超音波 B モード・パルスドップラー複合装置を 用いた移植腎血流測定法

近畿大学医学部泌尿器科学教室 (主任：栗田 孝教授)	秋	山	隆	弘
	西	岡		伯
	石	井	徳	味
	植	村	匡	志
	国	方	聖	司
	神	田	英	憲
	金	子	茂	男
	松	浦		健
	栗	田	孝	

MEASUREMENT OF RENAL TRANSPLANT BLOOD FLOW BY ULTRASONIC DUPLEX SYSTEM COMBINED DOPPLER FLOWMETER WITH B-MODE SCANNER

Takahiro Akiyama, Tsukasa Nishioka, Tokumi Ishii, Tadashi Uemura, Seiji Kunikata,
Hidenori Kanda, Shigeo Kaneko, Takeshi Matsuura and Takashi Kurita

Department of Urology, Kinki University School of Medicine
(Director: Prof. T. Kurita, M.D.)

An ultrasonic duplex system, a pulsed Doppler flowmeter combined with a real-time B-mode scanner, has been used for the renal transplant blood flow measurement. We report the details of the method to detect transplant vessel echos and to measure these blood flows. Typical Doppler flow patterns from perirenal, renal hilar and intrarenal vessels are showed herein.

Several advantages of the ultrasonic "duplex" system are:

- 1) We can identify accurately the object from which vessel Doppler signal is issued out. Therefore, we can avoid to mistake the signals of extrarenal vessels for those of intrarenal vessels.
- 2) Arterial blood flows from the renal hilum, central echo and renal parenchyma can be measured individually. Consequently, intrarenal hemodynamics might be evaluated noninvasively.
- 3) Doppler signal can be detected far easily by B-mode combined use. Then examination requires neither technical facility and training nor lengthy time.
- 4) Canine experimental study suggests that parenchymal microcirculation in the renal cortex will be evaluated if the method becomes more sensitive and precise.
- 5) Renal blood flow volume will be measured quantitatively by this equipment if hilar blood vessel echo can be depicted in B-mode.

In clinical kidney transplantation this apparatus will be useful to investigate the pathophysiological hemodynamics in rejection, post transplant ATN and renal arterial thrombosis.

要旨：パルスドップラー血流測定装置とリニア電子スキャン方式 B モード超音波断層像観測装置を組み合わせた複合装置である超音波 duplex system を用いて、腎移植患者29症例で移植腎血流測定を試みその手技を確立した。本著ではその手技の紹介と共に移植腎周囲、腎門部、腎内分枝などの諸血管から得られるドップラー血流パターンの差異の提示を行った。

B モードを同時併用しない従来よりのドップラー血流測定法に比較して本 duplex system 導入で可

能になった点は、単にドップラーシグナルを得るための腎血管の位置探策が熟練を要することなく容易で迅速に行えるようになっただけでなく、そのシグナルがどこから得られた情報かということが正確に同定できるようになったこと、それに伴い腎内血行動態すなわち腎門部血流と腎内末梢循環を分けて知りうるようになったことなどである。これらから、腎移植の臨床において本法は拒絶反応、移植後 Acute tubular necrosis (以後 ATN と略す)、腎動脈血栓症などにおける腎内血行動態の病態生理を追究するのに有用と考えられた、更に、臨床例の検討・動物実験を通じ本法による腎血流量の定量的測定、腎皮質内微小循環の評価についてもその可能性を示唆し、duplex system は機能画像診断法とも呼ばれるべき新世代の超音波診断技術であることを強調した。

緒 言

腎移植の臨床における超音波検査法の応用は、腸骨窩という体表近くに臓器が位置することから比較的好都合で、経皮的超音波断層法による B モード画像診断が早くより行われている。われわれは本法により移植腎腫大を定量的にとらえ拒絶反応の診断を行うと共に、種々の合併症、特に腎周囲リンパのう腫・尿貯留腫や水腎症の発見などに応用を行ってきた^{1)~4)}。一方、腎移植への超音波のもう一つの応用法にドップラー法による移植腎血流測定法がある。Sampson ら⁵⁾、Arima ら⁶⁾⁷⁾、井原ら⁸⁾は拒絶反応や死体腎移植後無尿期 (ATN) の際の腎血流の変化を観察し、ドップラー血流パターンのパラメーターによる解析から移植腎の予後判定まで本法の応用範囲を拡大している^{6)~8)}。

