

AMCoR

Asahikawa Medical University Repository <http://amcor.asahikawa-med.ac.jp/>

電子情報通信学会技術研究報告 = IEICE technical report : 信学技報
(2016.2) 115(464):61-66.

ドプラシステムの評価および校正用の落下球ファントムの検討 (超音波)

松本 成史, 竹内 康人

ドプラシステムの評価および校正用の落下球ファントムの検討

松本成史 竹内康人
旭川医科大学 腎泌尿器外科学講座
078-8510 旭川市緑が丘東 2111
連絡著者: y.takeuchi@ieee.org

あらまし: 運動速度と反射源性が可及的に正確に把握出来る運動物体反射源として、ドプラ有感領域を斜めに横切って落下する標準反射源の個体球を利用する事を提案する。この手法は JIS や IEC の機械仕掛けで上下運動する標準反射源鋼球ターゲットのドプラファントムよりは遥かに簡素で実現、実施しやすく、精度も再現性も等価な物になり得ると期待される。この方式は水中のみならず空中でも、また超音波のみならず電磁波でも利用可能な手法である。実験的実証用の装置を製作し、水中および空中において、各々の波に関して基礎的な実験をした。

キーワード: ドプラ、校正、ファントム、鋼球、標準反射源

Falling Ball Phantom for Evaluation and Calibration of Doppler Systems

Seiji Matsumoto and Yasuhito Takeuchi
Dept. of Renal and Urologic Surgery, Asahikawa Medical University
2111 Midorigaoka-Higashi, Asahikawa 0788510 Japan
Corresponding author: y.takeuchi@ieee.org

Abstract: In this study an evaluation and calibration method for Doppler systems using falling ball running across Doppler sensitivity area, is proposed with basic experimental data. Here a known standard target steel ball used in IEC or JIS standard is used for free falling down motion, rather than up and down mechanically driven motion. It is expected that this method is much simple and easy than IEC or JIS standard method, with equivalent accuracy and reproducibility. The method is available not only in water but also in air, not only for ultrasound but also for electromagnetic wave. Feasibility study experimental data are obtained in water and air, for ultrasound and electromagnetic wave.

Keywords: Doppler; Calibration, Phantom, Steel Ball, Standard Reflector

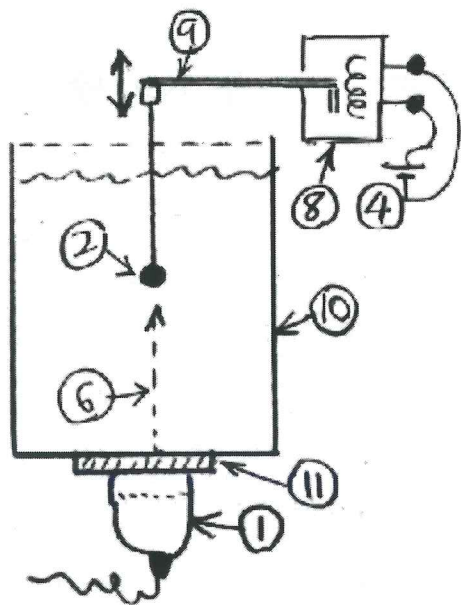


Fig.1: JIS(1)や IEC(2)の往復運動鋼球ドプラファントムの概要。水槽(10)内で機械仕掛け(8)(9)で往復運動する標準反射源鋼球(8)が音線(6)の上に来るように置かれる。探触子(1)の上には生体等価減衰を得るための音響減衰板(11)が置かれる。この減衰板なしでは感度が高すぎて現実の環境を模擬出来ない。

