

極細径超音波プローブによる尿路疾患診断法の開発

東北公済病院泌尿器科 (科長: 棚橋善克)

棚 橋 善 克

DIAGNOSIS OF URINARY DISORDERS USING ULTRA-THIN ULTRASOUND PROBE

Yoshikatsu TANAHASHI

From the Department of Urology, Tohoku Kohsai Hospital

We have developed a new diagnostic instrument, to visualize small or early lesions from inside by introducing a flexible ultra-thin probe (2 mm in diameter) into the urinary system. The frequency of the oscillator is 20 to 30 MHz, so the tomogram obtained by the method is extremely fine compared with the ultrasonogram obtained by the scanning from outside of the body.

Three-dimensional reconstruction of tomogram is also realized. This display method is valuable to plan operations, follow the progress of therapy, and obtain well informed consent from the patient.

We are now developing systems to bend and twist the tip of the intraureteral probe. They are applications of shape memory alloy, thermo-electric actuator and magnetic torque.

(Acta Urol. Jpn. 46 : 861-865, 2000)

Key words: Ureter, Ultrasound, Three-dimensional display, Active bending system

緒 言

牛乳瓶の底のような厚い眼鏡をかけた患者のHさんは、「先生が大好きだし、病院が楽しいから、家には帰りたくない」と、いつもいっていた。でも、やがてなくなって、寂しく家に帰ったのだった。その人は、腎盂腫瘍で手術をしたあとだった。そして、その時は、腫瘍の転移で入院していたのだった。われわれは、医学というものが時として実は無力であることを思い知らされた。

体外からの超音波やX線 CT, MRI などの画像診断で明瞭に描出可能なのは腎実質だけで、尿路の方は微細な変化まで描出することが難しいのはわかっている。でも、早期発見なくしては完治は有りえない。何とかしたい。そのようなやむにやまれぬ気持ちから、極細径超音波プローブを用いた腎盂 尿管内病変の体腔内走査式超音波画像診断法 (尿管内エコー法) の開発が開始された。

1. 尿管内エコー法の概念と極細径プローブの諸方式

1-1) 尿管内エコー法の概念

遠くから観察するより、近くから観察した方が正確な情報を得られることは多い。たとえてみれば、遠くの木を葉を双眼鏡で観察するより、近くによって見れば虫食いの穴まで観察可能なのとよく似ている (Fig. 1)。そこで、極細径超音波プローブを、ちょうど尿管

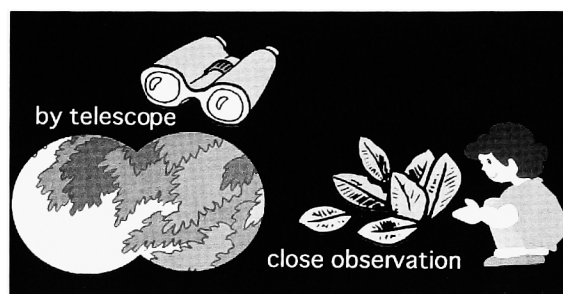


Fig. 1. Magnified observation. Magnified observations give us more detailed information.

カテーテル法と同様に直接尿管内に挿入し、ごく近傍から腎盂・尿管の断面像を描出させようともくろんだのである。

1-2) 極細径超音波プローブの諸方式

細径体腔内走査式超音波映像装置のプローブの形態としては、4つの方式が考えられる (Fig. 2)。

1-2-1) 電子走査方式

電子走査方式としては、

①微小なプローブをリニアに配列し、リニアスキャンニングを行う方式と、

②微小なプローブを円状に配列し、ラジアルスキャンニングを行う方式が考えられる。

いずれの場合でも尿管内に挿入するプローブの大きさの制約から (直径 3 mm), 振動子の数を多くすることが難しく、得られる画像の質は粗いものになってしまう。

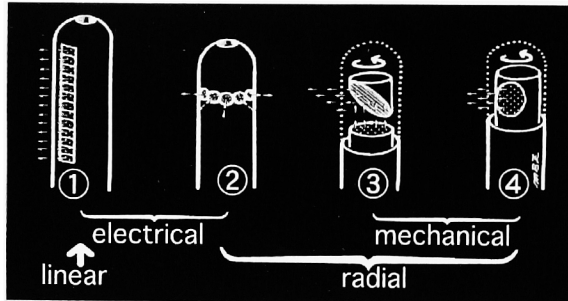


Fig. 2. Four scanning types using ultra-thin probe. ① electrical linear type, ② electrical radial type, ③ mechanical radial type with a reflecting mirror, ④ disc rotating mechanical radial type.

