

研究速報

呼吸検出用ドップラーレーダの性能評価のためのダイナミックファントムの開発

米林 順平^{†a)}(学生員) 高松 昇三^{††}
 齊藤 一幸^{†††}(正員) 高橋 応明^{†††}(正員:シニア会員)
 伊藤 公一[†](正員:フェロー)

Development of Dynamic Phantom for Evaluation of Doppler Radar for Breath Detection

Junpei YONEBAYASHI^{†a)}, Student Member,
 Shozo TAKAMATSU^{††}, Nonmember,
 Kazuyuki SAITO^{†††}, Member,
 Masaharu TAKAHASHI^{†††}, Senior Member,
 and Koichi ITO[†], Fellow

[†] 千葉大学大学院工学研究科, 千葉市

Graduate School of Engineering, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

^{††} オムロンヘルスケア株式会社, 京都市

OMRON HEALTHCARE Co., Ltd., Kyoto-shi, 615-0084 Japan

^{†††} 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター, 千葉市

Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba University, Chiba-shi, 263-8522 Japan

a) E-mail: yonebayashi@graduate.chiba-u.jp

あらまし 筆者らは、呼吸検出用ドップラーレーダの性能を評価するため、人体の腹部運動を模擬したダイナミックファントムを開発した。また、ダイナミックファントムと人体の測定によって得られる出力波形を比較することで、ダイナミックファントムの妥当性を示した。

キーワード ダイナミックファントム, 生体等価ファントム, ドップラーレーダ, 呼吸検出, 生体計測

1. まえがき

近年、生体センシング技術の一つとして、電磁波を用いて人体の呼吸数を計測するドップラーレーダが開発されている [1] ~ [3]。このような計測機器は、災害で建物に生き埋めとなった人の捜索や生体情報の継続的な計測による病気の未然防止に役立つと考えられる。

本論文では、呼吸検出用ドップラーレーダの基本特性を評価するためにダイナミックファントムを開発した。一般的に、人体と電磁波の相互影響を定量的に評価する場合、人体の電気特性や形状を模擬した生体等価ファントムを用いる。ダイナミックファントムは、この生体等価ファントムに、「動く」という機能を付加したものである。これまで、電気特性のみを模擬するものはあったが、それに動きを加えたものはなかった。

呼吸検出用ドップラーレーダを評価する場合、人体を対象とした評価がよく行われている [1] ~ [3]。しか

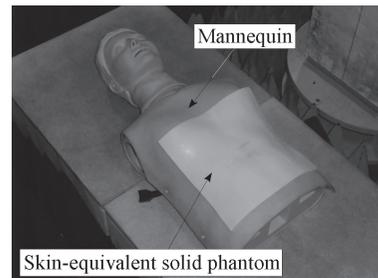
しながら、体格や呼吸の大きさ・周期などには個体差があり、測定時の体調によっても変化しやすいため、再現性に問題がある。このような理由で、人体だけを対象としてドップラーレーダを定量的に評価することは難しい。そのため、人体を対象とした測定結果に対して、ダイナミックファントムを基準として用いれば、個体差や体調による違いを考慮した評価が可能である。なお、本論文で扱うドップラーレーダは、周波数 10.525 GHz で動作し、人体腹部周辺の微小振動を呼吸として検知する。

本論文では、呼吸検出用ドップラーレーダの性能評価を目的としたダイナミックファントムを開発し、ダイナミックファントムと人体の測定によって得られる出力波形を比較することで、ダイナミックファントムの妥当性を示した。

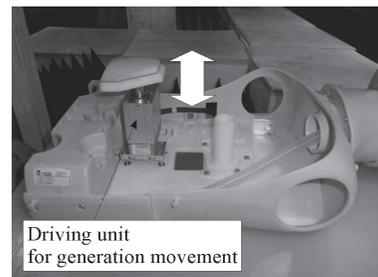
2. ダイナミックファントムの構造及び電気特性

呼吸検出用ドップラーレーダの性能評価用ダイナミックファントムに要求される特性は以下である。

まず、呼吸の動作が模擬されていること。次に、レーダ特性を評価するため、電気特性が再現されていることが必要である。図 1 に、作製したダイナミックファントムを示す。まず、人体の形状を模擬するために、マネキンを用いた。マネキン内部には、アクチュエー



(a) External view.



(b) Internal view.

図 1 ダイナミックファントムの構造
 Fig. 1 Structure of dynamic phantom.