(2) 問題提起と解決方法

法： IEC(2)の、いわゆるドプラ胎児発見器の規格は、1980年代の日本発の国際規格制定活動への参加(3)にそのルーツを遡る事が出来、当時としては数少ない、旧 JIS 規格が日本提案が肉づけされて国際規格に昇格採用された物として歴史に残る物である。その後これは国策として再度 JIS 規格に逆転写され JIS(1)となっている。しかしその根幹部を成す機械仕掛けで上下運動する標準反射源鋼球ターゲットのドプラファントムは、図1に略示するごとくその原理と着想が素朴また即物的で理解しやすいものの、装置の設計、組み立て、維持管理には一定の努力を要し、いざと言う時に手軽に自家用に自作利用するには抵抗感がある。そこで本研究においては同じ標準反射源鋼球ターゲットを用いて反射源性のトレーサビリティを維持し

(1) 研究の背景：およそ計測、通信システムの類の開発、生産設計また維持管理においては合目的に適切な諸元性能の評価、校正用の標準信号源、ダミーロード、オンサイト照射計測手段、また標準反射源ないしファントム等々の使用が必須であり、斯界もその例外ではない。しかしながら電子情報通信講学のメインストリームにおいても、またレーダー、ソナー、TDRM の領域に絞って考えても、このような評価校正手段に関する学問は重要だと信じられつつも日頃は縁の下に置かれているように思われる。本研究においては斯界の、特に最も簡素な構成の CW ドプラないしそれに準ずる非イメージング計測（観測）装置のための評価校正用ファントムに関し、運動速度と反射源性が可及的に正確に把握出来る運動物体反射源として、ドプラ有感領域を斜めに横切って落下する標準反射源の個体球を利用する事を提案する。この手法は JIS(1)や IEC(2)の機械仕掛けで上下運動す精度も再現性も等価な物になり得ると期待される。この方式は水中のみならず空中でも、また超音波のみならず電磁波でも利用可能な手法である。実験的実証用の装置を製作し、水中および空中において、各々の波に関して基礎的な実験をしたので報告する。

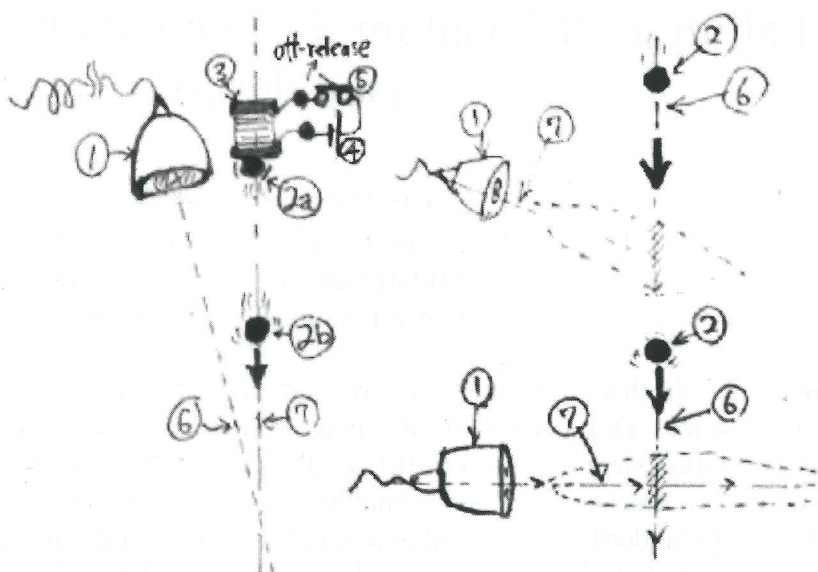


Fig.2a(左)、2b(右上)、2c(右下)
本研究の提案する落下球ファントムの方式

つつもこれを機械的に保持しつつ上下運動させるのではなく、ドプラ有感領域を斜めに横切るように水槽内を落下せしめる。1980年代においては中間段階で信号の記録装置または記憶装置を利用する事は多少の抵抗感があったので、反射源からのドプラエコーが常時くり返し連続的に受信出来る事は一定の好ましい面があった。が、当節は1発の信号を記憶、事後分析する事には何の抵抗感もないので、観測すべき現象が1発のみでも全く差し支えない。また逆にここで利用する標準反射源はただの規格品のボールベアリングなので、これを何回も(何個も)くり返し落下させる事にも何の抵抗感もない。

