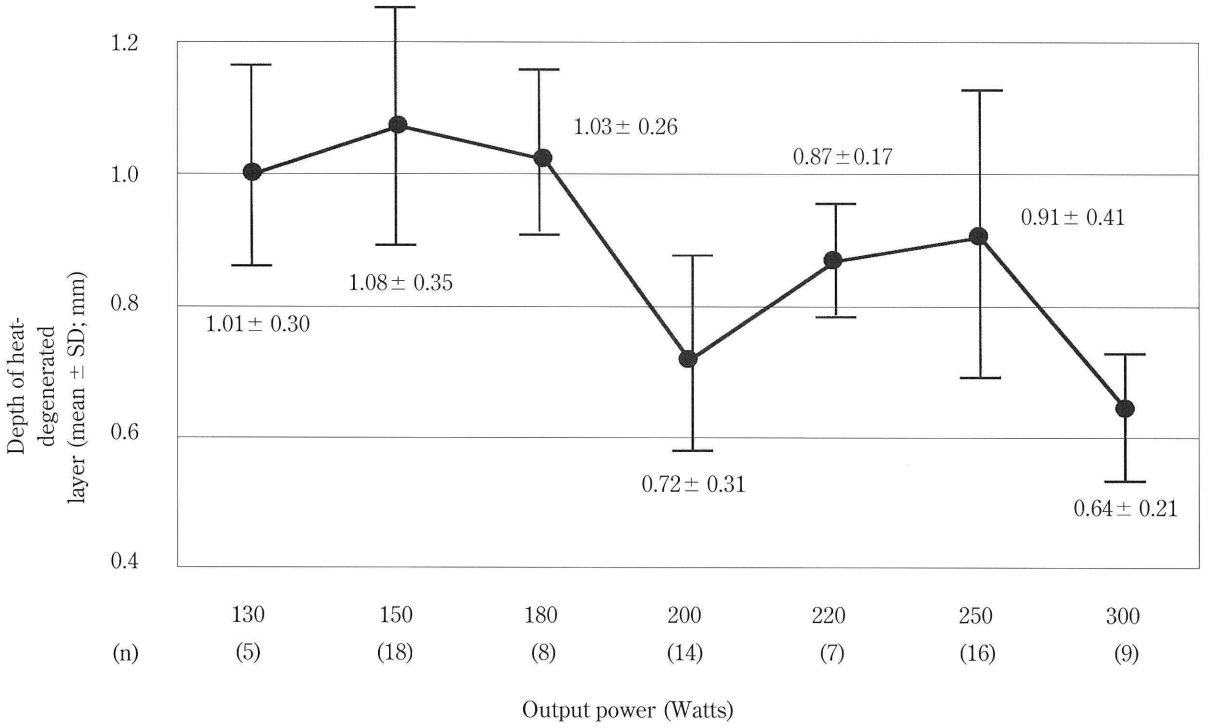


Fig. 4 The depth of the desiccated layer in relation to the output power at porcine muscle (in vitro experiment); (The vertical grooved roller, moving rate: 10 mm/sec, electrode pressure: 30 g)

