

# カンテンを人体のモデルとした電磁波伝播の研究

田中 聡<sup>\*1</sup> 岡部 雅之<sup>\*2</sup> 柚木 孝介<sup>\*3</sup>

A Study of the VHF wave propagation on the agar-gel phantom as the model of a human body.

Satoshi TANAKA Masayuki OKABE Kosuke YUNOKI

## ABSTRACT

For the study of the EM (Electro Magnetic) wave propagation on the surface of the human body, the agar-gel phantom is used in the experiment. As the numerical analysis with the moment method which corresponding to the experiments, the relative permittivity of the homogeneous phantom plate becomes as the higher as the value of some thousands. The numerical analysis shows that the other electrical properties can not contribute to the propagation characteristics in VHF resigon. These results assume that there is the unknown surface effect on the water in the region of VHF frequencies.

Another experiment is conducted with varying the intervals of electrodes or forms and sizes, can give the optimal parameters. According to these experiments there is a frequency band which can be propagate on the human body in 40 MHz and near 100 MHz regions.

キーワード：電磁波, 伝播, VHF 帯, 人体モデル, 寒天

**Keywords: Electromagnetic wave, Propagation, VHF, Agar phantom**

## 1. まえがき

携帯電話の高性能化と無線ネットワークのブロードバンド化, 電子商取引の拡大など情報技術 I T C は急速発展し続けている. そのような中, 次世代の情報社会の形として考えられているのが, いつでも, どこでも, どのような機器でも通信ネットワークを介してコンピュータに接続できるユビキタスネットワークである. 日本では総務省が 2010 年までに日本をユビキタスネットワークが実現された社会に発展させるための政策である "u-Japan" (ユビキタスネット・ジャパン) 計画を推進するなど国家レベルで実現に向けて取り組んでいる.

そのユビキタスネットワークに関連する技術のひとつにウェアラブルコンピュータがある. ウェアラブルコンピュータとは, 身につけて持ち歩くことができるコンピュータのことで携帯電話や無線 LAN のようなネットワークに接続できる環境があればユビキタスを実現することが可能になる. ウェアラブル機器としては腕時計や靴のように普段身につけているものを利用したものや, 頭部に装着する HMD を

表示装置と用いて使用するもの, ポケットに入れられるほど小型な機器など様々なタイプのものが研究されている [1].

こうしたウェアラブル機器では機器間やネットワーク装置との通信を行う必要があるが, 有線による通信ではコード類が邪魔であり, 配線が多数となれば接続が不便であったり, 外観にも難があるためどこでも使えるわけではない. 一方, Bluetooth などの近距離無線による通信では有線のような難がない反面, 電波の外部への放射により盗聴や混信による妨害の可能性があるなどセキュリティの面で不安がある. そこで, より安全な無線通信として生体を電波伝送路として通信を行う方法が研究されている [2 など]. 従来, 生体と電磁波の関係としては人体の大きさと同程度の波長は共振し, さらに周波数の高い波に対しては吸収体としてみなすことができると言われていた. しかし, 過去の研究によるとある周波数帯域では生体表面を伝搬することが知られている [3]. 生体表面の伝播は体内伝播に比べて外部への放射が増えるという難点はあるものの, 伝播損失を低減できる可能性があり, 導電性衣服などの利用に

\*1 福山大学 工学部 電子・電気工学科 \*2 三和工機 (株) \*3 (株) MCOR

より有用な相乗効果も期待できる。

電磁波はRF帯以下では筋肉などの体内を主に伝播し、HF帯になると生体表面に沿って伝送する成分が大きくなる。今回の研究では生体表面と電気的特性が似ているカンテン（天草）を使用したモデルを使い、カンテン表面の伝搬特性の実測およびモーメント法による数値解析を行った。また、カンテン表面に取り付ける電極間隔や形状を変えた場合の特性の違いなども比較した。