図2 a,b,c にそのシエマを示す。これにおいて、電磁石(3)に吸引保持されている鋼球(2a)はスイッチ(6)が off にされて励磁電流を切断されると垂直に(7)落下し(2b)、探触子(1)の成す音線(6)を横切る。この前後区間において受信されるドプラ信号は一定の配慮の許にこの硬球を上下に往復運動させた時の物の代替えになり得る。また図2cのごとく落下線(7)と音線(6)が殆ど直角に交差するように配置すると、適切な設定の許では交差点を含む落下線の経路内でのビームプロファイルが観測される。音線に直交する運動は原理上はドプラシフトを呈さないとされるが、図2bのごとく直交よりも僅かに傾いていれば十分なドプラ信号出力が得られる。また反射源性の振幅の変化もドプラ信号として受信され得るので、完全に直交する場合でも実際には反射源の出没に呼応する信号出力がある。

(3) 他領域における応用も含む実施例 :

我々研究陣はこの所、水中(ないし生体軟部組織中)におけるドプラシステムよりも外測ウロダイナミクス計測システムのための空中におけるドプラシステム(4)(5)(6)(7)の開発に集中して来たので、先ずこの落下球ファントムの構成を空中で実験した。図3、4はそれぞれ40KHz 空中超音波およびKバンド(24GHz)電磁波のCW ドプラシステムにおける試用結果を示す。詳細は図の説明の通りである。使用鋼球は前記 JIS や IEC に規定の2種類のステンレススチール球ターゲットの内大きな方

(2.38mm 径)に準ずる 2.5mm 径の鉄(鋼)球であり、具体的にはボールベアリング用に汎用される鋼球である。

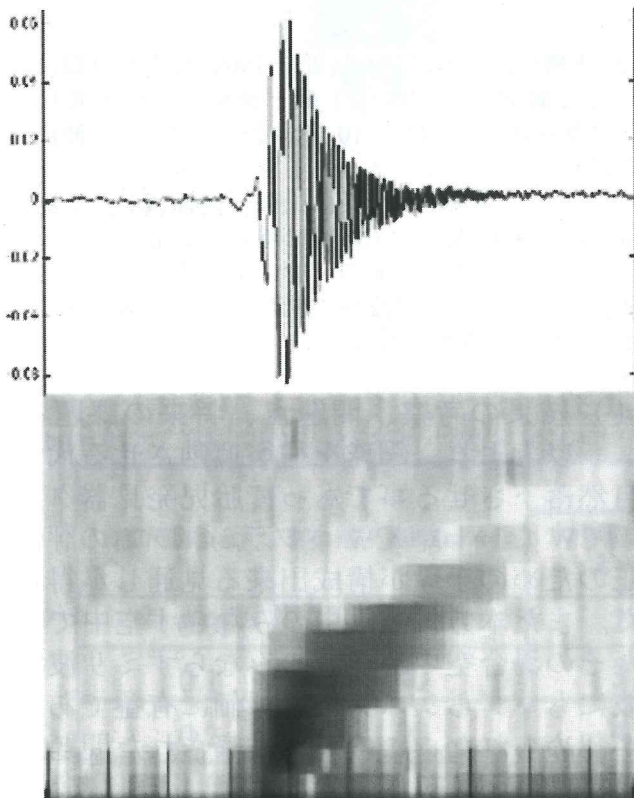
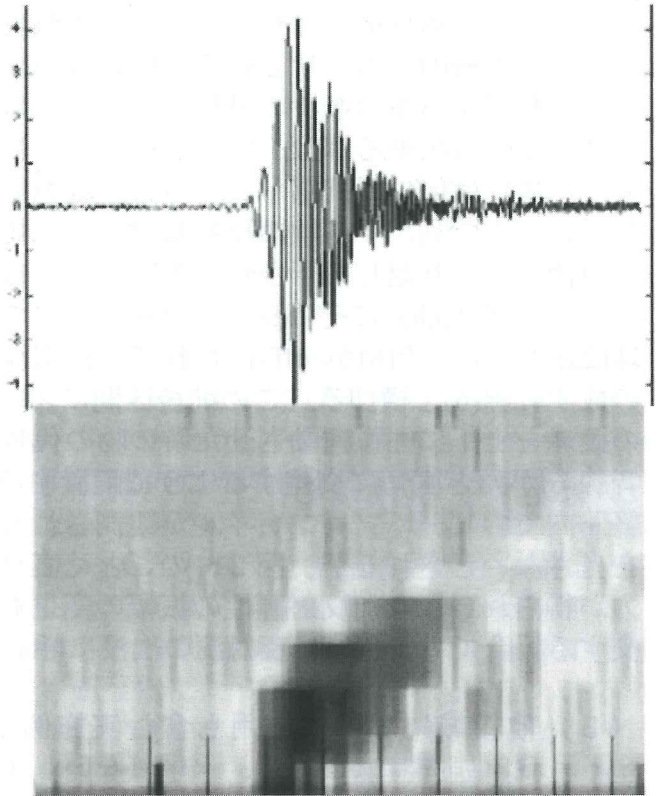


