

2023年11月28日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学

尿道内排尿流のベクトル可視化を世界で初めて実現 排尿障害の個別局所治療に向けた新たな尿道機能評価を可能に

【発表のポイント】

- 排尿中の尿道内の流れベクトル（方向と速さ）分布を、1秒間に1,000枚以上の高フレームレートで可視化する超音波イメージング技術を開発しました。
- 前立腺肥大症などによって変性した尿道内では渦流やジェット流など複雑な流動が生じている事を明らかにしました。
- 尿道内における尿排出の状態が詳しく分かることで、最適な薬物投与や、より低侵襲な手術などにつながる新たな排尿機能評価法の開発が期待されます。

【概要】

前立腺肥大など加齢に伴う尿道の変性は正常な排尿が困難な状態をもたらします。治療にあたっては、尿道内部における尿の流れを詳細に評価する手段が求められていました。

東北大学学際科学フロンティア研究所の石井琢郎助教、獨協医科大学病院排泄機能センターの山西友典教授（当時）、カナダ・ウォータールー大学の Alfred Yu 教授、東北大学大学院医工学研究科の西條芳文教授らの研究グループは、ハイフレーム超音波撮像技術を用いて、排尿中の尿道内の流路変形と内部の流れベクトル分布を1秒当たり1,000枚以上の高時間分解能で計測するイメージングシステムを開発し、前立腺肥大症などにより変性した尿道内部における詳細な流れの可視化を初めて実現しました。

本研究成果により排出中の流れの詳細な観察が可能となり、患者個別に最適な投薬やより低侵襲な手術などより良い治療の発展に貢献することが期待されます。

本研究成果は、国際学術誌 Medical Physics に2023年11月20日付で掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

前立腺肥大など加齢に伴う尿道の変性は排尿症状^(注1)の主要因の一つであり、排尿症状の慢性化は患者の QOL 低下に繋がるため、効果的な診断治療技術が必要とされています。治療手段が多様化する一方で、客観的な下部尿路の評価は、膀胱内圧の計測などによる間接的な方法に限られており、尿道内腔状態が尿の排出にどのような影響を与えているのか、詳細に評価する手段はこれまで存在しませんでした。本研究は、尿道内における排尿流を詳細に可視化する技術を開発し、排尿症状を有する尿道内においてどのような流れが生じているのか明らかにすることを目的としました。

今回の取り組み

血管と異なり、尿道は排尿中にのみ展開し流路を形成します。また、流体シミュレーションによる先行研究(参考文献 1)により、前立腺肥大症などにより狭小化した尿道内ではジェット流や渦流など複雑な流れパターンの発生が予測されていました。こうした排尿中の尿道内流れを詳細に観察するためには、①臓器の大きな変形に伴う流れの変化をとらえるための時間分解能を有し、②複雑な流れパターンを可視化するための、流れの方向と速さの分布の定量的計測が可能なイメージングシステムを実現する必要があります。

本研究では、石井助教らが開発した Contrast-enhanced Urodynamic Vector Projectile Imaging (CE-UroVPI) (参考文献2) という超音波イメージング法を用いた経直腸超音波イメージングシステムを新たに開発しました。このシステムは、ハイフレームレート超音波撮像法という技術に基づき、B-mode 動画^(注2)と流れベクトル動画^(注3)を 1,250 画像/秒という高いフレームレートで同時に取得することができます。これらの画像を合成し可視化する事で、排尿中の尿道において、いつ、どこで、どのような流れが生じているか、尿道の臓器運動と尿の流れの時間・空間変動を明らかにする事を目指しました。

研究グループは、本システムを用いて排尿症状を有する男性被験者に対する排尿流イメージングを実施し、排尿中の様々なフェーズにおける前立腺部尿道^(注4)の臓器運動と内部流れの変動を観測しました。その結果、排尿開始期と排尿終了期において、約 1 秒間の間に流路の拡張・収縮、流路角度の変化、流れの発達や停止などのダイナミクスが可視化されました(図 1)。特に、排尿終了期では、外尿道括約筋^(注5)の運動によって、尿道の収縮が出口側から膀胱側に伝搬し、この運動によって尿が膀胱側に飲み込まれるように逆流している事が明らかになりました。この収縮伝搬は約 100 ミリ秒という短時間の現象であり、本システムが有する高ハイフレームレート撮像によって詳細な運動の解析が初めて可能となりました。