タ駆動部があり、腹部周辺を上下に動かすことで、呼吸による腹部運動を模擬した。アクチュエータは、振幅 0~20 mm、振動数 1~100 回/min で動作可能であり、これらは、正常及び病気等異常時の呼吸における値をカバーしている。この動きを妨げず、すき間等が発生しないように、柔軟性をもつ生体等価ファントムをマネキン上に密着するように配置する。ここで、周波数 10.525 GHz において、駆動部周辺での目立ったノイズは見られず、駆動部がドップラーレーダに影響を与えないことを確認している。

次に使用したファントムについて、説明する。表 1 に、ダイナミックファントムに用いる皮膚等価固体ファントムの組成を示す。皮膚等価固体ファントムは、イオン交換水、ポリエチレンパウダー、及び塩化ナトリウムによって電気定数が決められ、寒天や TX-151 (増粘剤) の分量を調整することで硬さを変化させることが可能である。また、デヒドロ酢酸ナトリウムは、防腐剤の役割をしている。

図 2 に、皮膚等価固体ファントムの電気定数の周波数特性を示す。実線が比誘電率及び導電率の測定値、点線が目標値をそれぞれ示している。なお、周波数 10.525 GHz における目標値は、比誘電率が 30.8、導

電率が 8.6 S/m である [4]。また、電気定数の測定には、85070E 誘電率プローブ・キット (Agilent 社製) を用いた。この結果より、測定値と目標値は同様の特性を示しており、周波数 10.525 GHz における測定値と目標値の差異は 10% 以下であった。

3. 皮膚等価固体ファントムの厚さの解析

マネキン内部にあるアクチュエータ駆動部は金属製であるため、それがドップラーレーダの出力結果に影響を及ぼすおそれがある。そのため、皮膚等価固体ファントムは、搬送波がマネキン内部まで到達しないように十分厚くなくてはならない。

パッチアンテナと人体皮膚の電気定数をもつ平面反射体 (面積: 300 × 300 mm², 厚さ: h mm) を 100 mm 隔てて対面させ、反射体の厚さ h を変化させたとき、反射体裏面における同面積完全導体の有無によるパッチアンテナ給電点での反射係数を比較した (図 3)。なお、反射体の面積は、成人男女の平均な胸腹部の寸法より算出した [5]。一般的に、誘電体の厚さと反射係数の関係は、伝送線路理論を用いて求めることが可能であるが、波源が誘電体の近傍にあったり、誘電体が有限であったりする場合、伝送線路理論を用いることは困難である [6]。そのため、より実情に即したモデルで

表 1 皮膚等価固体ファントムの組成
Table 1 Composition of skin-equivalent solid phantom. [in gram]

Deionized water	844
Agar	13
Polyethylene powder	225
Sodium chloride	3
TX-151	25
Dehydroacetic acid salt	0.5

— Relative permittivity (Measured) ◆ Relative permittivity (Target)
 ... Conductivity (Measured) ■ Conductivity (Target)

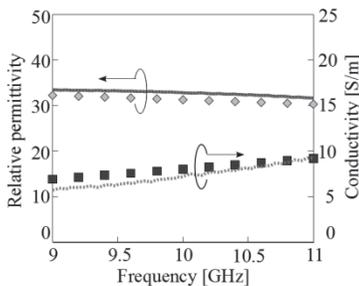
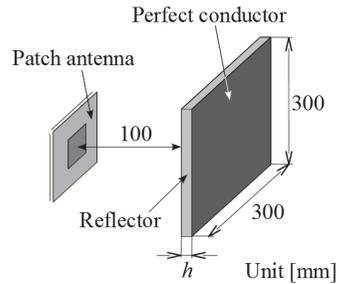
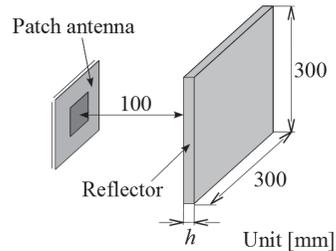


図 2 皮膚等価固体ファントムの電気定数
Fig. 2 Frequency versus electric constants of skin-equivalent solid phantom.



(a) With perfect conductor.



(b) Without perfect conductor.

図 3 解析モデル
Fig. 3 Simulation models.

