

微小爆発による尿路結石の破砕

第1報 湿状態および乾燥状態における尿路結石の強度

生沼 仙三*, 金子 宏**, 古江 治美***, 渡辺 決**

尿路結石の圧縮強度, 弾性率, 吸水率, 重量減少率などを調べた。

その結果は, 吸水率 1.3~21.0%, 重量減少率 3.4~19.2%, 圧縮強度 11~16kg/cm²(乾), 6.6~36kg/cm²(湿), 弾性率 11.5~47.8×10⁹dyne/cm²(乾), 3.8~23.6×10⁹dyne/cm²(湿)であった。

1. 結 言

この研究は, 腎, 尿管, ぼうこうなどに存在する尿路結石を微小爆発の爆発によって破砕して取り除く技術を開発するものである。

犬などのぼうこうを使って実験した結果, 尿路結石は爆発破砕によって除去できそうなのが判り, これについてはすでに日本泌尿器科学会雑誌¹⁾に報告した。しかし破砕の最適条件即ち最小薬量で最大の効果を上げ, しかも人体には損傷を与えないような破砕条件を知るには, いろいろの大きさ, 硬さの本物の結石を使って多くの実験を重ねるのがよいのであるが, 結石の数には限度があるので, どうしても結石と同程度の強度のモデル結石を作って, それについて破砕実験をやることになる。そのためには, 先ず, モデル結石を作らねばならないが, それには結石を知る必要があるので, 結石の強度, 弾性率, 吸水率など, 二, 三の性質を調べてみることにした。

2. 方 法

2.1 実験材料

主に京都府立医科大学泌尿器科学教室において, 徹石手術によって採取された尿路結石16個を実験材料とした。採取後, 大気中に保存された結石を48時間生理食塩水に浸漬したものを湿状態の結石とした。さらに浸漬後, その結石を大気中にて22日放置乾燥したものを乾燥状態の結石とした。

2.2 結石成分の分析

昭和53年6月16日受理

*東京工業試験所保安環境化学部 神奈川県平塚市西八幡1-3-4番地

**京都府立医科大学泌尿器科教室 京都市上京区河原町通り広小路
上る礎井町465番地

***機械技術研究所材料物性課 東京都杉並区井草四丁目12番1号

結石の成分については, 赤外分光分析と線回折とによって分析を行なった。赤外分光光度計は, 日本分光KKIR-Sの型を使用し, KBr錠剤法で行なった。X線回折装置は理学電気機械KKのD-3F型を用いた。

2.3 結石の吸水率および乾燥時の重量減少率

吸水率は, 室温下で乾燥状態の結石を生理食塩水に浸漬して求めたが, 乾燥状態の結石の重量を W_0 とし, 浸漬開始後の重量を W_1 として W_1/W_0 の経時変化を測定した。

重量減少率については上記湿状態の結石の重量を測定して W'_0 とし, 大気乾燥開始後の重量を W'_1 として, W'_1/W'_0 の経時変化を測定した。

2.4 圧縮強度および弾性率

試料を概略の立方体に成形し, インストロンタイプの万能試験機, 島津オートグラフ IS-20T に装着し, ロードセル容量 500kg, フルスケール 10kg または 25kg, 負荷速度 0.5mm/min に設定して試料を圧縮し, 破断を生じた時の荷重と, 破断面の面積計測結果とから, 試料の圧縮強度を算出した。

弾性率は, 上記の試料圧縮過程における弾性限界内での応力歪み曲線の勾配より, 試料の圧縮弾性率を算定した。

結石には, 無層と有層のものがあり, 有層結石の場合はその測定に際し, 試料にかかる荷重の方向を十分考慮した。すなわち, 試料をおよその立方体に成形したのち, 有層の試料では, 層の走行面に対して平行に荷重を加えた場合を荷重の方向 A, 層の走行面に垂直に荷重を加えた場合を荷重の方向 B と規定した。無層の結石ではとくに荷重の方向を考慮せず, 立方体

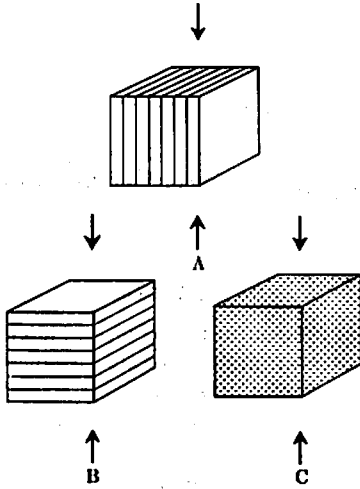


Fig. 1 Direction of compression.