1-2-2) 機械式走査方式

そこで、小さな振動子を一個用い、

③超音波ビームを音響ミラーを用いて反射させ、音響ミラーを無限回転させることによりラジアルスキャンニングを行う方式と、

④振動子自身を無限回転させることによりラジアルスキャンニングを行う方式とが考えられる。

③と④の方法を比較した結果、空間分解能と診断距離の両方を満足させるためには、④の方式が有利なことが判明し、この方法を採用した。

2. 極細径プローブの構造

プローブの先端には、直径 2 mm の方形振動子を装着し、この振動子を無限回転させつつ、ちょうどレーダーのように腎盂・尿管の横断面を描出させるようにした。振動子の回転数は 6~10 回/秒とし、周波数は、15, 20, 30 MHz のものを検討した。プローブは、柔軟性を損わず回転できるよう、2重反転螺旋構造とした。先端の振動子への信号伝達系は、このシャフトの内部に這わせるようにした。画像データは、480×480ピクセル、8 bit (256階調) でコンピュータに取り込み、これを画像処理して円形表示させるようにした。

この方式では振動子の前面に高分子チューブが位置することになるが、高分子チューブ内を十分な液体で置換して気泡を追出すことにより、多重反射や高分子チューブの屈折や回折の影響をほとんど受けることなく、画像の描出は満足のものとなった。

3. 正常の尿路像

正常の腎盂・尿管は、通常内腔側より、高輝度層、低輝度層、高輝度層の 3 層性に描出される (Fig. 3)。なお、最内側の高輝度層は、ごく薄い。このうち、最内側の高輝度層は尿路内腔と尿路粘膜との境界エコーである。低輝度層は、尿路粘膜・粘膜下層・筋層に相当する部分である。外側の高輝度層は、筋層と外膜

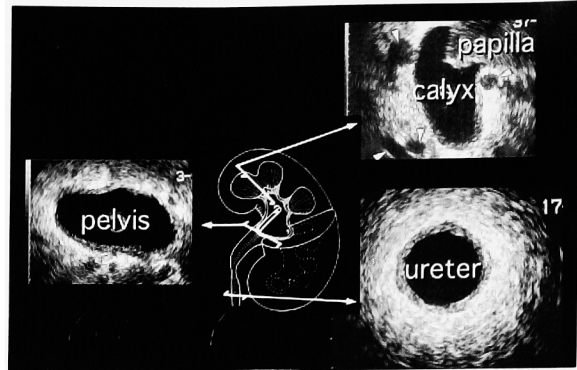


Fig. 3. Cross sections of normal urinary system. Normal urinary system has a three-layer composition.

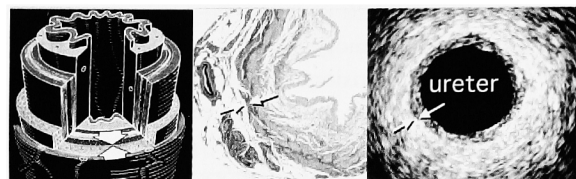


Fig. 4. Origin of high-echo layer. The outermost high-echo layer represents reflection between muscle layer and adventitia.

(adventitia) との境界エコーである (Fig. 4)。

腎盂・尿管の断面は、常にその径を変化させている。これは、腎盂・尿管の蠕動運動のためである。

一方、腎杯は、腎盂・尿管に比べて低輝度層の厚さが薄い。また、蠕動運動もないので、その径の太さの変化もない。腎杯の先端部には、腎乳頭が低輝度の円錐状の突出物として描出される (Fig. 3)。

4. 各種病態での超音波像

4-1) 腎盂尿管腫瘍

20~30 MHz と通常の超音波診断装置にくらべて、はるかに高周波の超音波を用いているので、小さな病変の診断が可能であり、また浸潤の程度 (Fig. 5) も明瞭に描出できる。

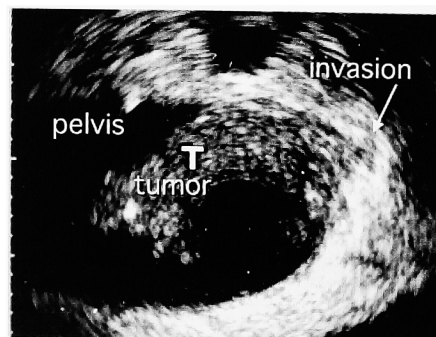


Fig. 5. Pelvi-ureteric tumor. A renal pelvic tumor with an invasion outside of the wall.

