前立腺の物理的諸性質に関する実験的研究

第2報：前立腺外科的被膜の引張り実験よりみた

前立腺肥大症の排尿障害の病態

京都府立医科大学泌尿器科学教室
(主任：渡辺 決教授)

大 西 克 実

A STUDY OF THE PHYSICAL PROPERTY OF THE PROSTATE (THE SECOND REPORT) —THE RELATIONSHIPS BETWEEN DYSURIA AND THE STRENGTH OF THE SURGICAL CAPSULE IN BENIGN PROSTATIC HYPERTROPHY—

Katsumi Ohnishi

Department of Urology, Kyoto Prefectural University of Medicine
(Director: Prof. H. Watanabe)

The horizontal section of the prostate in benign prostatic hypertrophy (BPH) varied from a semilunar shape in the early stage to a circular shape in the advanced stage, in accordance with the development of the adenoma. Based on this idea, an index of the "Presumed Circle Area Ratio (PCAR)", which indicates how the sections of the prostate approach a circular shape, was established in our laboratory.

In the index, the critical point whether pathological residual urine in BPH develops or not was 0.75. BPH with residual urine over 30 ml should have a PCAR over 0.75. In BPH with a PCAR below 0.75, residual urine should be below 30 ml. However, residual urine in BPH with a PCAR over 0.75 was over 30 ml in some cases and below 30 ml in others.

In order to clarify the reason why in some cases pathological residual urine did not develop in spite of a high PCAR, the tensile strength of the surgical capsule of the prostate in 40 cases of BPH with a PCAR over 0.75 was measured. In results, the surgical capsule in 10 cases with residual urine below 30 ml in spite of a PCAR over 0.75 was able to extend more than that of the remaining 30 cases with residual urine over 30 ml.

The hypertrophic prostate was simulated by a spherical model consisting of a capsule, of which the physical property was similar to the measured one, and content, of which the property was homogenous and liquid. By the application of the finite deformation theory for elastic substances like rubber, the internal (intraprostatic) pressure of this prostate model was calculated using a computer.

In results, the calculated intraprostatic pressure in cases with residual urine over 30 ml elevated suddenly according to the slight expansion of the content, while that in cases with residual urine below 30 ml did not. It was presumed, accordingly, that the intraprostatic pressure in the former cases might elevate also when urine flow came into the urethra, which passes through the prostate anatomically.

Thus the mechanism of dysuria in BPH was clarified using the PCAR theory and information on the physical property of the surgical capsule.

要旨：仮想円面積比理論は、前立腺肥大症の排尿障害の病態を明快に説明しているようにみえるが、実際には、たとえ仮想円面積比が十分に高くても残尿のまったく発生していない肥大症が多数存在する。このような、仮想円面積比理論に従わない症例に対して、第1報で報告したごとく、パルーン法による前立腺部尿道圧測定を行ったところ、排尿時の前立腺部尿道の尿水力学的環境を示す前立腺圧係数が有意に小さく、その外科的被膜も、病的残尿を発生している肥大症のそれと比べ伸びに対する“余裕”を

残していることがわかった。

今回、第2報として、仮想円面積比が十分に高い症例群において前立腺肥大症の外科的被膜の物理的性質が、排尿障害の病態とどのようなかわりをもつのかを検討するため、外科的被膜40検体の引張り実験を施行し、その実験成績から以下のことを報告した。

1) 仮想円面積比が十分に高く、病的残尿を発生していない症例の外科的被膜は、その引張り応力一歪み曲線から求めた弾性率は小さく、最大伸び率は大きい。一方、病的残尿を発生している症例では、その弾性率は大きく、最大伸び率は小さい。

2) 外科的被膜の引張り応力一歪み曲線から導き出した前立腺の理論的容量内圧曲線を検討してみると、残尿を生じない症例では平坦な曲線を描くが、残尿を生じる症例では立ち上がりの急峻な“背の高い”曲線を描いた。すなわち、前者では、排尿開始時尿道内圧（前立腺内圧）があまり上昇せず、後者では、急に上昇することが理論的に証明された。

これらのことより、前立腺肥大症の排尿障害の病態は、仮想円面積比理論と肥大症外科的被膜の物理的性質の観点から完全に解明された。

緒 言

前立腺肥大症は、経直腸的超音波断層法の出現¹⁾によってその診断を正確かつ容易に行えるようになったばかりでなく、排尿障害の病態についてもかなり推定することが可能となってきた。

経直腸的超音波断層法を用いて前立腺肥大症の成り立ちを観察すると²⁾、内腺が成長するに従い次第に前立腺水平断面が丸くなる。すなわち、正常前立腺の水平断面は横に長い瘦せた形の三角形をしているが、初期肥大症では“肩の張った”半月形となる。さらに晩期になると円形を示すようになり、膀胱内突出³⁾も出現してくる。このように前立腺水平断面が丸くなるに従って、成長した腺腫は外科的被膜（外腺）を外側に押し広げ、同時にこれと同じ力が尿道周囲にかかる。しかもこの圧力は前立腺水平断面が丸いほど強く尿道にかかり、その結果排尿障害も強くなる。すなわち、仮想円面積比⁴⁾（Presumed Circle Area Ratio, PCAR）が0.75以下の前立腺肥大症では必ず残尿は30 ml以下であり、0.75以上に増加してはじめて病的残尿を発生し、さらに尿閉の出現が始まる。