Fig.3: 40KHz 空中超音波 CW ドプラ装置に(5)における本研究の落下球ファントムの使用例。受信ドプラ信号波形(上段)および周波数スペクトラム。横軸(時間軸)全長は 0.3 秒、縦軸(ドプラ周波数)は 0(dc)-1KHz。

主旨とする JIS(1)や IEC(2)の水槽内で機械仕掛けで上下運動する標準反射源鋼球ターゲットの置き換えの動作を図5、6に示す。図5のごとく、落下軸と音線が略並行の場合には離脱後 10cm 程度の旅程で有感領域に到達する時点での落下速度からドプラシフトは 1%の領域に達し、観測超音波周波数が 3MHz の場合には 3KHz 前後になる。また一定加速度で加速される筈の所、有感領域を横切る時分

です。すでに加速度は低下し、早晩に水との間の流体抵抗と平衡する段階へ移行する(8)。並行状態に至るまでには数十 cm の行程が必要のため、また水槽の深さが 50cm 程であるため、その段階の事は観測する事は出来ない。

Fig.4: K バンド(24GHz)ミリ波 CW ドプラ装置に(6)(7)における本研究の落下球ファントムの使用例。受信ドプラ信号波形(上段)および周波数スペクトラム。横軸(時間軸)全長は 0.3 秒、縦軸(ドプラ周波数)は 0(dc)~700Hz。



一方で音線に略直交するように落下させると、図 6 のごとく、交叉時に一瞬大きな信号が受かり、これがその箇所でのビームプロファイル(ドプラシステムとしての感度分布)を示唆ないし意味する物である事が伺われる。鋼球が通過した直後に余波のタービュレンスと思しき成分も観測されている。

以上のいずれの場面においても反射源として規格規定の寸法の鋼球を用いれば反射源性は前記規格と同じなので、落下球が有感領域中央の音線を横切る時の受信信号強度でもって感度の校正が出来ると考えられる。