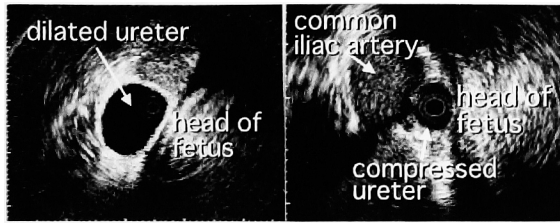


Fig. 6. Ureteral stricture. Stenosis of the ureter caused by compression from the head of the fetus. Upper part of the ureter than the head of the fetus is dilated.

4-2) 嚢胞性疾患

X線 CT や MRI では、充実性腫瘍と鑑別のしにくい小さな傍腎盂嚢胞なども、確実に診断できる。

4-3) 尿路結石

尿路結石は、体外からの超音波診断と同様に、音響陰影をともなった高輝度像としてとらえられる。

4-4) 尿管狭窄

体腔内からの観察により、診断の容易化、治療方針の決定が容易化が計られる。Fig. 6 に、胎児の頭による尿管の圧迫像を示した。

4-5) 体外衝撃波結石破碎法への応用

ESWL (体外衝撃波結石破碎法) は、尿路結石の標準的な治療法として定着している。しかし、その強大なエネルギーが、結石以外の臓器に対して悪影響を及ぼす生体作用も懸念されている。

体外衝撃波結石破碎法 (ESWL) 術中に、尿管内エコー法を行うことにより、結石破碎状況を逐次観察することができるので、衝撃波の shot 数を必要最小限にとどめ、衝撃波による副作用の発生を防止することに役立つ。この場合、振動子の破損を避けるため、振動子は常時結石のそばに置くことなく、ときどき結石に近づけて観察することになる。

5. 三次元画像化

通常の超音波画像は二次元画像である。すなわち、得られた複数枚の画像から、検者が頭の中で立体的な構造をイメージするという過程を経て、はじめて診断が成り立つのである。

しかし、超音波画像を三次元映像として描出できれば、より直観的、より正確に病態の把握が可能となる。また、解剖学的知識のほとんどない患者へのインフォームドコンセントにも役立つことになる。

正確な三次元画像を再構築するためには、一定間隔で連続した二次元画像を得る必要があり、尿管内エコー法の場合にはスパイラルスキャンニングで走査している。三次元映像化の実例として、尿管腫瘍 (Fig. 7)、尿管瘤 (Fig. 8) の症例を呈示する。

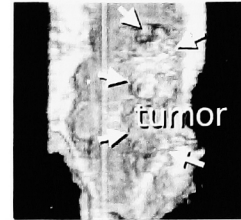


Fig. 7. Ureteral tumor (3D image). Longitudinal expansion of a tumor is well displayed by 3D image.

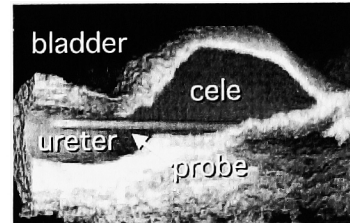


Fig. 8. Ureterocele (3D image). Inside of the cele is well demonstrated. Difference in thickness between normal ureter wall and the cele wall is well shown.

6. 屈曲機構の開発

上記のごとく、多くの利点を持つ尿管内エコー法はあるが、最大の欠点は、先端の超音波振動子の部分が屈曲できないことである。このため、すべての腎杯を観察することは難しい。そこで、現在、いくつかの方式による先端部の屈曲機構の開発に取り組んでいる。

6-1) 形状記憶合金コイルを用いた能動屈曲機構 (Fig. 9)

形状記憶合金の細いコイルを120度ずつ配置してある (Fig. 9a)。このコイルに通電することにより、通電したコイルが収縮し、その方向へ屈曲動作を行なわせる。3つのコイルそれぞれに通電した場合には、120度ずれた3方向への屈曲動作となる。隣り合った