仮想円面積比が1.0に近づくに従って、内腺の圧迫がより強く外科的被膜および尿道周囲にかかることから考えれば、仮想円面積比が高くなって1.0に近づくほど排尿障害の程度は強くなるのが容易に理解できる。

しかし、実際の臨床上では、仮想円面積比が十分に高く排尿障害の強いことが推定される前立腺肥大症患者において、意外にも病的残尿を発生していない場合をしばしば経験する⁵⁾。

第1報⁶⁾において、バルーン法を用いた前立腺肥大症患者の前立腺部尿道圧測定結果より、仮想円面積比

が十分に高くても病的残尿を発生しない症例では前立腺係数が小さく、病的残尿を発生している症例では前立腺係数が大きいことを報告した。さらに、前立腺圧曲線のパターンから、残尿の少ない症例では外科的被膜が弾力性に対して“余裕”をもっており、残尿の多い症例では被膜の弾力性に対する“余裕”が失われてきていることを推測した。

今回、第2報として前立腺肥大症の外科的被膜の引張り実験を行い、この実験成績から前立腺肥大症の物理的諸性質を検討した。この結果、仮想円面積比が0.75以上と十分に高いにもかかわらず排尿障害のない症例があるという、仮想円面積比理論で説明しきれない現象を、外科的被膜の物理的性質の相違という点から明確に説明し得たので報告する。

対 象

1983年7月より1985年2月末までの期間で、京都府立医科大学泌尿器科に入院し前立腺被膜下摘除術を行った前立腺肥大症患者と、生前経直腸的超音波断層法を施行していた病理剖検例とのうち、引張り実験に必要な大きさの組織検体を獲得できた40症例を対象とした。全例において、患者および家族の承諾を得た。

方 法

1. 引張り実験における試験片作成法および実験器具

恥骨後式前立腺被膜下摘除術⁶⁾⁷⁾を行う際、膀胱頸部から1.0～1.5cmのところまで前立腺被膜を横方向に切開し、腺腫摘出後、縫縮のため、前立腺被膜切断端の遠位側を被膜切開線に平行に一部切除し、組織検体とした。

検体の大きさは、全例約10×5×5mm程度であった。

剖検例でも同様の操作を行った。

山田ら⁸⁾によると、死体解剖の場合には、摘出した臓器は生理食塩水に浸し、24時間冷蔵庫に保存してはじめて死後硬直が消失し、機械的安定に達する⁹⁾ので、剖検例ではそれに従ったが、今回の実験対象は大部分手術時切除した生体の標本であるため、これらでは常温の生理食塩水に30分～1時間浸した後、すぐに引張り実験¹⁰⁾を行うという一定の条件を設定した。

試験機には、新興通信工業株式会社製の TOM/200 D 型万能引張圧縮試験機¹¹⁾を用い、また、記録計には AS14 型 X-Y 記録計を使用した。

試験片をつかむ掴具には、当教室で開発した特殊な小型掴具（図1）を用いた。さらにこの際、材料掴具と試験片の接触部分の間にガーゼをはさんで、試験片と掴具との間にずれが生じたり、掴持のため試験片が損傷したりするのを防いだ。

試験片作成には、日本工業規格で認定されている金属材料引張試験片を参考にして、同じく当教室で開発した生体用の特殊な試料打抜刃（図2）を用いた。これによって試験片を $\square$ の形にして、引張り試験にお

図1 特殊小型掴具。写真では掴具に固定された試験片とその間のガーゼがみられる

図2 試料打抜刃

ける引張り応力が試験片に均等にかかるようにした。試験片の、長さ、幅、厚さは、1/50mm 微動副尺付ノギスを用い、引張り試験前に測定した。

成形された試験片をもう一度生理食塩水に浸し十分に湿状態にした後、試料掴具で掴持し、これを材料試験機に固定し、負荷速度を16mm/分と同じ測定条件下で引張り実験を行った。

このような引張り実験によって得られた各症例の引張り応力-歪み曲線から、引張り強度、最大伸び率、弾性率を求めた。なお、引張り強度は試験片にかかる荷重を破断面の面積で除して算出した。

2. 理論的な前立腺容量内圧曲線

各症例において、外科的被膜の引張り実験から得られた応力-歪み曲線をもとにして、理論的に前立腺肥大症の前立腺組織内圧がどう変化するか、容量内圧曲線を導き出した。

前立腺肥大症の外科的被膜が均質かつ十分な強度をもっており、その中に均質かつ半流動体である内容物（腺腫）がつままっていると仮定する。前立腺の真中を通る尿道は無視し、前立腺全体を、半径 r 、被膜の厚さ h の球殻と考える（図3）。このような前立腺モデルを考えると、斉藤らの大変形の弾性理論^{12)~15)}（1980）を用い、実測された応力-歪み曲線から前立腺の理論的な容量内圧曲線を求めることができる。

このような前立腺モデルにおいて、前立腺被膜が任意の変形をすると、内部に歪みエネルギーが貯えられ、この歪みエネルギー密度 W は $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の関数で表せ