## 2. カンテンの導電率，比誘電率の測定

使用するカンテンは図1に示すような導電率  $\sigma$  [S/m] の等方性の一様導体としている。高周波信号を印加したときに流れる電流密度  $J$  [A/m<sup>2</sup>] と一様電界  $E$  [V/m] の間には

$$J = \sigma E \quad (1)$$

が成り立つ。また誘電率を  $\epsilon$  とすると誘電体中の変位電流  $i$  は

$$i = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

で表される。ここでは正弦的であるとし

$$E = E_0 e^{j\omega t} \text{ とおくと,}$$

$$i = j\omega\epsilon E \quad (3)$$

となる。次に式(1)(3)より全電流密度  $J_1$  は

$$J_1 = J + i = (\sigma + j\omega\epsilon)E \quad (4)$$

となる。図1において、金属電極間距離を  $L$ 、電極面積を  $S$ 、全電流を  $I$  とすると、電界  $E = V/L$ 、電流密度  $J_1 = I/S$  より

$$\frac{I}{S} = (\sigma + j\omega\epsilon) \frac{V}{L} \quad (5)$$

となる。上式を書き換えると

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{L}{(\sigma + j\omega\epsilon)S} \quad (6)$$

となり、 $Z = R + jX$  と実虚部で表せば次のようになる。

$$\frac{L}{(\sigma + j\omega\epsilon)S} = R + jX \quad (7)$$

実験に使用したカンテンは0.8%のものでイオン交換水を用いて、105×75×15 mmの長方形に整形して使用する。測定は両端面の電極にインピーダンスアナライザを接続して測定した。測定値  $R$ 、 $X$  から式(7)により導電率  $\sigma$ 、比誘電率  $\epsilon_r$  を求めた結

果を図2に示す。

導電率は約0.006~0.014 [S/m]で周波数が大きくなるにつれ下がっている。これは脂肪部の平均値20 mS/mよりもやや小さい。比誘電率は約23~33程度であり脂質の誘電率に近い[3]。今回の実験ではプローブ性能の制限のため MHz までしか求められていない。

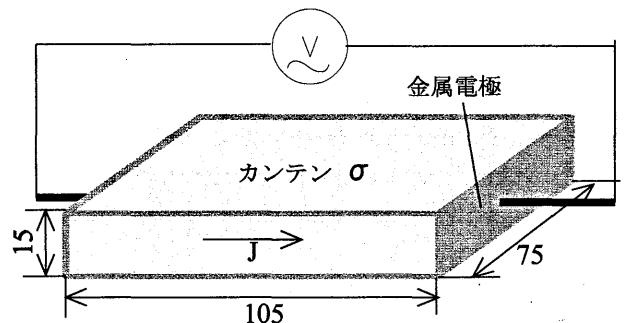


図1 カンテンの誘電率測定

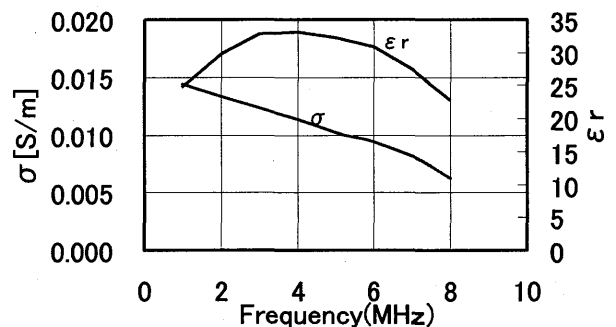


図2 カンテンの導電率と比誘電率

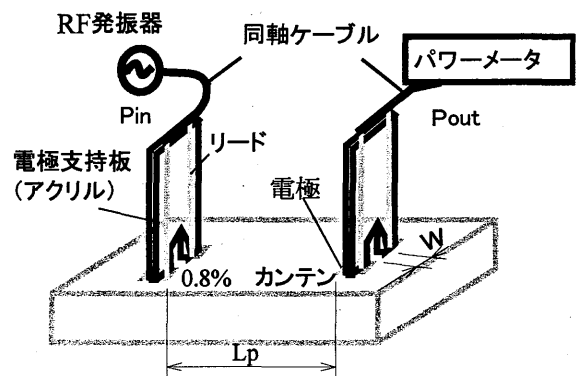


図3 RF伝搬測定装置

### 3. カンテン表面の電磁波伝搬実験

図3に示すようにカンテンの表面に  $W$  [mm]の間隔で一对の金属電極 ( $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ) を置き、発振器出力を電極に入力し、 $L_p$  [mm]離れた位置にある同形状の電極より取り出される出力信号  $P_{out}$  をパワーメータで測定し、入出力間の伝送損失を測定する。なお、発振器もパワーメータもそれぞれの入出力は出力インピーダンスは  $50\ \Omega$  の不平衡であるが特段のインピーダンス変換も行わず、入出力の不整合についての考慮はない。