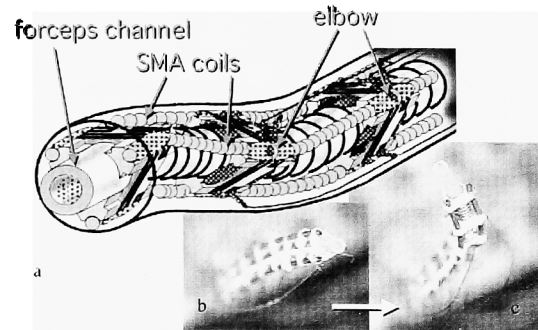


Fig. 9. Bending system using SMA (shape memory alloy) coils. The shape memory alloy coil can be bent toward any desired direction by inducing electric current to it. The thin probe can be directed to any desired target (a). Multiple coil segments (b, c) allow free movement.

二つのコイルに同時に通電する方法も用いれば、60度ごとの6方向への屈曲動作が可能となる。隣り合った二つのコイルへの電流値をコントロールすれば、あらゆる方向への屈曲が可能となる。

コイルを幾つかのブロックにわけておき、それぞれのブロックごとに通電状況を変更することにより、ブロックごとに屈曲方向をかえることができるので、ちょうど蛇のように、“くねくね”とした屈曲動作も可能となる (Fig. 9b, c).

欠点は、機構が複雑なことである。

6-2) 熱運動素子を用いた能動屈曲回転機構

ここでは、ペルチェ素子と形状記憶合金を組み合わせたモジュールを用いる。ペルチェ素子とは、P型とN型の半導体を交互に電極で結合し通電することにより、一方から他方へ熱の移動を起こす素子である。電流の方向を逆にすることにより、熱の移動方向も反転する。このペルチェ素子を4個同じ階層に配列し、そのペルチェ素子の間に形状記憶合金ワイヤーを組み込んだ多段式のモジュールを作製する (Fig. 10a)。形状記憶合金ワイヤーにはあらかじめ横方向あるいは螺旋方向などの記憶をさせておく。1本のワイヤーに隣接する2個のペルチェ素子に通電することにより、その間に位置する形状記憶合金が加熱され、形状をあらかじめ記憶させた方向にモジュールが屈曲する。この方法の最大の利点は、屈曲動作のみならず回転動作も可能なことである (Fig. 10b, c)。

6-3) 磁気トルクを利用した能動屈曲反転機構

磁界には2つの作用がある。ひとつは吸引反発力で

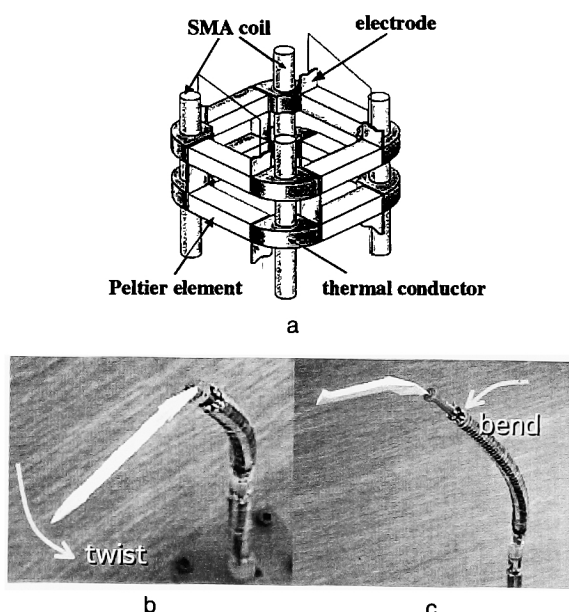
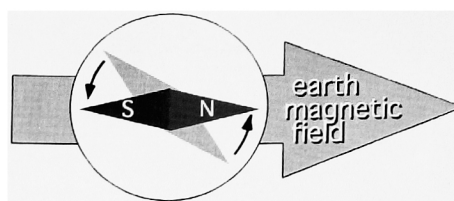


Fig. 10. Bending and twisting system using thermoelectric actuator. Arrangement of Peltier elements and SMA wires (a). Both twisting action (b) and bending action (c) are available.



a

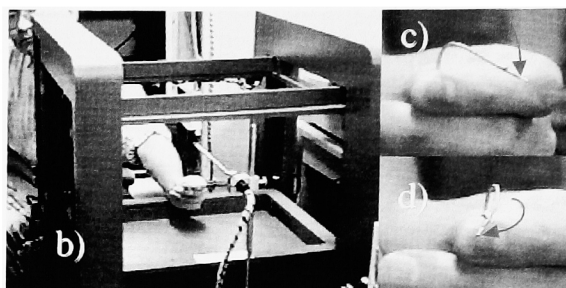


Fig. 11. Bending and reversing system using magnetic torque. Magnetic torque is a force created by a constant magnetic field (a). A pair of magnetic coils produces flexion up to 90 degrees (b, c). Three pairs of magnetic coils can produce flexion over 90 degrees (d).