図 7 に実験的に採用した電磁式の鋼球リリース装置の概要を示す。表 1 はこの研究におけるいくつかの重要な数値の一覧である。

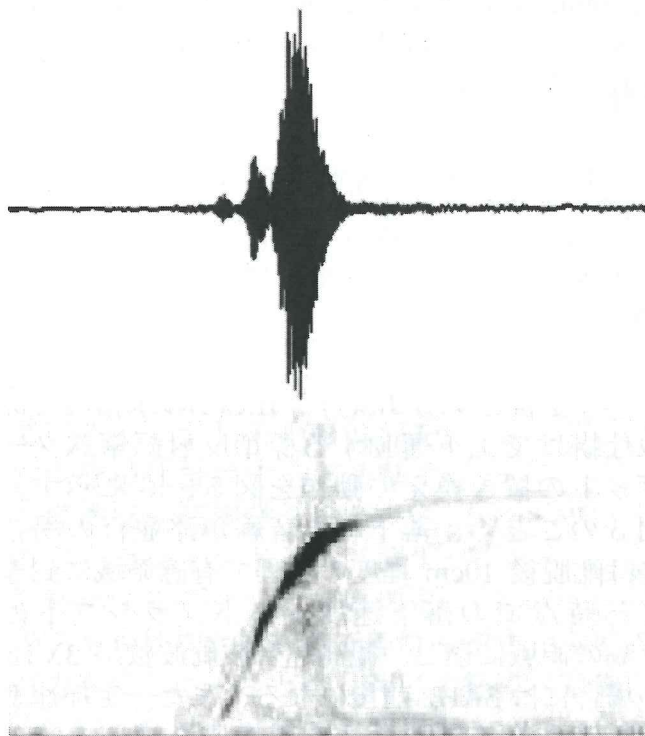


Fig.5: 水槽内にて本研究の装置を 3MHz 胎児発見器に適用して観測した例。落下軸と音線との間の角度(ドプラ見込み角)は約 10 度。受信ドプラ信号波形(上段)および周波数スペクトラム(ネガ表示、下段)。横軸(時間軸)全長は 1 秒、縦軸(ドプラ周波数)は 0(dc)~6KHz。主応答に時間的に先立つ 2 つの弱い応答は水槽の底面の反射に由来すると考えられる。ドプラシフト周波数の軌跡を見ると落下速度に飽和の傾向が観察される。

(4) 結果の考察、問題点、将来の課題:

以上より、鋼球を往復運動させる代りに自然落下させる事でもって胎児発見器クラスの CW ないし準 CW ドプラシステムの評価校正のための手段が構成出来る見通しが得られた。また本方式は水中のみならず空中でも、またその場合空中超音波のみならずミリ波電磁波にもドプラシステムの評価に有益である事が認められた。この間、推察された問題点および課題は以下の通りである。

(1) 位置決めはやや難しい場合がある。特に水中にて槽内の水に流れがあると垂直落下を保証する事は困難になるので、水の静止に配慮が必要である。

(2) 落下速度の制御も困難なので、所望のドプラシフト比を得るにはドプラ見込み角の設定による他に手段がない。

これらの課題は今後の宿題として、本研究においては方式原理とその有用性の実証を優先した。

Fig.6:水槽内にて本研究の装置を 3MHz 胎児発見器に適用して観測した例、その 2。落下軸と音線との間の角度（ドプラ見込み角）は 90 度。受信ドプラ信号波形（上段）および周波数スペクトラム（ネガ表示、下段）。横軸（時間軸）全長は 1 秒、縦軸（ドプラ周波数）は 0(dc)~9KHz。有感領域への入りと出の 2 つの振幅極大および通過後のタービュレンスが見られる。