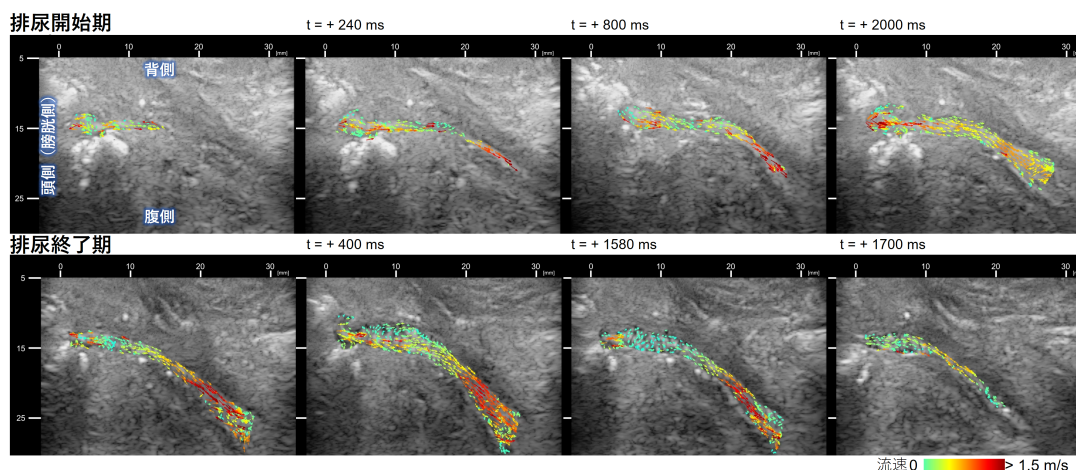


図 1. 排尿開始期（上段）および排尿終了期（下段）の尿道運動と流れベクトルの可視化結果。いずれも 3 秒間の動画データから 4 フレームを抜き出して示している。排尿開始期では、膀胱側から尿の排出が始まり、流路が拡張して排尿流が発達していく様子を示している。排尿終了期は、腹圧や外尿道括約筋による尿道と流れの変化が観察された。外尿道筋の収縮伝搬によって、尿道内の尿は一部膀胱側に逆流していた。

さらに、排尿症状を有する被験者の中でも特に尿道内に狭窄を有する場合は、尿道内に渦流やジェット流が生じている事が明らかになりました（図 2）。流体シミュレーションによる先行研究（参考文献 1）においても、このような渦流の発生は、尿道内部における流体エネルギーの損失に寄与し、体外へのスムーズな排尿を阻害する要因として示唆されています。本研究においても、尿道内の一部が展開しにくい「静的な狭窄」や、一度展開した尿道が部分的に閉塞してしまう「動的な狭窄」など臓器の形状や運動の異常が尿道内部の流れを乱し、効率的な液体輸送に影響を与えている事が、排出中の流れの詳細な観察により示唆されました。

今後の展開

本研究で開発した新しいイメージング技術は、尿道の様々な形態や運動性状と尿道内排尿流の相互作用を詳細に観察し、患者固有の排尿症状メカニズムの解明を可能にすると期待されます。本研究を主導した石井助教は「この技術によって得られるデータを応用し、尿道内流れの解析に基づいて排尿症状の要因となっている尿道の部位や因子を予測することで、患者個別に最適な薬剤選択、より低侵襲な外科治療などに向けての、重要な医療支援技術としての展開を目指します」と語っています。