の任意の一面に対して荷重を加えたが、この場合を荷重の方向 C と表現した。これらは Fig. 6 に示した。ただし、試料の大きさの問題から、同一試料で荷重の方向 A, B の全者について測定し得たのは、試料番号 11 および 14 の 2 試料のみであった。

3. 結果

3.1 結石の吸水率および乾燥時の重量減と減少率

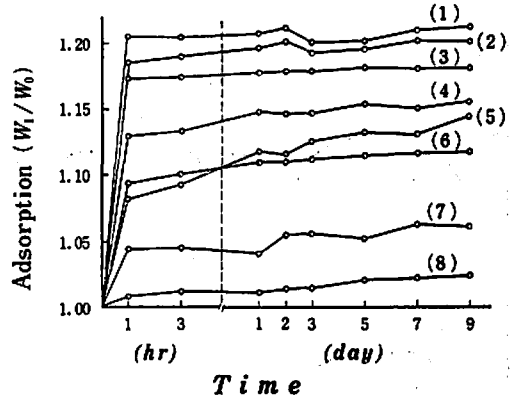
結石の吸水 (W_1/W_0) の経時変化は、Table 1-1, Fig. 2-1, 結石の乾燥時における重量減少 (W_1'/W_0') の経時変化は、Table 1-2, Fig. 2-2 のごとく表わされた。土木材料学の成書³⁾ にならって浸漬開始後 48 時間の $W_1 - W_0 / W_0 \times 100$ を吸水率と定義すると、結石の吸水率は、1.3~21.0% であった。また乾燥開始後 5 日の $W_0' - W_1' / W_0' \times 100$ を重量減少率と定義すると、結石の重量減少率は 3.4~19.2% で、この値は吸水率の高いものほど高く、吸水率が低いものほど低いという傾向を示した。

3.2 結石の圧縮強度および弾性率

試料として用いた結石は、分析した結果、下記 5 種類の成分のものであった。

Table 1-1 Variation of water adsorption rate with the time immersed in water

No.	1 hr	3 hr	1 day	2 days	3 days	5 days	7 days	9 days
1	1.205	1.204	1.206	1.210	1.200	1.201	1.209	1.212
2	1.185	1.190	1.196	1.201	1.193	1.196	1.202	1.201
3	1.173	1.174	1.177	1.178	1.178	1.181	1.180	1.181
4	1.130	1.133	1.147	1.145	1.146	1.153	1.150	1.155
5	1.082	1.092	1.117	1.115	1.125	1.132	1.130	1.144
6	1.094	1.110	1.109	1.109	1.111	1.114	1.116	1.117
7	1.044	1.045	1.040	1.054	1.055	1.051	1.062	1.060
8	1.009	1.012	1.010	1.013	1.014	1.020	1.022	1.023

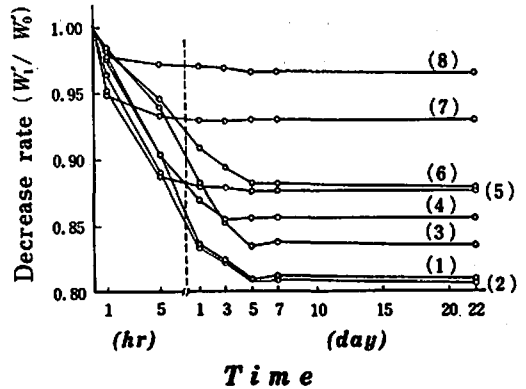


W_0 : weight of dry calculus
 W_1 : weight of absorbed calculus
 The numbers in the figure represent sample number of calculus.

Fig. 2-1 Variation of water adsorption rate with the time immersed in water.

Table 1-2 Variation of weight decrease rate with drying time.