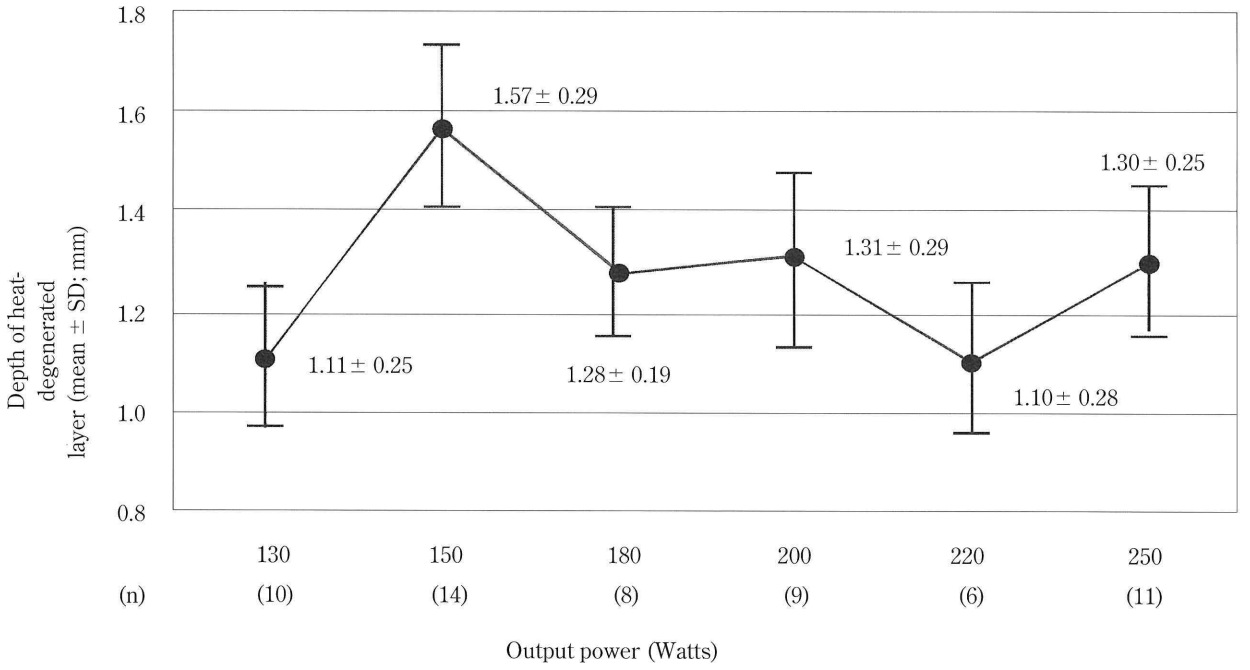


Fig. 5 The depth of the desiccated layer in relation to the output power at porcine liver (in vivo experiment)

中術後出血，TUR症候群などの合併症の問題が存在するため[2~5]，より低侵襲な手術，治療法を求める考え方[16]と相まって，TUMT[6]，VLAP[7]，TUNA[8,9]，HIFU[17]などさまざまな治療法が開発，施行されている．しかしながら，いずれも治療効果はTURPに及ばず，未だTURPがBPHに対する外科的治療法のgold standard[1]として位置付けられている．そうした現状のなかで，TURPの利点であ

る腺腫のボリュームを減少させるという点を残し，欠点である出血を抑える治療法として考え出されたのがTVPである[10]．Farrinら[4]は，血管からの出血を抑え血管内腔を閉塞するためには，ある程度の範囲の乾燥凝固（熱変性）が必要であると述べている．熱変性層の深さの増加は術中出血のみならず，TUR症候群の発生の減少につながり，さらに電極形状は通常ループよりもthick電極が有用であると述べている．

このTVPにおいて，電極先端の形状はどのようなものが望ましいのか，高周波電流の出力設定と組織の蒸散層，熱変性層の関係はどうであるのかということは十分には解明されていない[13~18]．そこで，今回TVPにおいて，より効率的な電極先端形状，出力と蒸散，熱変性層の関係について基礎的検討を行い，今後の臨床的検討への道標とすることを目的とした．

Limら[19]はヒト前立腺（in vivo）と牛筋肉あるいは鳥胸肉（in vitro）の組織インピーダンスが類似していると述べている．そこで蒸散効果を比較するin vitro実験（実験2）では，組織インピーダンスを重視して対象を牛肉とした．一方，in vivo実験［実験4–(2)］においては，現在日本において実験動物の入手が容易であること，組織表面と電極との接触が容易で，蒸散実験をTVPに近似した状態で行えることなどの理由から豚肝臓を選択した．ほかのin vitro実験実験［1，3，4–(1)］では，ほぼ均一な組織であり，安価にて入手可能な豚精肉を選択した．