図3 前立腺球殻モデル

半径 r 、厚さ h 、内外圧の差 p 、単位面積あたりの張力 t 、重量 m 、密度 ρ

る。

$$W=W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (1)$$

ここで、 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ は変形の主軸方向を座標軸に選んだ時、主軸 $X_i (i=1, 2, 3)$ に沿う3つの伸長比 $\lambda_i = x_i / x_{0i} (i=1, 2, 3)$ を示す。 x_{0i} と x_i とはそれぞれ変形前、後の物体の i 軸方向の長さである。

Valanis と Landel¹⁶⁾はゴムのような均質な材料に対して、

$$W=w(\lambda_1)+w(\lambda_2)+w(\lambda_3) \quad (2)$$

とした。ここで $w(\lambda_i)$ は λ_i のみの未知関数である。

前立腺外科的被膜をゴムのような均質で非圧縮性弾性体とみなし、歪みエネルギー関数として②式の関数形を用いる。一方、斉藤らが犬膀胱理論を犬の膀胱に適用した、

$$W(\lambda) = \frac{K}{n} \left| \lambda - 1 \right|^n \quad (3)$$

の関数形も同じく採用する。すると応力 t は、

$$t(\lambda) = K\lambda(\lambda - 1)^{n-1} + \frac{K}{\sqrt{\lambda}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \right)^{n-1} \quad (4)$$

で表せる。斉藤らの犬膀胱での実際の検定により④式の第2項は無視できることがわかっているの、結局引張り実験における応力は、

$$t(\lambda) = K\lambda(\lambda - 1)^{n-1} \quad (5)$$

と表現できる。

さて、肥大症前立腺を図3のような球殻と考えると、その内圧 P は Laplace の法則

$$P = \frac{2T}{r} \quad (6)$$

のごとくである。ここで T は前立腺被膜にかかる全張力である。被膜の厚さを h とすると、 T は、

$$T = ht \quad (7)$$

(t は単位面積あたりにかかる応力)

で与えられる。また、 h が十分に薄いものとする、

$$h = \frac{m}{4\pi\rho r^2} \quad (8)$$

である。 ρ は外科的被膜の密度、 m は同じく全重量である。すると、⑥式は、

$$p = \frac{2ht}{r} = \frac{2mt}{4\pi\rho r^3} = \frac{2m}{3\rho V_0} \left(\frac{V_0}{V} \cdot t \right) \quad (9)$$

$$\text{ここで、} V = \frac{4}{3}\pi r^3, V_0 = \frac{4}{3}\pi r_0^3$$

$$t \text{ は } \lambda \text{ の関数で、} \lambda = \frac{r}{r_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{1/3}$$

V_0 は前立腺を球形と考えた場合の最小体積である。

このようにして、引張り応力-歪み曲線から応力 t

と伸長比 $\lambda \left(= \frac{x}{x_0} \right)$ との関係を示す曲線を求め、この実測曲線にもっとも fit (近似) するよう、パーソナルコンピュータ (NEC, PC9801F) を用いて理論的に⑤式の K と n を決定する。そしてこの応力 t を⑨式に代入して前立腺の容量内圧曲線を求めた。

3. 経直腸の超音波断層法、残尿測定

経直腸の走査専用装置²⁾(渡辺, 1974)を用いて、患者を坐位の状態にして検査を行った。探触子を5mm 間隔で操作し、肛門より約5~8cm 程度の深さで得られる前立腺水平断層像を35mm カメラで撮影し、得られた前立腺超音波断層像から、渡辺らの方法に従って前立腺推定重量を計算した¹⁷⁾。測定誤差は5%以内であることが証明されている¹⁸⁾。

また、前立腺水平断面積が最大となる前立腺断層像において、前立腺水平断面がどれくらい真円に近いを示す仮想円面積比を求めた。

各症例において残尿測定は、外来通院時あるいは入院時に随時行った。残尿量が200ml 以上の症例および膀胱バルーンカテーテル留置中の症例はすべて尿閉としてとり扱った。また、過去に尿閉を起こしたことのある症例もすべて尿閉としてとり扱った。

結 果

ヒトの肥大症前立腺の外科的被膜の引張り実験によって得られた応力-歪み曲線は、図4に示すごとくである。応力は伸びに応じて smooth に増加し、なめらかな曲線を描いた。応力は伸びに従って増加するが、やがて通常の試験材料と同様な降伏点に達し、応力の増加が急にぶって応力の最大値を示す極限点に達し、そののち試験片が破断する破断点へ向かう¹⁹⁾(図4)。このように前立腺外科的被膜の引張り応力-歪み曲線は、軟鋼および延性高分子材料のそれではなく、鶏肉と同様な曲線を描いた²⁰⁾(図5)。

試験片の破断箇所(おおむね試験片の中央部)の組織学的検索を行ったが、全例において、図6に示すよ

図4 肥大症外科的被膜の引張り応力-歪み曲線(症例40)