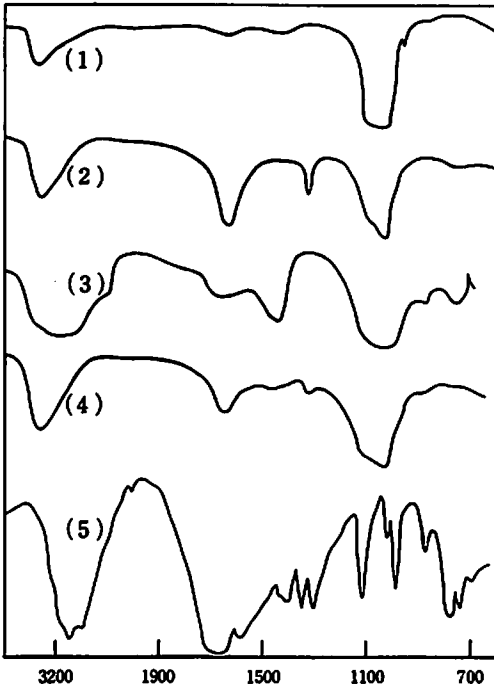
No.	1 hr	5 hr	1 day	3 days	5 days	7 days	22 days
1	0.975	0.903	0.837	0.824	0.810	0.812	0.810
2	0.966	0.892	0.836	0.823	0.808	0.809	0.807
3	0.984	0.940	0.883	0.853	0.836	0.838	0.835
4	0.976	0.915	0.870	0.864	0.856	0.857	0.856
5	0.952	0.888	0.880	0.879	0.876	0.877	0.877
6	0.981	0.946	0.908	0.894	0.882	0.882	0.879
7	0.948	0.933	0.930	0.929	0.930	0.930	0.929
8	0.977	0.972	0.970	0.969	0.966	0.966	0.964



W_0' : Weight of wet calculus
 W_1' : Weight of dry calculus
 The numbers in the figure represent sample number of calculus.

Fig. 2-2 Variation of weight decrease rate with drying time.

- (1) $Ca_3(PO_4)_2$ 1個
 (2) $Ca_3(PO_4)_2 + Ca(COO)_2$ 2個

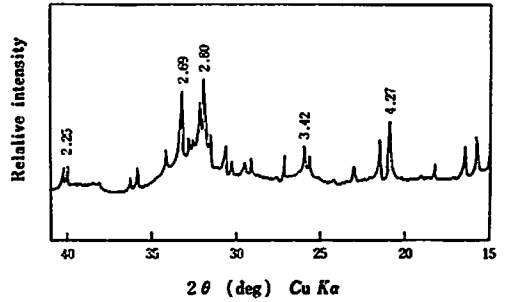


WAVENUMBER (cm⁻¹)

- (1) : Ca₃(PO₄)₂
- (2) : Ca₃(PO₄)₂+Ca(COO)₂
- (3) : Ca₃(PO₄)₂+MgNH₄PO₄
- (4) : C₃H₄N₂O₃

Fig. 3 Infrared spectra of calculi

- (3) Ca₃(PO₄)₂+MgNH₄PO₄ 1個
- (4) Ca₃(PO₄)₂+Ca(COO)₂+MgNH₄PO₄ 3個
- (5) C₃H₄N₂O₃ (尿酸) 1個



Chemical component : Ca₃(PO₄)₂+MgNH₄PO₄
Numerals near peaks indicate distance (A) between plane in crystals.

Fig. 4 X-ray diffraction pattern of calculus

これら試料の赤外分光分析と X 線回折の実例を Fig. 3, Fig. 4 に示した。

全試料の湿状態および乾燥状態における圧縮強度および弾性率を、結石の成分別に分類して Table 2 に示した。

圧縮強度、弾性率とともに成分による相違は認められなかった。乾燥状態における圧縮強度は、11~61 kg/cm² の範囲にあった。湿状態では、6.6~36kg/cm² と一般に乾燥状態に比べて低値を示した。Fig. 5 湿状態の値の乾燥状態の値に対する比（以下湿/乾と省略する）は、0.32~1.04（平均 0.67±0.26）であった。

乾燥状態における弾性率は、11.5~47.8×10⁹ dyne/cm² の範囲にあった。湿状態では 3.8~23.9×10⁹ dyne/cm² と、やはり一般に乾燥状態に比べて低値を示した (Fig. 6)。湿/乾は 0.26~1.10（平均 0.66±

Table 2 Compressive strength and modulus

No.	Component	Laminated Constitution	Direction of Compression	Compressive
				Wet Condition (kg/cm ²)
9	Ca ₃ (PO ₄) ₂ +Ca(COO) ₂	-	C	36
10		-	C	14
11	Ca(COO) ₂ +MgNH ₄ PO ₄ +MgNH ₄ PO ₄	+	A	6.6
12			B	15
13			C	26
14	C ₃ H ₄ N ₂ O ₃	+	A	15
			B	16
15	Ca ₃ (PO ₄) ₂	+	A	7.5
16	Ca(COO) ₂ +MgNH ₄ PO ₄	+	A	6.6

* : Ratio of compressive strength in wet to dry conditions.