電極の移動速度は単位面積，単位時間あたりの電流量に影響を与える因子であるが，今回はそれを一定とし，検討項目から除外して，多岐にわたる因子を単純化した．

切除面への電極荷重も蒸散量に影響を与える因子である[19]．そこで，実験1において，3人の実験者でその荷重を測定した．結果は，多少のばらつきはみられたものの，平均では23 gであった．以降の実験において，この結果と，1 g単位の設定は不可能であること，設定を20 gとすると軽量であるためローラー電極が適正に回転せず，組織表面を滑るように動き蒸散を適切に行えない場合があることを考慮して，荷重は安定した蒸散が得られる30 gとした．

電極に通電すると通電部に熱が発生し，その熱エネルギーの程度により組織は乾燥凝固，炭化，蒸散といった変化を生じる．蒸散にはある程度の電流密度が必要であり，組織温度が数百度になると蒸散が生じるとされる．その一つの目安が気泡の発生であるり，より多くの気泡が大きさの安定した状態で発生するのが理想と考えられる．そこで気泡の発生状態を高速ビデオカメラで撮影し，6種類の電極による蒸散効果を比較した．その結果，溝付き型は円筒型に比べ，大きさの安定した多くの気泡が得られ，気泡の逃げ道を有する溝付き型のような形状のもののほうが蒸散効率がよいと考えられた．さらに溝の形で，ジグザグ型はストレート型よりも気泡の発生数が多く，これも気泡の逃げ道に関係すると推察される．つまり，今回使用した電極では，溝付きローラー電極，それもジグザグ型の形状が最も蒸散効率に優れていると考えられた．しかし，ジグザグ型電極は溝の部分の形状が複雑なため，いまだ実用化されていない．

そこで，実験3，4では市販されているストレート溝付きローラー電極を用いた．出力を150，200，250 Wと増大すると，それにしたがい，蒸散層の深さは増加した．これはLim[19]やWolf[20]らの報告と同様であった．

一方，荷重に関しては，10，20，30，40 gと増大すると，蒸散層は増加傾向を示したが，75，100 gでは逆に減少傾向を示した．Limら[18]も20，50，70 gの設定で同様の検討をしている．結果は，50 gの時最も蒸散層が深く，70 gではそれよりも減少しており，我々の結果と類似している．これは，ある程度荷重が大きくなると，電極先端部が組織に少し埋没あるいは押しつけられ，組織との接触面積が増大することになる．その結果，電流密度が低下するためと考えられる．

次に，豚肉及び血流のある豚肝臓を対象とした熱変性層についての実験では，出力を増大すると150 W以上では，熱変性層の深さは逆に減少した．Benjaminら[21]は，犬前立腺に蒸散術を施行し，組織の壊死層が生体反応で広がるかどうかを術後11週まで調べている．その結果，術直後2 mmの壊死層が広がることはなかったと報告している．今回は，約3時間の生存期間をおいて組織を摘出しているので，熱変性層の評価において生体反応上の問題はないと思われる．Wolfら[20]は豚膀胱を用いたin vivo実験を出力100，150，200 Wで行い，150 Wでは

100 W に比べ凝固層が増大したが，200 W では 150 W に比べわずかに減少したと報告している．使用した電極は我々の用いた電極に類似した形状のストレート溝付きローラー電極である．サージカルユニット，対象組織の違いはあるが，同様の結果であったといえる．この結果から，前立腺を対象とした臨床例でも同様の結果である可能性がある．標本数が少なく，現在検討中であるため今回は示さなかったが，我々のヒト前立腺での検討において，出力を増大しても，ある出力値からは熱変性層の増加がみられない傾向がある．このことを説明しうる理由は不明であるが，熱エネルギーと組織反応の関係が関与していると思われる．