さて、最近上記の B モード断層像観測装置とパルスドップラー血流測定装置を組み合わせた複合装置 (超音波 duplex system と称される) が開発され、1980 年頃から心臓用を中心として実用化されるようになった。今回、当科に導入された超音波 duplex system を用いて当科における腎移植患者に対し移植腎血流測定を試みた結果、ドップラーモードと B モードを同時測定することによるさまざまな利点を見出した。今までに duplex system による移植腎血流測定についての報告は本邦内外を通じて見られずわれわれの報告⁹⁾が最初かと思われ、本著では本測定法の手技と機能を紹介しその特徴について考察する。

測定法と対象

1) 装置

今回使用した装置は森安ら¹⁰⁾と、東芝超音波技術部の共同研究により開発された duplex system である、SAL-50A/SDL-01A system (東芝製) である。B モードはリニア電子スキャン方式、発振周波数 5.0MHz、くりかえし周波数 4.39KHz であり、ドップラーモードは発振周波数 2,268MHz、くりかえし周波数 4/6KHz で距離分解能を有するパルスドップラー法によった。両

Fig. 1 Combined probe for duplex system. B-mode electronic linear scanning probe (left) and pulsed doppler probe (right).

探触子は合体固定され同時測定でき、ドップラー用超音波ビームは 55° の入射角で B モード像上を斜走する (Fig. 1)。

本装置のディスプレイは B モード・M モード・ドップラーモードの 3 種の画像の同時表示からなる。B モード像はリニア電子スキャンによるリアルタイム断層像で、その画像上にドップラー用超音波ビームの入射径路が表示される。その線上にドップラーシグナルをサンプリングする領域を指示するマークが表示される。M モード像はドップラービーム入射径路上の M モード表示で、ドップラーシグナルのサンプリングマークが B モード像上の血管断面に合致しているかを確認し、或いは微調整するためのものである。ドップラーモード像には B モード・M モードで部位の同定された血管からえられるドップラー信号が表示される。ドップラー信号の表示方法は種々の選択が可能であるが、今回の検討では主としてスペクトラム表示を用いた。血流波型パターンはドップラースペクトラムから判断し、付設された line scan recorder に併せて記録されたスペクトラム画像より血流パターンの諸コンポーネントの分析、パラメーターの詳細な解析が可

能である。

2) 手技及び対象

検査は患者を安静仰臥位にし、腸骨窩の移植された腎の部位に探触子をあてて行った。手順は、先ずBモード断層像の観察をスクリーニングとして行い、腎及びその周囲のfluid collectionを中心とした異常病変の有無を確かめた。次いで外腸骨動静脈、移植腎動静脈(内腸骨動脈)及び腎内分枝血管を血管断面像或いは拍動のみられる血管壁エコー像を目標として断層像上で識別し、Mモード画像を参考としながらドップラー信号のサンプリングマークを目標部位に合致させ血流測定を行った。検査に要した時間は通常約10~15分である。対象とした患者は過去10年間に近畿大学病院泌尿器科において生体腎あるいは死体腎移植を受けた45症例中本検査法を施行開始後の29症例である。年齢は11歳から56歳までで、小児でも充分可能であった。

3) 動物実験

上記装置を用いて犬においてin vivoでの阻血操作、ex vivoでのポンプによるヘパリン血灌流下の腎血流測定実験を行った。目的は、実質内微小循環の良否を本装置で判定しうるかどうかを知ることである。

結 果

1) 移植腎動静脈血流の同定

移植腎の深部に並行して走る外腸骨動・静脈は断層像上にてほぼ全例で明瞭に描出可能である(Fig. 2)。一方、総腸骨動脈より分枝する移植腎動脈(内腸骨動脈)の像は、血管吻合後の走行位置・角度の偏位に個人差もあって移植腎外の本幹部で全例必ずしも描出できるとは限らないが探触子の方向を工夫すれば症例により描出できる(Fig. 3: 腎動脈と外腸骨動脈が同一