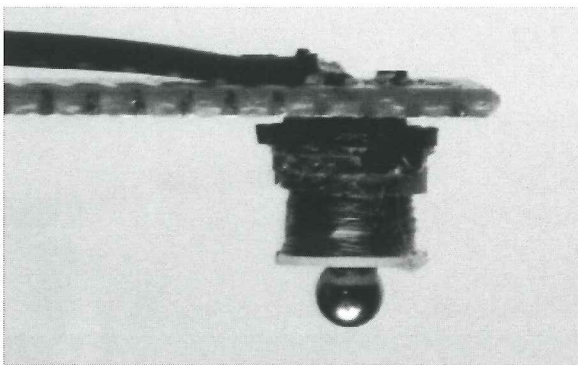
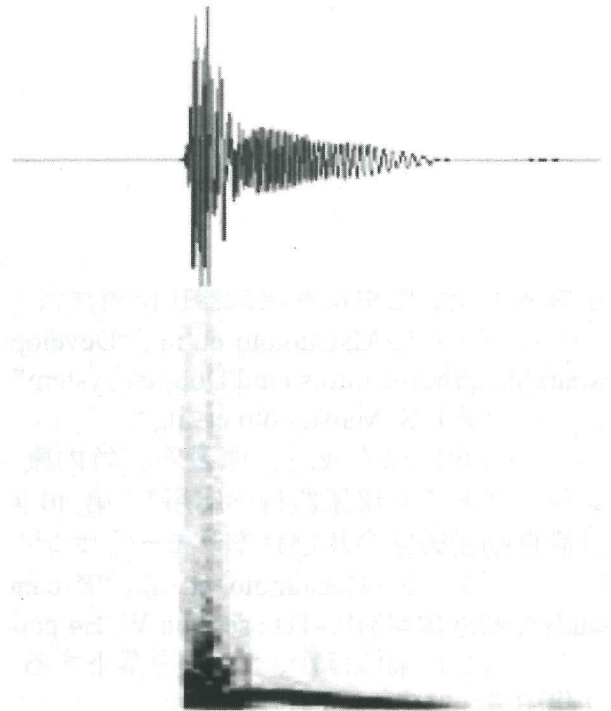


Fig.7: 本研究に試用した鋼球の電磁リリース装置。市販のコア入り可変インダクターを流用した物で直径 10mm、自己インダクタンス 8mH、直流抵抗 23 Ω、9V x 300mA を通電すると図示の場合 4mm 径の鋼球(265mg)を重力に抗して安定に保持し得、通電を断つと解放、初速ゼロで垂直落下せしめる。自己発熱のため長時間の連続通電には適さない。

(5) 基礎データ :

地表における自由落下の獲得速度 V は落下距離 h に関して、

$$V_{(m/s)} = \sqrt{2gh(m)} \quad g = 9.8(m/sec^2)$$

であらわされるので、各条件において観測されるべきドプラシフト周波数は次のようになる。ただしこれには水中での粘性抵抗との拮抗による速度平衡(8)は加味されていない。

落下距離(m)	自由落下速度(m/sec)	fd (見込み角 0°)		
		水中超音波 (3MHz) λ = 0.5mm	空中超音波 (40KHz) λ = 8.5mm	K バンド電磁波(24GHz) λ = 12.5mm
0.05	0.99	2 KHz	235 Hz	160Hz
0.1	1.40	3 KHz	329Hz	224Hz
0.2	1.98	4 KHz	470Hz	320Hz

(6) 参考文献：

(1) JIS-T-1506 (2005) “超音波手持探触子形ドプラ胎児心拍動検出装置性能要求事項、試験方法及び表示” 日本工業標準調査会審議、日本規格協会発行、平成 17 年 3 月 25 日改正、平成 26 年確認。

(2) IEC 61266-1994 “Ultrasonics, Hand-held probe Doppler foetal heartbeat detectors. Performance requirements and method of measurement and reporting”. IEC TC/SC87.

(3) 上記 (2) の IEC TC/SC87 WG12 への日本代表団、井出正男 (故人) ほか、電子機械工業会医用超音波機器技術委員会

(4) S. Matsumoto et. al., “Development and utility evaluation of new uroflowmetry using wearable airborne ultrasound Doppler system” J Urol. 189 (4), Supplement, pp.e341.(2013)

(5) S. Matsumoto et. al., “

(6) 松本成史、原量宏、竹内康人、”走行する尿滴列のドプラ法によるリモートセンシングとその泌尿器科学応用”、第 40 回リモートセンシングシンポジウム、演題番号 2 番、計測自動制御学会及び日本リモートセンシング学会、(2015. 3)

(7) S. Matsumoto et. al., “K-band wearable Doppler system for external urodynamics study”, 40th IRMMW-THz session W3B4 paper 3133225 (2015)

(8) 菊池ほか、”水中を落下する球に作用する非定常抵抗の係数”、日本機械学会論文集(B 編) 79(7) pp.48-60 (2013)