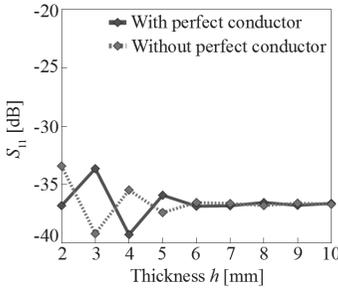


図4 反射係数

Fig. 4 Thickness versus reflection coefficient.

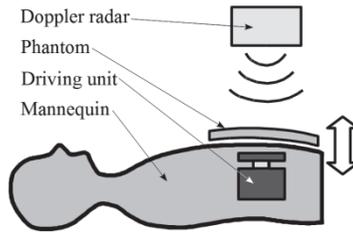


図5 測定系

Fig. 5 Measurement system of dynamic phantom.

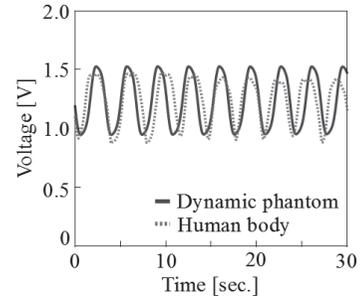


図6 人体同等性

Fig. 6 Time versus voltages.

皮膚等価固体ファントムの厚さを求めるため、FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法を用いてシミュレーションを行った。

図4に、解析結果を示す。実線が導体のある場合、破線が導体のない場合のパッチアンテナ給電部での反射係数を示している。この結果より、反射体の厚さが6 mm未満では、定在波の影響により反射係数が大きく変化しているものの、厚さが6 mm以上では、反射係数が一定の値へ収束している。また、厚さが6 mm以上のとき、導体の有無による反射係数の変化は非常に小さい。これより、皮膚等価固体ファントムの厚さが6 mm以上あれば、入射された電磁波は、マネキン内部の駆動部に達する前に十分に減衰するため、その影響は、ドップラーレーダの出力結果にほとんど現れないと考えられる。

なお、実際に作製した皮膚等価固体ファントムは、作りやすさを考慮して厚さ10 mmとした。

4. 人体との同等性

作製したダイナミックファントムの妥当性を示すため、ダイナミックファントムと人体をそれぞれ同条件下で測定した際の出力波形を比較した。ここで用いるドップラーレーダは、搬送波と観測対象(動体)の各時間における位置での反射波より検波を行い、位相情報と反射量に依存した振幅情報を出力する[7]。

図5に、ダイナミックファントムを測定した際の系を示す。ドップラーレーダ観測対象間の距離は約1 mとした。

図6に、測定結果を示す。この結果より、30秒間で9回の上下運動をしていることが読み取れ、ダイナミックファントムを測定した際の出力波形の振動数と駆動部の設定条件が一致していることが確認できる。

また、ダイナミックファントムと人体の出力波形はほぼ同じ形状であり、ダイナミックファントムの妥当性が示された。

5. むすび

本論文では、呼吸検出用ドップラーレーダの性能を評価するため、人体の腹部運動を模擬したダイナミックファントムを開発した。また、ダイナミックファントムと人体の測定によって得られる出力波形を比較した結果、ほぼ同様の波形が出力され、ダイナミックファントムの妥当性が示された。

文 献

- [1] O. Boric Lubecke, P.-W. Ong, and V.M. Lubecke, "10 GHz Doppler radar sensing of respiration and heart movement," Proc. IEEE 28th Annual Northeast Bioengineering Conference, pp.55-56, April 2002.
- [2] O. Postolache, R.N. Madeira, P.S. Girão, and G. Postolache, "Microwave FMCW Doppler radar implementation for in-house pervasive health care system," 2010 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications Proceedings, pp.47-52, April 2010.
- [3] L. Chioukh, H. Boutayeb, L. Lin, L. Yahia, and W. Ke, "Integrated radar systems for precision monitoring of heartbeat and respiratory status," Asia Pacific Microwave Conference 2009, pp.405-408, Dec. 2009.
- [4] IFAC Home page, "Dielectric properties of body tissues," <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>
- [5] 産業技術総合研究所ホームページ, "AIST/HQL 人体寸法・形状データベース 2003," <http://riodb.ibase.aist.go.jp/dhbodydb/fbodyDB/>
- [6] 橋下 修, 電波吸収体のはなし, 日刊工業新聞社, 2001.
- [7] 関根友嗣, 田島賢一, 林 亮司, "パルスドップラレーダにおける不検出確率・誤警報確率の解析," 信学技報, SANE2005-78, Nov. 2005.

(平成22年5月26日受付, 9月16日再受付)