画像上に描出されている)。また、それにつづき移植腎エコー内で血管の縦走断面或いは拍動する血管壁エコーがどの症例でも容易にみられる(Fig. 5b)。ただし、腎内よりえられる血管像を含めて拍動の確認されない場合にはBモードだけでは動・静脈の識別はできない。

これらの諸血管からえられるドップラースペクトラムは動脈に関しては腎動脈(分枝を含む)と外腸骨動脈で全く異なる血流パターンを示すことが確認された。すなわち、外腸骨動脈では収縮期の流速の大きい成分とそれにつづく拡張期の逆行成分ならびに最後の小さい順行成分の計3相からなる血流波型を示すのが特徴的で、これは従来からよく知られている基幹動脈の波型と合致する(Fig. 2a, Fig. 3a)。これに対し、腎動脈やその腎内分枝のドップラースペクトラムは本幹と分枝を問わず基本的には共通の波型を呈し、収縮期の流速の大きい成分と拡張期の流速の小さい成分からなる2相波型であった(Fig. 3b, Fig. 5)。Fig. 3a, bでは同一断層像上に現われた両系動脈より別個に採取した二種の波型が対比されており、この例のごとく断層像での血管の局在認識と血流波型の認識の両者を合わせることで移植腎由来のドップラースペクトラムの同定は誤認の余地のない所となり、この点はduplex systemの最大のメリットの一つといえる。

静脈に関しては、外腸骨静脈(Fig. 2b)・腎静脈(腎内分枝を含む, Fig. 4)共にその波型は共通で、ほぼ定常流のパターンを呈する場合と隣接する動脈の拍動の影響を受けるか、またはその動脈よりのシグナルの混入のため弱い脈動流のパターンを呈する場合がある。

2) 移植腎内分枝の部位別血流測定

Fig. 2 Doppler spectrograms from external iliac artery (a) and external iliac vein (b).

a. 外腸骨動脈

b. 外腸骨静脈

Fig. 3 Doppler spectrograms from external iliac artery (a) and mate internal iliac artery followed by transplant renal artery (b).

Fig. 4 Doppler spectrograms from renal transplant veins including intrarenal branches.

移植腎からの血流シグナルは上述のごとき腎門部血管だけでなく、腎実質エコー部を含めた腎臓内のいろいろな部位から採取可能であることが今回の検討で判

明した。そこでBモード移植腎エコー像上で、①腎門部に相当する部位、②中心エコー内、③腎実質と考えられる均一エコー像部に大別してそれらの3領域から

動脈血流ドップラー測定を行うことを試みた (Fig. 5a, b, c). これらの血管の探索はしごく容易で, 血管断面像或いは微妙な画面の拍動像を指標にサンプリングすればほぼ目標とする血管のシグナルがえられる。腎被膜に比較的近い部位で腎皮質とみなしてよい領域からも, 血管断面の描出は無理であるが random な探索でほぼ全例に末梢分枝血流と考えられるドップラーがえられた。これら3領域からのドップラーは各々①腎動脈から区域動脈への分岐部まで, ②区域動脈から葉間動脈の一部まで, ③葉間動脈から弓状・小葉間動脈までの各分枝由来の血流に相当していると推測している。Fig. 4の例で示されるように末梢部の血流速は中枢部に比較して遅い(収縮期のピークの高さが低い)のが通常であった。腎機能の不良な例ではときに末梢部で異なった血流パターンを呈したりドップラーシグナルそのものの検出が困難な例があることなど, 腎門部と末梢分枝で必ずしも同じ波型がえられるとは限らない。これらの中心部と末梢部の血流パターンの解離症例の発見も本 duplex system 応用の大きな利点で, その詳細と意義については次報で述べたい。

3) 移植腎実質内微小循環測定を試み

更に, 腎実質内で明確な動脈血流シグナルのえられる部位を避けて腎実質部そのものからえられるドップラーシグナルを観察し, 実質内の微小循環状態に関する情報が本法で把握できるかどうかの検討を試みた。Fig. 6に臨床例での実質ドップラーの実例を示すが, 現装置での多数例の検討の結果ではノイズと血流自身によるものとの鑑別に問題点があり, それ以前の段階

Fig. 5 Doppler spectrograms from renal hilar artery (a), main branch artery in the central echo (b) and peripheral branch artery in parenchymal echo (c).