** : Ratio of modulus of elasticity

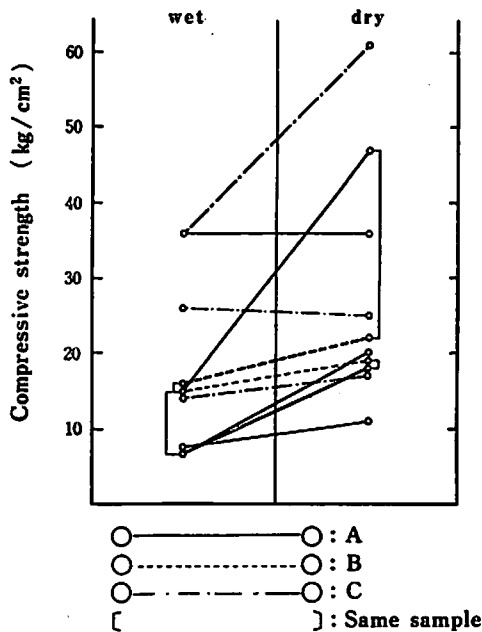


Fig. 5 Compressive strength in wet and dry condition.

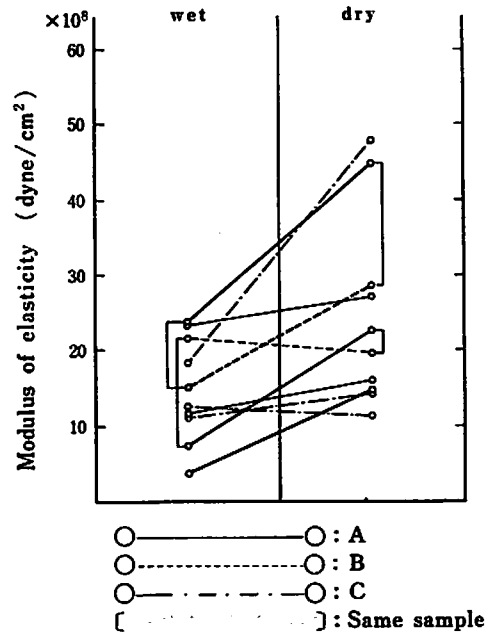


Fig. 6 Modulus of elasticity in wet and dry conditions.

0.30)であった。

荷重の方向別と圧縮強度、弾性率、および両者の湿/乾との間には、とくに関係はみられなかった。同一試料において、A、B 2種の荷重の方向につき検討した2試料の結果をみても、試料11が圧縮強度、弾性率ともほぼ $A \leq B$ 、試料14が両者ともほぼ $A \geq B$ という関係にあり、とくに一定の傾向はみられなかった。

結石の圧縮強度と弾性率の間にはある程度の比例関

係がみられ、乾燥状態から湿状態に移行するときは、この比例関係を保ちつつ圧縮強度と弾性率の両者ともに減少するものが多かった (Fig. 7)。また全試料における両者の湿乾は、かなり明らかな比例関係を示した (Fig. 8)。成分が $(4) \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + \text{Ca}(\text{COO})_2 + \text{MgNH}_4\text{PO}_4$ である3試料の湿/乾 (Fig. 8 の◎印) は、試料11の A を例外とすれば、いずれも圧縮強度、弾性率ともかなり高い値を示したが、これが一般的な傾向であるか否かについては、結論をくだすことはでき

of elasticity in wet and dry conditions.

strength		Modulus of elasticity		
Dry Condition (kg/cm ²)	wet/dry*	Wet Condition ($\times 10^8$ dyne/cm ²)	Wet Condition ($\times 10^8$ dyne/cm ²)	wet/dry**
61	0.59	18.5	47.8	0.39
17	0.82	12.5	11.5	1.09
18	0.37	7.5	22.6	0.33
19	0.79	21.5	19.6	1.10
36	1.00	23.4	27.1	0.86
25	1.04	11.2	14.4	0.78
47	0.32	23.6	44.9	0.53
22	0.73	15.2	28.6	0.53
11	0.68	11.7	16.0	0.73
20	0.33	3.8	14.6	0.26

n wet to dry conditions.