出力の増大に伴い蒸散層が増加した結果から，単位時間あたりの切除蒸散量を大きくするには，高出力にすればよいといえる．しかし，出血を抑え，TUR 症候群などの発生を抑えるために必要な熱変性層はある出力値を境に減少したことから，高出力設定が必ずしも臨床上望ましいとはいえない．また，この境界となる出力値は，電極移動速度や荷重によって変化するものであり，術者の技量によるものであるから，臨床においては，一律に数値を示すことはできないといえる．しかし，出力と蒸散層，熱変性層の関係を認識し，臨床に応用することは大切である．また高周波電流を不用意に高出力で使用することは，漏れ電流を増加させ[22]，さまざまな危険を生じる可能性を有しているので控えるべきである．

今回の検討では標本数が少なく，蒸散や熱変性層の深さについての傾向を示すに留まった．今後標本数を増やし，さらに具体的な数値を示してゆく予定である．

結　論

1）溝付きローラー電極は円筒状電極に比べ，蒸散効率に優れていた．さらに溝付きローラー電極のなかでも，ジグザグ型はストレート型に比べ蒸散効率が高かった．

2）出力の増大に伴い，蒸散層は増大した．熱変性層はある出力値（今回の実験では 150 W）を境に減少した．

3）電極荷重は蒸散層の深さに影響を与える因子であった．ある荷重（40 g）において蒸散層は最大であり，それ以上の荷重では低下した．

4）過度な高出力設定は合併症を生じる危険性がある．理想的にはジグザグ溝付きローラー電極を使用し，150 W の出力，40 g 程度の荷重で TVP を実施するのが最良である．

謝　辞

本実験に際し，機材の提供をいただいたオリンパス光学（株）並びにご協力いただいたオリンパス光学の肘井，大山両氏に深謝いたします．また，本研究において終始直接御指導，御高閲を賜りました東京医科大学泌尿器科学教室三木誠教授に深甚なる謝意を表します．

文　献

1) Holtgrewe W.L., Mebust E.K., Dowd J.B., Cockett A.T.K., Peters P.C. and Proctor C.：Transurethral prostatectomy: Practice aspects of the dominant operation in American urology. J. Urol., **141**：248～253, 1989
2) Mebust W.K., Holtgrewe H.L., Cockett A.T.K., Peters P. C. and Writing Committee：Transurethral Prostatectomy: immediate and postoperative complications. A cooperative study of 13 participating institutions evaluating 3885 patience. J. Urol., **141**：243～247, 1989
3) Roos N.P., Wennberg J.E., Malenka D.J., Fisher E.S., McPherson K., Andersen T.F., Choen M.M. and Ramsey E.：Mortality and reoperation after open and transurethral resection of the prostate for benign prostatic hyperplasia. N. Engl. J. Med., **320**：1120～1124, 1989
4) Mackenzie A.R., Levine N., Scheinmann H.Z.：Operative blood loss in transurethral prostatectomy. J. Urol., **122**：47～48, 1979
5) G. Farrin and P. Faul：Haemostasis during transurethral resection of the prostate (TUR-P). Min Invas. Ther. &Allied. Technol., **8**(2)：101～107, 1999
6) Djavan B., Seitz C., Ghawidel K., Basharkhan A., Bursa B., Hruby S. and Marberger M.：High-energy transurethral microwave thrmotherapy in patients with acute urinary retention due to benign prostatic hyperplasia. Urology, **54**(1)：18～22, 1999
7) Cowles R.S., Kabalin J.N., Childs S.：A prospective randomized comparison of transurethral resection to visual laser ablation of the prostate for the treatment of benign prostatic hyperplasia. Urology, **46**：155～160, 1995
8) Issa M.M., Oesterling J.E.：Transurethral needle ablation (TUNATM): an overview of radiofreqency

thermal therapy for the treatment of benign prostatic hyperplasia. Current Opinion in Urology, **6**：20～27, 1996

9) K. Namiki, H. Shiozawa, M. Tsuzuki, Y. Mamiya, T. Matsumoto and M. Miki：Efficacy of Transurethral Needle Ablation of the Prostate for the Treatment of Benign Prostatic Hyperplasia. Int J. Urol., **6**：341～345, 1999