Fig. 6 Doppler spectrograms from renal parenchyma itself excluded apparent vessel echo.

腎実質ドプラ・シグナル

Fig. 7 Doppler spectrograms from ex vivo perfused canine kidney (upper: pump on, middle: pump off) and in vivo canine kidney (lower).

でもそも毛細血管の微小循環レベルの血流が本装置の性能で捕捉可能かどうかが不明な所である。

そこで成犬腎を用いて in vivo, ex vivo での測定実験を行った。Fig. 7 下段に示す in vivo での腎基部阻血実験では明瞭な結果がえられなかったが、上・中段に示すように摘出腎の ex vivo での定常流ポンプによるヘパリン血灌流モデルでは灌流時と非灌流時の腎実質ドップラーに差を認めた。このことは本装置による毛細血管レベルでの実質内ドップラー測定の可能性を示唆するものであるが、定量性の問題・ノイズ除去の問題・小葉間動脈レベルの小動脈血流信号の混入の問題などの未解決の課題が山積する。

考 察

超音波 duplex system による血流測定法は、実時間表示の B モード断層像による形態学的画像診断法に血流測定という機能診断能が加味された、いわゆる機能画像診断法とも呼ばれるべき新世代の超音波診断技

Table 1. Merits of ultrasonic duplex system

I. Renal vessels and blood flow identifiable
II. Intrarenal hemodynamics (peripheral blood flow) evaluable
III. Technique easy and Time saving
IV. Renal cortical microcirculation evaluable?
V. RBF measurable?

術である¹¹⁾。腎移植の臨床において簡便で非侵襲性と信頼性・再現性を兼ね備えた機能診断の有力なアプローチ法となりうることは今回の検討で明らかになった。

B モードを同時併用しない従来の超音波ドップラー血流測定法と比較して、本法により初めて可能になった点をあらためて2列記すると (Table 1), まず, ①移植腎内外の血流情報の部位別の正確な同定ができるようになったことと, それによって, ②腎門部から末梢部に至る腎内血行動態の情報を知りうることである。元来, ドップラー血流測定法は拒絶反応の診断だけでなく, 死体腎移植直後の通常数日から10数日つづく無尿期という機能情報のえにくい期間中でさえ簡易に腎内の血行の良否を知りうるという大きな利点を有するが, 本法で腎皮質の末梢循環の良否まで判定可能になったことで血行動態情報が質的, 量的に増加したといえる。Arima ら⁶⁾⁷⁾は血流パターンから Δt , d/s 比などのパラメーターによる解析を行っているが, 腎内各部における血流波型や諸パラメーターの比較により更に詳細な腎内血行動態の認識が可能になると思われる。静脈血流情報の部位が同定できることで腎静脈血栓症の診断にも本法が有用であろうと思われる。一方, 検査実施上の利点として, 血管の位置を探し易くなることから, ③手技の熟練を要さずしかも短時間で検査ができることがあげられる。

更に, 犬を用いた実験から, ④腎実質内の毛細血管レベルの微小循環に関する情報を本法で知りうる可能性が示唆された。ただし, その目的のためには現装置の性能の向上が必要かも知れない。また, ⑤腎門部血管の最大断面が確実に描出できるという条件下で腎血流測定への途も拓ける。森安ら¹²⁾は門脈血流量を,

$$\text{血流量 (ml/min)} = \frac{AB\pi}{4} \times \frac{0.57V_{D\max}}{\cos \theta} \times 60$$