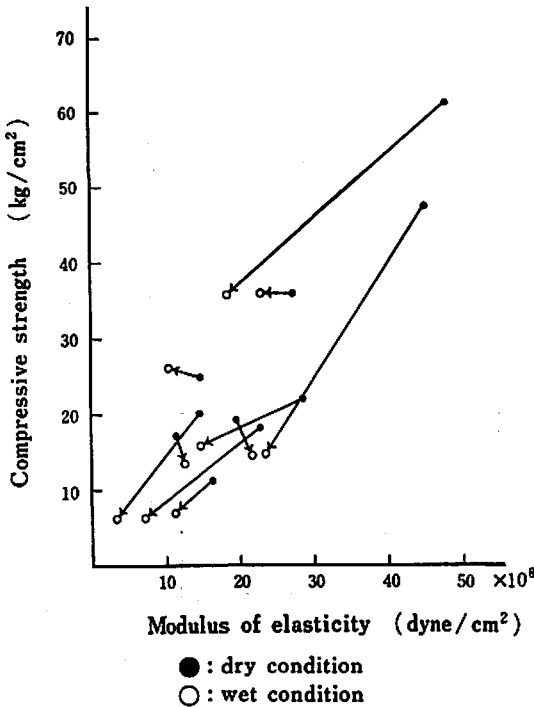


Fig. 7 Compressive strength vs. modulus of elasticity.

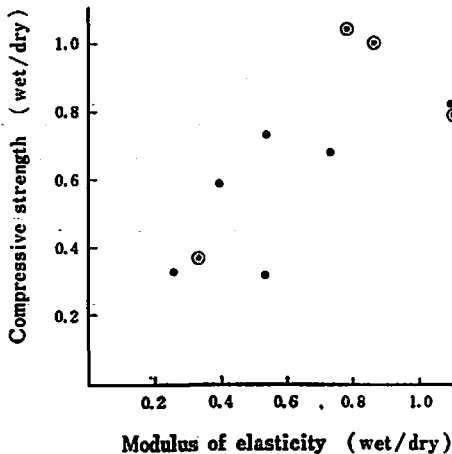


Fig. 8 Ratio of compressive strength in wet to dry condition vs. ratio of moduli of elasticity in wet to dry conditions.

なかった。

4. 考 察

結石の吸水率は1.3~21.0と、石材の中で最も吸水率の高い凝灰岩の値1.3~2.4⁴⁾に比べて高い値を示しているが、結石が湿状態で生成されることを考えると、これは当然ともいえる。また重量減少率も、吸

水率に比例した高い値を示していた。

今回測定試料においても、すでに報告²⁾した結果と同じく、結石の成分と圧縮強度、弾性率との間にはとくに関係はみられなかった。また今回の試料の乾燥状態における圧縮強度はいずれも65kg/cm²以下であり、低強度結石²⁾の範疇に入るものであった。

圧縮強度と弾性率はともに乾燥状態より湿状態の方が低い傾向を示した。中には湿状態の方が高い(すなわち湿/乾>1.0)試料も2, 3みられたが、これは例外的なものであると思われた。湿/乾の平均値は、圧縮強度が0.67、弾性率が0.66であった。すなわち結石の圧縮強度および弾性率は、平均して湿状態では乾燥状態のおよそ2/3に減ると考えて大過ないであろう。

有層の結石の場合、荷重を層の走行面に対して平行にかけたとき(A)と、垂直にかけたとき(B)とでは、当然(B)の方が強度も弾性率とも低いように思えるが、実際に測定した結果では一定の傾向がなく、同じ有層の結石でも荷重の方向(A)の方が強度が高いものと、逆に(B)の方が強度が高いものが混在するとしか考えられなかった。結石の有層構造は、強度の点からみた場合、それほど単純なものではないようである。