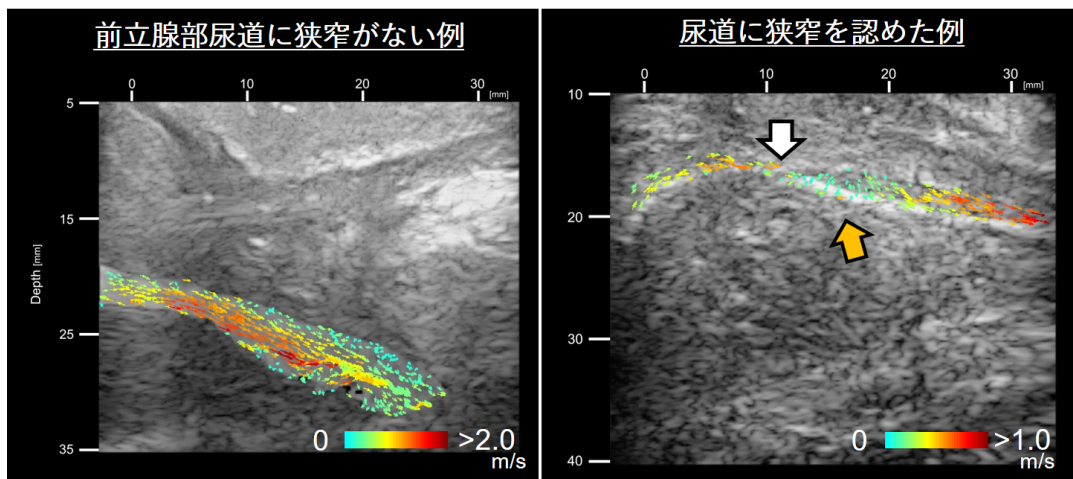


図 2. CE-UroVPI 法により可視化された、尿道内部の狭窄と渦流の状態。前立腺部尿道に狭窄が無い場合（左）は、尿道は均一に展開し、流れの乱れも認められなかった。一方、前立腺部尿道に狭窄がある場合（右）は、狭窄部（白矢印）に向かって流れが加速したのち、狭窄部の下流側（黄矢印）で渦流が生じていた。

【謝辞】

本研究は文部科学省卓越研究員事業、JSPS 科研費（研究スタート支援 JP20K22968、若手研究 JP22K16799）、および公益財団法人鈴木謙三記念医科学応用研究財団の助成によって行われました。

【用語説明】

注1. 排尿症状

尿勢低下や排尿途絶・遅延など正常な排尿が困難な状態の総称。

注2. B-mode 動画

超音波イメージングで白黒画像として表現される臓器の断層画像。

注3. 流れベクトル動画

流れの方向と速さの空間分布を複数の矢印で表現した画像。

注4. 前立腺部尿道

男性の尿道で、膀胱を出てすぐの部位であり、周囲を前立腺という臓器に囲まれている。前立腺肥大症など前立腺の疾患は、尿道内腔の形態や運動に影響を与える。

注5. 外尿道括約筋

尿道の弛緩や収縮に関連し、尿の流れを制御する輪状の筋肉。

【参考文献】

1. T. Ishii, Y. Kambara, T. Yamanishi, Y. Naya, T. Igarashi, Urine Flow Dynamics through Prostatic Urethra with Tubular Organ Modeling using Endoscopic Imagery, IEEE J Transl Eng Health Med, 2014, doi: 10.1109/JTEHM.2014.2316148.
2. T. Ishii, H. Nahas, B.Y.S. Yiu, A.J.Y. Chee, A.C.H. Yu, Contrast-Enhanced Urodynamic Vector Projectile Imaging (CE-UroVPI) for Urethral Voiding Visualization: Principles and Phantom Studies, Urology, 2020, doi: 10.1016/j.urology.2020.03.005.

【論文情報】

タイトル : Transrectal Ultrasound Vector Projectile Imaging for Time-Resolved Visualization of Flow Dynamics in the Male Urethra: A Clinical Pilot Study

著者 : Takuro Ishii*, Tomonori Yamanishi, Tomohiro Kamasako, Chiharu Shibata, Miki Fuse, Mayuko Kaga, Kanya Kaga, Hassan Nahas, Billy Y.S. Yiu, Alfred C.H. Yu, Yoshifumi Saijo

*責任著者 : 東北大学学際科学フロンティア研究所 助教 石井琢郎

掲載誌 : Medical Physics

DOI: 10.1002/mp.16834

URL: <https://doi.org/10.1002/mp.16834>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学学際科学フロンティア研究所

助教 石井琢郎 (いしいたろう)

TEL: 022-795-5882

Email: takuro.ishii@tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学学際科学フロンティア研究所

企画部

特任准教授 藤原英明 (ふじわら ひであき)

TEL: 022-795-5259

Email: hideaki@fris.tohoku.ac.jp