図5 鶏肉，延性高分子材料，軟鋼の応力－ひずみ曲線の模式図

図6 外科的被膜の引張り実験後の組織像（×20）

うに外科的被膜の筋線維組織が破断部位において断裂しているのがわかった。

40症例の引張り応力－歪み曲線から求めた，降伏点での引張り強度と弾性率，極限点での最大伸び率の結果を表1に示した。

図7に，図4の引張り応力－歪み曲線を示した症例

図7 前立腺の水平面超音波断層像（症例40）

表1 40症例の経直腸的超音波断層法および引張り実験の結果

症例 番号	年 齢	残 尿 量 (ml)	経直腸的超音波断層法		引張り応力-ひずみ曲線			前立腺容量内圧曲線	
			前立腺推 定重量(g)	仮 想 円 面 積 比	弾 性 率 (kg/cm ²)	伸 び 率	引張り強度 (kg/cm ²)	k (kg/cm ²)	n
1	63	0	94.8	0.98	4.0	1.13	4.5	2.64	2.19
2	64	1	95.2	0.96	7.0	1.94	13.6	8.86	3.32
3	53	2	38.0	0.96	8.2	1.47	9.4	5.05	3.30
4	80	5	81.2	0.90	2.4	1.44	3.4	3.95	2.84
5	65	9	53.2	0.95	7.4	2.96	22.0	0.30	3.42
6	65	15	52.1	0.89	6.9	1.45	10.0	3.38	2.46
7	76	18	55.8	0.98	7.7	1.97	12.2	2.00	3.49
8	77	18	57.0	0.96	4.7	1.41	6.6	5.69	2.84
9	71	29	44.2	0.97	6.3	0.95	6.0	2.07	3.10
10	77	26	52.1	0.86	7.1	1.16	8.2	4.19	2.36
11	68	30	56.4	0.90	21.2	0.83	17.6	28.7	2.73
12	61	30	36.3	0.96	17.8	1.54	27.4	15.5	2.69
13	69	34	50.0	0.90	26.6	0.94	25.0	25.2	2.57
14	75	35	77.5	0.86	16.6	2.36	39.2	2.74	3.09
15	83	35	33.6	0.87	12.5	2.06	25.8	2.47	2.96
16	74	37	36.4	0.94	10.2	0.80	5.8	53.6	5.60
17	78	40	60.0	0.98	9.7	1.22	11.8	8.67	2.96
18	79	40	34.8	0.90	8.6	1.02	4.2	4.35	2.53
19	67	40	45.5	0.90	10.4	0.90	9.4	13.0	2.66
20	72	50	54.2	0.92	11.1	1.04	9.0	8.59	2.39
21	60	52	64.6	0.88	10.2	2.50	25.4	1.70	2.70
22	79	70	29.9	0.92	9.5	0.77	5.4	15.7	3.32
23	56	75	47.9	0.94	18.6	1.15	21.4	13.5	3.08
24	79	80	44.8	0.92	15.8	1.06	16.8	12.1	3.09
25	75	145	76.4	0.86	11.3	1.03	11.6	8.02	2.43
26	68	尿閉	43.6	0.91	7.1	1.32	6.7	21.1	2.53
27	73	〃	30.7	0.98	5.9	1.05	5.5	4.34	2.77
28	81	〃	85.3	0.93	10.9	1.19	13.0	55.4	3.73
29	81	〃	33.1	0.95	7.3	0.96	7.0	24.8	2.89
30	78	〃	67.6	0.97	28.0	0.92	25.8	35.3	2.87
31	71	〃	77.7	0.99	10.5	1.10	11.6	8.28	2.38
32	82	〃	69.8	0.91	13.8	1.91	26.4	6.34	2.86
33	76	〃	166.2	0.87	11.2	1.00	11.2	23.5	5.27
34	75	〃	67.3	0.92	7.1	1.03	6.2	5.32	3.49
35	81	〃	85.4	0.93	8.9	1.04	4.8	5.42	2.50
36	76	〃	52.1	0.90	10.0	2.46	21.2	3.27	2.47
37	71	〃	96.4	0.94	15.6	1.31	20.4	11.2	2.85
38	71	〃	86.7	0.96	12.0	1.03	12.4	18.8	3.13
39	57	〃	66.6	0.98	11.1	0.97	10.8	7.87	2.63
40	73	〃	72.1	0.86	11.5	0.73	8.4	8.95	2.67
	72.0±7.7		64.3±30.6	0.93±0.04	11.1±5.5	1.33±0.54	13.6±8.5	12.30±12.87	2.98±0.68

40の経直腸の超音波断層像を示した。

また、40症例の年齢、残尿量、前立腺推定重量、仮想円面積比の結果も表1に示した。

前立腺推定重量と残尿量との間に相関関係はなく、症例1や2のように重量が100g近くあっても残尿のないものや、逆に症例27のように重量が30g程度でも尿閉を起こしたものもあり、前立腺推定重量は、肥大症の排尿障害の有用なパラメータでないことがわかった²¹⁾。

40症例はすべて仮想円面積比が0.86以上であり、病的残尿発生に必要な臨界点0.75を十分に越えていた。しかし、40症例中10例（症例1～10）は病的残尿を発生しておらず、仮想円面積比が同じでも残尿のまったくない症例から尿閉を示す症例まで、さまざまであった。