A: 血管の上下径

B: 血管の左右径

θ : ドップラー用超音波ビームと血管とのなす

角度

Vdmax: ドップラースペクトラムから求めた 最高流速

という式から算出できるとし、肝硬変と慢性肝炎の鑑別などへの臨床応用を述べている。門脈血管系はポンプ機能を介在させないため定常流に近い層流様の流れを有し超音波 duplex system による定量的測定に有利で、また直径が1cm 前後と太く B モードで断面積を測定しやすいという好条件のため臨床応用が容易となっている。移植腎で本法により血流量測定を可能にするためには腎門部静脈像の描出または脈動流である動脈血流系における算出式の考案が不可欠である。動脈血流量測定に関しては流速と血管径の時相性変化、血管径の細いこと、血管壁による減衰のため S/N 比が低下することなどの未解決の課題があるが、その臨床的価値は高く測定法の確立を目標すべきであろう。

結 語

超音波 duplex system を用いて移植腎のドップラー血流測定の手技を確立した。また、本法導入による種々の利点、将来の展望につき考察を加えた。

本稿の要旨は第44回日本超音波医学会及び日本泌尿器科学会第110回関西西地方会において発表した。

文 献

- 1) 浅野清豪, 石橋道男, 有馬正明, 宇佐美道之, 佐川史郎, 井口正典, 秋山隆弘: 腎移植後に発生した Lymphocele の 2 例. 泌尿紀要, 24, 587—593, 1978.
- 2) Akiyama, T., Kaneko, S., Arima, M. & Sagawa, S.: Ultrasound in renal allotransplantation. Proc. 2nd Meeting W.F.U.M.B., 319, 1979.
- 3) 金子茂男, 永井信夫, 郡健二郎, 井口正典, 南 光二, 門脇照雄, 秋山隆弘, 八竹 直, 栗田 孝: 泌尿器科における超音波. 第 4 報. 経時的観察への応用. 泌尿紀要, 23, 815—820, 1977.
- 4) 秋山隆弘: 泌尿器科領域の超音波. その他の臓器

の超音波診断. 移植腎. 泌尿紀要, 28, 101—106, 1982.

- 5) Sampson, D.: Ultrasonic method for detecting rejection of human renal allotransplants. Lancet, 2, 976—978, 1969.
- 6) Arima, M., Ishibashi, M., Usami, M., Sagawa, S., Mizutani, S., Sonoda, T., Ichikawa, S., Ihara, H. and Nagano, S.: Analysis of the arterial blood flow patterns of normal and allografted kidneys by the directional ultrasonic Doppler technique. J. Urol., 122, 587—591, 1979.
- 7) Arima, M., Takahara, S., Ihara, H., Ichikawa, Y., Ishibashi, M., Sagawa, S., Nagano, S., Takahara, M. and Sonoda, T.: Predictability of renal allograft prognosis during rejection crisis by ultrasonic Doppler flow technique. Urology, 19, 389—394, 1982.
- 8) 井原英有, 有馬正明, 生駒文彦, 市川靖二, 石橋道男, 佐川史郎, 高羽 津, 園田孝夫: 死体腎の機能回復性に関する検討. II. 超音波ドプラ法による移植腎血行動態計測に基づく機能回復性予知について. 日泌尿会誌, 75, 1619—1630, 1984.
- 9) 秋山隆弘, 杉山高秀, 国方聖司, 神田英憲, 金子茂男, 松浦 健, 郡健二郎, 栗田 孝: リニア電子スキャン・パルスドップラー複合装置による移植腎血管血流測定. 日超医論文集, 44, 463—464, 1984.
- 10) 森安史典, 伴 信之, 西川秀文, 松末 智: リニア電子スキャン・パルスドップラー複合装置による門脈血流量の測定. その基礎的検討. 日超医論文集, 41, 59—60, 1982.
- 11) 森安史典: 超音波 B モード・パルスドップラー複合法の臨床応用. メディカルレビュー, 17, 23—30, 1984.
- 12) 森安史典, 伴 信之, 西川秀文, 松末 智: リニア電子スキャン・パルスドップラー複合装置による門脈血流量の測定. その臨床的検討. 日超医論文集, 41, 61—62, 1982.

(1985年 7月29日受付)