結石の圧縮強度と弾性率の間には、ある程度の比例関係がみられ、ことに湿/乾は、両者の間にかなり明らかな比例関係を示した。すなわち結石には、湿状態において乾燥状態より強度や弾性率が低くなるものとあまりならないものがあるが、低くなるものでは強度も弾性率も同様の比率で低くなるといえよう。この低くならないものの中に、偶然の結果かも知れないが、今回の試料では成分が(4) Ca₂(PO₄)₂+Ca(COO)₂+MgNH₄PO₄の結石が多くみられた。この点は今後の検討が必要であろう。

以上の結果をまとめると、結石破碎のための結石モデル条件としては、吸水率を考慮する必要はあるが、とくに層状構造の有無については考慮する必要はなく、強度は湿状態においてすでに報告²⁾した設定値と同じかあるいはやや低めでよいことになる。弾性率については、かなり広範囲のものを作る必要があるように思える。

5. 結 論

尿路結石の爆薬破碎実験に用いる結石モデルの作製を目的に、結石の吸水率、重量減少率、湿状態および乾燥状態における圧縮強度および弾性率を測定した。結果は次のごとくであった。

- 1) 結石の吸水率は1.3~21.0%であった。
- 2) 結石の重量減少率は3.4~19.2%であった。
- 3) 結石の圧縮強度は、乾燥状態で11~61kg/cm²、湿状態で6.6~36kg/cm²、湿/乾は0.32~1.04(平

均 0.67 ± 0.26) であった。

4) 結石の弾性率は、乾燥状態で $11.5 \sim 47.8 \times 10^8$ dyne/cm², 湿状態で $3.8 \sim 23.6 \times 10^8$ dyne/cm², 湿/乾は $0.26 \sim 1.10$ (平均 0.66 ± 0.30) であった。

5) 尿路結石破碎実験に用いるための結石モデルは、とくに層状構造とする必要はなく、その強度は湿状態においてすでに報告した設定値³⁾と同じかあるいはやや低めでよいと思われた。

文 献

- 1) 渡辺決, 生沼仙三, 日泌尿会誌, 68, 243 (1977)
- 2) 村田庄平, 渡辺決, 高橋徹, 渡辺康介, 古江治美, 生沼仙三, 日泌尿会誌, 68, 249 (1977)
- 3) 青木楠男, “土木材料” p.77 (1976), オーム社
- 4) 岡田清, 明石外世樹, 神山一, 児玉武三, “土木材料学” p.397, (1976), 国民科学社

Study on Lithotripsy by Micro Explosion (I) Strength of wet and dry urinary calculi

by Senzo Oinuma*, Hiroshi Kaneko**, Harumi Furue*** and Hiroki Watanabe**

As one of the fundamental researches for the development of microexplosion lithotripsy, we measured the water adsorption rates of 8 urinary calculi and their weight decrease rates in drying. And for other 8 urinary calculi, we also measured the compressive strength and the modulus of elasticity in dry and wet conditions. The results were as follows:

- 1) The water adsorption rate was from 1.3 to 21.0%
- 2) The weight decrease rate in dryness was from 3.4 to 19.2%
- 3) The compressive strength was, from 11 to 61kg/cm² in dry condition, from 6.6 to 36kg/cm² in wet condition. The ratio of compressive strengths in wet to dry condition was from 0.32 to 1.04 (mean 0.67 ± 0.26).
- 4) The modulus of elasticity was, from 11.5×10^8 dyne/cm² to 47.8×10^8 dyne/cm² in dry condition, from 3.8×10^8 dyne/cm² in wet condition. The ratio of the moduli in wet to dry condition was from 0.26 to 1.10 (mean 0.66 ± 0.30)
- 5) When a calculus model for destruction test is prepared, it might be not necessary to take the layered formation of calculus into consideration. The strength of the model in wet condition should be similar to, or slightly lower than the value estimated in the former report.

(* Natinal Chemical Laboratory for Industry, MITI, 1-3-4 Nishiyawata, Hiratsuka, Kanagawa

** Department of Urology, Kyoto Prefectural University of Medicine, 465, Kajicho, Kawaramachihirokojiagaru, Kamigyoku, Kyoto

*** Mechanical Engineering Laboratory, MITI, 4-12-1 Igusa, Suginami-ku, Tokyo)