10) S.A. Kaplan and A.E. Te：Transurethral electrovaporization of the prostate: A novel method for treating men with benign prostatic hyperprasia. Urology, **45**：566～572, 1995

11) Narayan P., Tewari A., Garzotto M., Parramore H. W., Schalow E., Starling J. and Jones T.：Transurethral Vapor Trode electrovaporization of the prostate: physical principles, technique, and results. Urology, **47**：505, 1996

12) S.A. Kaplan, R.P. Santarosa and A.E. Te：Transurethral electrovaporization of the prostate: One-year experience. Urology, **48**, **6**：876～881, 1996

13) Saad Juma：Transurethral fulguration of the prostate with the roller ball. Urology, **47**(1), 53～58, 1996

14) D.S. Benjamin, K.C. Oberg, G.W. Saukel, H.C. Ruckle and S.C. Stewart：Histopathologic evaluation of the canine prostate following electrovaporization. J. Urol., **157**：1144～1148, 1997

15) A.E. Te and S.A. Kaplan：Transurethral electrovaporization of the prostate. Mayo Clin. Proc., **73**(7), 691～695, 1998

16) Watson G.M.：Minimally invasive therapies of the prostate. Minim. Invas. Ther, **1**：231, 1992.

17) Gelet A., Chaphelon J.Y., Margonari J.：Prostatic tissue destruction by high-intensity focused ultrasound: experimentation on canine prostate. J. Endourol., **7**：249～253, 1993

18) Narayan P., Tewari A., Croker B., Garzotto M., Mustafa S., Jones T. and Perinchery G.：Factors affecting size and configuration of electrovaporization lesions in the prostate. Urology, **47**：679～688, 1996

19) Lim L.M., Ryan T, P. and Patel A.：Factors influencing electrovaporization in the treatment of benign prostatic hyperplasia. Biomed. Sci. intrum, **32**：197～204, 1996

20) Wolf J.S. Jr., Rayala H.J., Humphrey P.A., Clayman R.V.：In vivo comparison of electrosurgical vaporization electrodes. J. Endourol, **11**：83, 1997

20) Benjamin D.S., Oberg K.C., Saukel W., Ruckle H. C. and Stewart S.C.：Histopathological evaluation of the canine prostate following electro vaporization. J. Urol., **157**：1144～1148, 1997

20) 並木一典, 大野芳正, 小川正至, 塩沢寛明, 間宮良美, 三木　誠：TUR, TVP　において発生する漏れ電流について. Jpn. J. Endourol. ESWL, **12**, 186, 1999

The effect of electrode shapes and electric power output on tissue in transurethral electrosurgical vaporization of the prostate

Yoshiaki ARAI[1], Kazunori NAMIKI[1], Hiroaki SHIOZAWA[1], Tohru SHIMIZU[2]

[1]Department of Urology, Tokyo Medical University
[2]Department of Surgical Pathology, Tokyo Medical University

ABSTRACT

The most effective conditions for transurethral electrosurgical vaporization of the prostate were determined by examining the depth of vaporization cavity, the layer of heat-degenerated tissue and the formation of bubbles using different types of roller loop electrodes and different grades of the output power.

The electrodes, with mean weights of 20.0, 24.0, 26.0 g, were manipulated by 3 operators to vaporize a plate of bovine muscle on an electric balance. The electrode with 40 g weight producted the deepest vaporization. Different power levels of 130, 150, 180, 200 and 250 W were applied to the potine muscle in vivo. The current of 150 W resulted in the deepest heat-degeneration of the tissue. The same finding was obtained from the in vivo study using the portine liver under general anesthesia. Vaporization effects to the bovine muscle different according to types of the rollers, such as vertical grooved, zigzag grooved, multiple spiked and smooth rollers with 3 different size. The zigzag grooved roller produced the most bubbles with uniform shape. The zigzag grooved roller is potentially as the most efficient current delivery medium.

〈**Key words**〉 Transurethral electrosurgical vaporization, Efficiency of vaporization, Roller loop electrodes, Benign prostatic hyperplasia