前立腺推定重量と仮想円面積比との間には特に相関は認められなかった。すなわち、重量が大きくても仮想円面積比がさほど高くなかったり、またその逆の場合などが存在した。

弾性率と残尿量との関係をみると、病的残尿を発生していない症例1～10の10症例では弾性率は小さく、尿閉も含め病的残尿を発生した症例11～40の残り30症例では弾性率は大きいことがわかった(図8)。図8において、40症例を残尿量30mlと弾性率8.0kg/cm²とで4つのグループに分けて考えてみると(表2)、残尿量30ml未満の症例では弾性率は8.0kg/cm²以下であり、残尿量30ml以上の症例では弾性率は8.0kg/cm²以上であるといえた(カイ二乗法検定、 $p<0.01$)。

つぎに、最大伸び率と残尿量との関係をみると(図9)、残尿が30ml未満の10症例では伸び率が大きく、残

図8 弾性率と残尿量との関係

表2 弾性率と残尿量との関係

弾性率 残尿量	8.0kg/cm ² 未満	8.0kg/cm ² 以上
30ml 未満	9	1
30ml 以上	4	26

表3 伸び率と残尿量との関係

伸び率 残尿量	1.40未満	1.40以上
30ml 未満	3	7
30ml 以上	24	6

尿が30ml以上の残り30症例では伸び率が小さいことがわかった。弾性率の場合と同様に、残尿量30ml、伸び率1.40で4つのグループに分けて考えると(表3)、病的残尿を発生しない肥大症では伸び率は1.40以上と大きく、病的残尿を発生している症例では伸び率は1.40以下と小さいといえた(カイ二乗法検定、 $p<$

図9 伸び率と残尿量との関係

0.01).
引張り強度と残尿量との間には特に有意な関係はなかった。
つぎに、大変形の弾性理論を用いて、外科的被膜の

図10 病的残尿を発生していない症例群の理論的な前立腺容量内圧曲線

図11 病的残尿を発生している症例群の理論的な前立腺容量内圧曲線

引張り実験で描かせた応力-歪み曲線の最初の立ち上がりの部分から、球殻モデルと考えた前立腺の理論的な容量内圧曲線を、40症例についてパーソナルコンピュータを用いて描かせ、またこの曲線を特徴づけて

いる公式⑨の K と n を算出した (表1)。
前立腺の内圧曲線は、症例1~10のように病的残尿を生じていない場合には、平坦な曲線を描いた(図10)。症例11~40のように病的残尿を生じている場合には、立ち上がりの勾配が急峻でかつ内圧がプラトーになる

ときの内圧の値が大きい曲線を描いた (図11)。
ところでこの内圧曲線において、 K はプラトーとなる内圧の値がどれくらい大きいかをとおおむね表現し、 n はプラトーになるまでの曲線の曲がり具合を表現する値である。 K と残尿量との関係において(図12)、残尿の少ない前立腺肥大症(症例1~10)では K は小さく、残尿の多いもの(症例11~40)では K は大きかった。弾性率や伸び率の場合と同様に、残尿量30mlと K 8.0kg/cm²とで4つのグループに分けて考えると(表4)、病的残尿を発生しない前立腺肥大症では K が有意に8.0kg/cm²より小さく、病的残尿を発生しているものでは K が有意に8.0kg/cm²より大きいことがわかった(カイ二乗法検定、 $p<0.01$)。

n はほぼ3.0前後にかたまって存在していた(表1)ので、おおよそどの症例でも n はほぼ一定の値とみな

表4 K と残尿量との関係

K 残尿量		
	8.0kg/cm ² 未満	8.0kg/cm ² 以上
30ml 未満	9	1
30ml 以上	11	19

図12 残尿量と K との関係

せることがわかった。

考 察

緒言でも述べたように、経直腸の超音波断層法による前立腺肥大症の成り立ちの観察から、前立腺肥大症の病態はその大きさではなく、形態に依存していることが明らかにされ、仮想円面積比理論で前立腺肥大症の排尿障害の病態が説明されるようになったてきた。

斉藤らは残尿量と前立腺推定重量との関係を検討し、前立腺肥大症における排尿障害の程度はその重量に相関しないことを報告した²¹⁾。著者らは、肥大症前立腺重量や仮想円面積比とUPP (Urethral Pressure Profile) とを比較検討した結果、UPP 曲線から得られる有用な排尿障害のパラメータであるArea²²⁾ (曲線下面積)、FPL²³⁾ (Functional Profile Length) がいずれも前立腺重量とは相関せず、仮想円面積比と有意な相関をもつことを明らかにした²⁴⁾。さらに著者らは、前立腺重量や仮想円面積比とuroflowmeter (尿流量曲線) との関係についても調べ、排尿障害のパラメータである最大排尿量率/排尿量あるいは平均排尿量率/排尿量²⁵⁾と前立腺重量との間には相関は存在しないが、仮想円面積比との間には有意な相関があることも報告した²⁶⁾。このように述べてくると、仮想円面積比理論によって、前立腺肥大症の排尿障害の病態はすべて説明されたように思えるが、実際の临床上では、仮想円面積比が1.0に近いような症例において、意外にもまったく残尿が存在せず、本人の自覚症状もさほど強くない例がしばしばみられる。今回の40症例の検討でも、仮想円面積比が0.85以上と十分に高いにもかかわらず、病的残尿を発生していなかった肥大症が10例も存在した。