あり、もうひとつは磁気トルクである。吸引反発力とは、N極とS極が引き合ったり、N極とN極あるいはS極とS極が反発しあう力であり、磁気トルクとは磁針が磁界と平行となろうとして働く回転力である (Fig. 11a)。

能動屈曲機構としては、内視鏡の先端に磁性体を装着し、磁界を発生させるための対向コイルと組み合わせる。対向コイルに流す電流値を変えることにより、磁性体に作用する磁気トルクを自由に制御できる。また、対向コイルを2軸にすることにより、体の前後 左右と、自由に先端部を屈曲できる。さらに、3軸の対向コイルを用いることにより、屈曲のみでなく、反転動作も可能となる (Fig. 11b, c, d)。

結 語

1. これまで不可能であった、尿管内の微小病変の描出を可能とする尿管内エコー法を開発した。
2. 尿管内エコー法により得られる画像の実際例を呈示した。
3. 尿管内エコー法の三次元化について述べた。
4. 腎下極の腎杯も描出すべく、現在開発中のプローブ先端部の屈曲機構について述べた。

なお、本研究は、圓山垂直・高木敏行 (東北大学流体科学研究所)、石山和志・荒井賢一 (東北大学電気通信研究所)、芳賀洋一・江刺正喜 (東北大学未来科学技術共同研究センター) と共同で行われた。

文 献

- 1) 棚橋善克, 折笠精一: 尿管内走査式超音波映像法と前立腺内血流同時2断面映像法. *Innervation* **6**: 22-51, 1991
- 2) 沼畑健司, 棚橋善克, 千葉 裕: 体腔内走査により腎盂尿管の超音波診断. 日超音波医学会回研発表会講論集 **58**: 291-292, 1991
- 3) 棚橋善克, 伊藤雅敏, 梁 端穂, ほか: 尿管内走査式超音波映像システム. 日超音波医学会回研発表会講論集 **60**: 123-124, 1992
- 4) 棚橋善克, 毛 厚平, 伊藤雅敏, ほか: 尿管内超音波映像法を用いた体外衝撃波結石破碎術の術中モニタリングシステム. 日超音波医学会回研発表会講論集 **61**: 241-242, 1992
- 5) 棚橋善克, 毛 厚平, 坂井清英, ほか: 細径内視用プローブによる経尿管式超音波断層像の解析. 日超音波医学会回研発表会講論集 **62**: 147-148, 1993
- 6) 田岡佳憲, 棚橋善克, 坂井清英, ほか: 細径内視用プローブを用いた尿管内エコー像の3次元表示. 日超音波医学会回研発表会講論集 **63**: 661-662, 1993
- 7) 棚橋善克, 坂井清英, 田岡佳憲, ほか: 尿管内エコー法の開発(その有用性と安全性について). *医のあゆみ* **167**: 145-146, 1993
- 8) 棚橋善克, 坂井清英, 田岡佳憲: 尿管病変の診断. *臨検* **38**: 1289-1293, 1994
- 9) Tanahashi Y: Intraureteral ultrasonography. *Ultrasound International* **1**: 86-92, 1995
- 10) 棚橋善克, Macedonia CR, 豊田精一, ほか: 泌尿器科領域における3D超音波(その5). 3D-Volume情報のVirtual Realityを用いた解析. *超音波医* **25**: 556, 1998
- 11) 棚橋善克: 尿管内エコー法施行上のコツ 臨床泌尿器科のコツと落とし穴(検査・診断法 薬物療法), 中山書店, pp 4-5, 1999
- 12) 棚橋善克: 尿管内エコー法. *新超音波医学* **4**, 医学書院, pp 182-185, 2000

(Received on October 12, 2000)

(Accepted on November 10, 2000)