仮想円面積比理論と一見矛盾するこの現象を説明するために、第1報⁵⁾において、パルーン法による前立腺部尿道圧測定から得た前立腺圧曲線を用いて、前立腺圧係数という概念を提唱した。前立腺圧係数は仮想円面積比と有意な相関を示し、仮想円面積比が高く病的残尿を生じている症例では、前立腺圧係数は大きい。しかしたとえ仮想円面積比が高くても病的残尿のない症例では、前立腺圧係数は小さいことを報告した。すなわち、前立腺圧係数は、排尿開始動態において尿道が尿によって押し広げられるとき前立腺自体と容量が増加する、その時の前立腺内圧の上昇の程度を圧体積比として表現したものである。このように前立腺圧係数は、前立腺部尿道の排尿時の尿水力学的環境を一次

的に表現するパラメータであることがわかった。

さらに、第1報において前立腺圧曲線のパターンが残尿の少ない症例群と多い症例群とで明確に区別できたことより、以下の推察を行った。すなわち、外科的被膜が伸びやすい場合には、排尿動態において前立腺容量が増加する際の前立腺内圧、つまり尿道内圧の増加が少ないために、病的残尿を発生しない。一方、被膜が伸びにくい場合には、逆に尿道内圧の増加が多いために、残尿を発生するという考え方である。

この推論が正しいことを実証するために、今回第2報として、40症例の前立腺肥大症患者から得た外科的被膜の引張り実験を行った訳である。

材料の強さを研究する学問は材料力学と呼ばれているが、本学解剖学教室の山田 (故人) は、人体の器官や組織の強さを研究し、これを生物強弱学と名づけた²⁷⁾ (1939)。山田らは、現在までに運動器、循環器、呼吸消化器、泌尿生殖器、神経系、外皮、感覚器などあらゆる人体の臓器の引張り実験を行い、報告している²⁸⁾。

泌尿器科領域での引張り実験は、腎臓、尿管、膀胱については山田一派によって行われていた²⁹⁾ (浅見, 1961) が、前立腺については国内外を通じて検定されることがない。

山田らは、各器官に関して各年齢層での引張り実験を行い、得られた引張り強度の結果から臓器の加齢現象を説明した²⁹⁾。しかし、今回の研究はこれとは違い、外科的被膜の引張り実験から前立腺肥大症の排尿障害の病態生理を物理学的に解明しようとした、新しい発想によるものである。

微小発破による尿路結石の治療の研究の一環として、渡辺らは成犬およびヒト膀胱の引張り実験を行い、発破による尿路臓器の障害を調べるために膀胱の強度を検討した²⁰⁾ (1980)。その実験結果によると、膀胱の引張り応力-歪み曲線は、前立腺外科的被膜の場合と異なり、2相性で極限点に達するという。このように、外科的被膜と膀胱とで応力-歪み曲線の波形が異なるのは、前者は筋線維組織というひとつの組織体であるが、後者は粘膜、筋層、漿膜という材料力学的に組成の異なった組織の複合体であるためと考えられる。

前立腺外科的被膜の引張り強度は、平均13.6kg/cm²もあり、同じ泌尿器科臓器である膀胱、尿管 (短軸方向)、腎実質の、それぞれ約4kg/cm²、4.5kg/cm²、0.5kg/cm²²⁹⁾と比較して、格段に大きいものであった。つまり外科的被膜は、他の泌尿器科臓器と比べ、材料力

学的にみて強度の高いものであることがわかった。

今回、仮想円面積比が十分に高いもののみを選んだ40症例の残尿量と弾性率、最大伸び率の検討結果から、仮想円面積比が0.75以上と十分に高値を示す症例群において、残尿の少ない排尿障害の程度の弱い前立腺肥大症例では、その外科的被膜は伸びやすく、かつ伸びに対する余裕が十分に存在する、逆に残尿の多い排尿障害の程度の強い症例では、外科的被膜は伸びにくく、かつ伸びに対する余裕が失われてきているということが明らかになった。この結果は、まさに第1報における予測が正しかったことを示すものである。

さて、前立腺の外殻である外科的被膜が伸びやすい、あるいは伸びにくい場合、前立腺そのものの内圧（これは前立腺の真中を通過する尿道の内圧に等しい）は静止時にはあまり差はみられないが、これを動的にみると、たとえば排尿時のような、尿道の容量が微妙に変化する際には、かなりの差が生じてくるであろうことが想像される。この現象を検討するため、大変形の弾性理論を導入して40症例の前立腺容量内圧曲線を求めた。

外殻に対する内容を構成する腺腫の物理的性質は、引張り実験の実験成績から、大多数の前立腺肥大症例においてはほぼ同一であることが確かめられている³⁰⁾ので、前立腺肥大症を方法のところで述べた球殻モデルとして考えた。すると、病的残尿の発生していない症例では、理論的な前立腺の容量内圧曲線は平坦な曲線を描き、プラトー時の内圧の値も小さかった。一方、病的残尿を発生している症例では、急峻な立ち上がりの曲線を描き、プラトー時の内圧の値も有意に高かった。すなわち、いずれの肥大症症例でも圧力の公式⑨の n の値は3.0前後で一定であるが、 K の値は病的残尿を発生する症例としない症例との間で、 8.0kg/cm^2 という値を境界にして有意な差が存在した。

ここで、排尿時の前立腺部尿道の尿水力学的動態を考えてみると、排尿しようとする時尿道が押し広げられ、この圧力は内腺、さらには外科的被膜を押し広げようとする。つまり、排尿時には前立腺容量が増加し、この増加分に対して、外科的被膜の物理的性質に従って前立腺内圧（尿道内圧と等しい）が上昇する。前立腺容量内圧曲線において、 V_0 は前立腺内圧が $0\text{cmH}_2\text{O}$ となるときの前立腺容積であるが、臨床的におおよそ 20ml 程度であろうと予想してみる。このことと、各内圧曲線がおおよそ $5V_0$ までにプラトーに達することを考え合わせると、この排尿開始時の動態は、すべて、

前立腺内圧曲線の立ち上がりの部分に対応すると考えられる。したがって、 K が大きくて内圧の立ち上がりの急峻なものは、排尿開始時の容量増加に対して、大きく前立腺内圧が増加し、排尿障害の程度も強いと推察できる。ただし、 K と残尿量との間には正の有意な相関はみられない。

以上のことから、つぎのことがわかった。すなわち、前立腺肥大症の外科的被膜の1カ所より採取したその引張り試験片の性質が、前立腺外科的被膜全体にわたる性質を代表しうると仮定すると、仮想円面積比が0.75以上で十分に高値を示す前立腺肥大症症例において、その外科的被膜が伸びにくい性質をもつ場合は、排尿時尿道内圧が上昇して排尿障害の程度が強くなり病的残尿を発生する。逆に、伸びやすい性質をもつ場合は、尿道内圧はあまり上昇せず、したがって排尿障害の程度が弱くなり病的残尿を発生しないということが、今回の研究から証明された。

仮想円面積比が0.75以下の値を示す前立腺肥大症では、排尿障害はない。肥大症が成長して仮想円面積比が0.75以上の値を示すようになると排尿障害が出現する。しかし仮想円面積比が高値を示しても排尿障害のない症例も存在する。この症例でその外科的被膜の物理的性質を検討すると、仮想円面積比理論に従って病的残尿を示す症例のそれとは明確な相違が存在した。このように前立腺肥大症の排尿障害の病態は、仮想円面積比理論と外科的被膜の物理的性質の観点から完全に解明できたといえる。

また、残尿量の多寡から発展した仮想円面積比理論の正しさが証明されたことより、排尿障害の程度を、残尿量が 30ml 以下か以上かで2つに分けることも、尿水力学的にみて正しいことがわかった。19世紀にGujon（フランス）が前立腺肥大症の病期を、残尿量 30ml を境界線として第1期と第2期に分類したことは歴史の重みを超えた真理であり³¹⁾、彼がすでに前立腺肥大症の病態の本質を、直観的に見抜いていたことを証明するものである。

結 語

前立腺肥大症は、その内腺の成長に従って前立腺水平断面が丸くなり、すなわち仮想円面積比が高くなり、排尿障害の程度も強くなる。しかし、仮想円面積比が十分に高値を示しても病的残尿を生じない、仮想円面積比理論で説明不可能な前立腺肥大症も、临床上、多数存在する。そこで、今回、肥大症前立腺の外科的被膜の物理的性質に着目して、その引張り実験を施行し、

その実験成績から、十分に仮想円面積比が高値を示しても残尿を発生しない肥大症の外科的被膜は、病的残尿を発生している症例のそれと比べ、有意に物理的性質が異なることを実証した。

今回の研究により、前立腺肥大症の排尿障害の病態は、仮想円面積比理論と外科的被膜の物理的性質という2つの観点から、完全に説明できた。

稿を終えるにあたり、深甚なる御指導、御校閲を賜りました恩師渡辺 決教授に感謝の意を表します。また、直接御指導を頂いた大江 宏助教授ならびに、終始貴重な御助言を頂いた本学物理学教室沖 史也講師に深謝するとともに、研究に御協力いただいた教職員各位に感謝します。

本論文の要旨の一部は、第33回日本泌尿器科中部連合協会、第47回日本超音波医学会研究発表会において発表した。

文 献

- 1) 渡辺 決, 加藤弘彰, 加藤哲郎, 森田昌良, 田中元道, 寺沢良夫: 超音波断層法による前立腺診断. 日泌尿会誌, 59, 273—279, 1968.
- 2) 渡辺 決: 経直腸の超音波断層法の開発と応用. 日泌尿会誌, 65, 613—632, 1974.
- 3) 大西克実, 渡辺 決, 大江 宏, 斉藤雅人: 経直腸的超音波断層法よりみた前立腺肥大症における膀胱内突出の臨床的意義とその成り立ち. 日泌尿会誌, 76, 1194—1200, 1985.
- 4) 大江 宏, 斉藤雅人, 田中重喜, 板倉康啓, 渡辺 決: 前立腺肥大症の成り立ちと仮想円面積比. 日超医論文集, 32, 121—122, 1977.
- 5) 大西克実: 前立腺の物理的諸性質に関する実験的研究. 第1報: 前立腺圧係数と仮想円面積比よりみた前立腺肥大症における排尿障害の病態. 日泌尿会誌, 掲載予定.
- 6) 穴戸仙太郎: 恥骨後式前立腺摘除術. 泌尿器科手術の実際, 201—211, 南山堂, 東京, 1980.
- 7) 黒川一男: 恥骨後式前立腺摘除術. 新臨床外科全書13, II, 89—94, 金原出版, 東京, 1977.
- 8) 山田 博: 試験方法. 人体の強度と老化(生物強弱学による測定結果). 第1版, p4, 日本放送出版協会, 東京, 1979.
- 9) 大矢英次郎: 組織の強度試験における材料条件の影響についての吟味. 京府医大誌, 67, 1337—1364, 1960.
- 10) Yamada, H.: Strength tests. Strength of Biological Materials, 3-5, The Williams & Wilkins Company, Baltimore, 1970.
- 11) 内田 睦, 近藤和秀, 中河裕治, 藤戸 章, 北村浩二, 今出陽一郎, 河内明宏, 渡辺 決: 微小発破の生体応用に関する研究. 第11報, 実験用モデル結石の開発. 日泌尿会誌, 76, 1309—1313, 1985.
- 12) Watanabe, H., Akiyama, K., Saito, T. and Oki, F.: A finite deformation theory of the urinary bladder. Tohoku J. Expl Med., 135 : 149—154, 1981.
- 13) Watanabe, H., Akiyama, K., Saito, T. and Oki, F.: A finite deformation theory of intravesical pressure and mural stress of the urinary bladder. Tohoku J. Exp. Med., 135 : 301—307, 1981.
- 14) 斉藤 武, 沖 史也, 渡辺 決, 秋山喜久夫: 大変形理論を用いた膀胱の力学的性質. Studia Humana et Naturalia, 14, 37—45, 1980.
- 15) 斉藤 武, 沖 史也: 膀胱のひずみエネルギー密度関数. Studia Humana et Naturalia, 15, 35—42, 1981.
- 16) Valanis, K.C. and Landal, R.F.: The strain-energy function of a hyperplastic material in terms of the extension ratios. J. Appl. Physics, 38, 2997—3002, 1967.
- 17) Watanabe, H., Igari, D., Tanahashi, Y., Harda K. and Saitoh, M.: Measurements of size and weight of prostate by means of transrectal ultrasonotomography. Tohoku J. Exp. Med., 114, 277—285, 1974.
- 18) 渡辺 決, 猪狩大陸, 海法裕男, 棚橋善克, 原田一哉, 斉藤雅人: 超音波断層法による前立腺計測. 西日泌尿, 37, 222—232, 1975.
- 19) 川田雄一, 町田輝史: 応用とひずみ. 応用一ひずみ関係. 材料強さ学の学び方. 第1版, 1—58, オーム社, 東京, 1981.
- 20) 渡辺 決, 金子 宏, 渡辺康介, 秋山喜久夫, 近藤和秀, 内田 睦: 微小発破による尿路結石の治療. 臨床ME, 4, 402—408, 1980.
- 21) 斉藤雅人, 森 康行, 田中重喜, 大江 宏, 渡辺 決: 前立腺肥大症の超音波診断(第1報)一前立腺の大きさと残尿量一. 日超医論文集, 31, 229—230, 1977.
- 22) 米山威山: 積分器導入による Urethral pressure profile の定量化の試み. 日泌尿会誌, 70, 386—391, 1979.
- 23) 森田 勝, 吉岡 進, 岡本正紀, 別宮 徹, 越知憲治, 竹内正文: 排尿機構に関する臨床的検討. 第3報, 前立腺肥大症に対する臨床的検討. 西日泌尿, 43, 47—52, 1981.
- 24) 小島宗門, 大西克実, 大江 宏, 渡辺 決: 前立腺肥大症における経直腸的超音波断層法と尿道内圧曲線の比較検討, ならびに尿水力学の評価. 日泌尿会誌, 75, 1406—1414, 1984.
- 25) 南 光二, 金子茂男, 八竹 直, 栗田 孝: 排尿機構に関する検討. 第5報, 排尿機能検査よりみた成人男子下部尿路通過障害について. その1. 前立腺肥大症の検討. 日泌尿会誌, 69, 1079—1086, 1978.
- 26) 稲葉 正, 速水久嗣, 大西克実, 宮下浩明, 大江 宏, 渡辺 決: 前立腺肥大症の超音波診断(第5

- 報)一仮想円面積比と尿流量曲線一. 日超医論文集, 46, 819—820, 1985.
- 27) 山田 博: 生物強弱学とは. 人体の強度と老化(生物強弱学による測定結果). 第1版, p1, 日本放送出版協会, 東京, 1979.
- 28) 山田 博: 運動器の強さ. 循環器の強さ. 呼吸消化器の強さ. 泌尿生殖器の強さ. 神経系, 外皮, 感覚器の強さ. 同上, 5—148.
- 29) 浅見郁夫: 人の泌尿器の材料力学的研究. 京府医大誌, 70, 767—788, 1961.
- 30) 大西克実: 引張り実験よりみた肥大症腺腫の物理学的特性—前立腺の物理的諸性質に関する実験的研究(第4報)—. 日泌尿会誌, 投稿中.
- 31) 渡辺 決: 私の治療法. 前立腺肥大症の治療. その2. 臨床科学, 21, 258—216, 1985.
(昭和60年11月26日受付, 特別掲載)
-