電極間距離  $W$  を  $15\text{ mm}$ 、 $L_p$  を  $50\text{ mm}$  とした場合の実験結果を図4に示す。図にはカンテンを取り除き、電極のみを同じ距離で空中に置いた場合の伝送損失の測定結果も“空气中”として併記してある。10 MHz以下の低周波領域では両者の差はほとんどなく、信号はカンテンの中ではなく、空气中を少しだけ伝搬していることを示している。一方、40 MHz付近と100 MHz付近のVHF帯において、伝送損失が  $-15\text{ dB}$  ~  $-20\text{ dB}$  という伝送帯域が存在していることがわかる。カンテンを置かない場合と比べて明らかな違いがあることからみて、この表面伝搬を通信に利用できる可能性がある。逆に、1 MHzから10 MHzは伝搬損失が予想された以上に大きい。これは使用したカンテンの導電率を低めにしていることが原因であると推定される。

図5は電極間隔を  $W=15\text{ mm}$  で固定し、 $L_p$  を10から50 mmまで変化させた場合の周波数特性であり、図6は逆に  $L_p=40\text{ mm}$  で固定し、 $W$  を15 mmから25 mmまで変化させた場合の周波数特性である。HF帯では伝搬距離が長くなれば損失が大きくなるというおおよその傾向性は見られるものの、VHF帯の通過帯域では急激に伝送損失が変化するため、距離による明らかな特徴は出にくい。

次に、図7は電極サイズと形状が異なる場合 ( $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,  $10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,  $5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ) の実験結果である。いずれの実験も、送受信の電極の形は同じとし、電極間隔は  $W=15\text{ mm}$ 、 $L_p=40\text{ mm}$  とした。

これら3つはどれも大きな違いがないといえる。この結果はただちに周波数特性が電極の形状には依存しないことを示すものではないが、波長に比べて十分に小さい電極の場合には差は出にくいと仮定することの妥当性を示唆しているとは言えるだろう。

電極配置や形状が変化しても伝搬帯域があまり変わらないという点は通信システムの実用化にとって有利である。

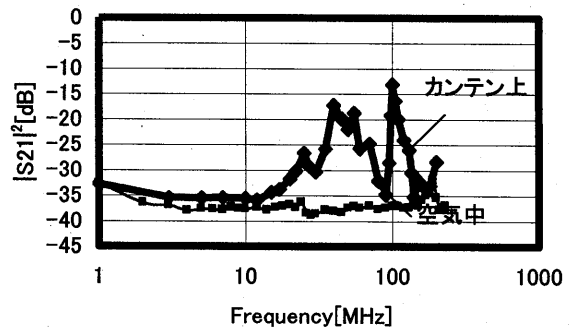


図4 伝搬特性 ( $L_p=50\text{ mm}$ )

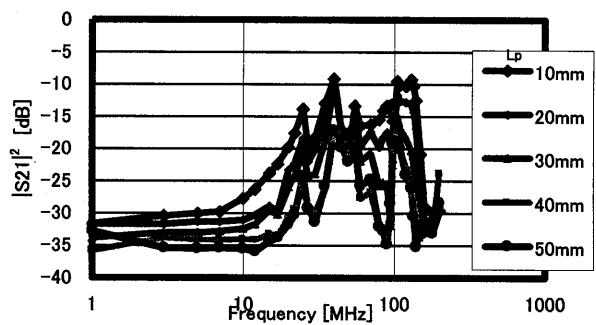


図5 電極間距離による変化 ( $W=15\text{ mm}$  固定)

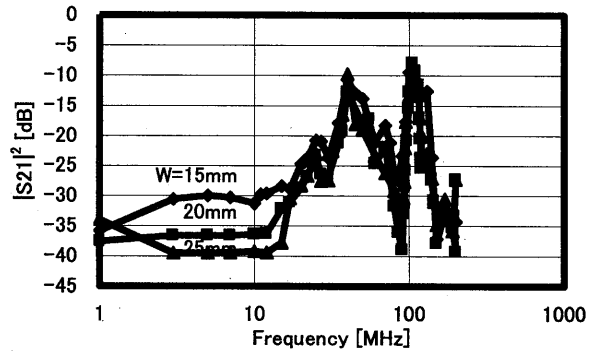


図6 電極間距離による変化 ( $L_p=40\text{ mm}$  固定)

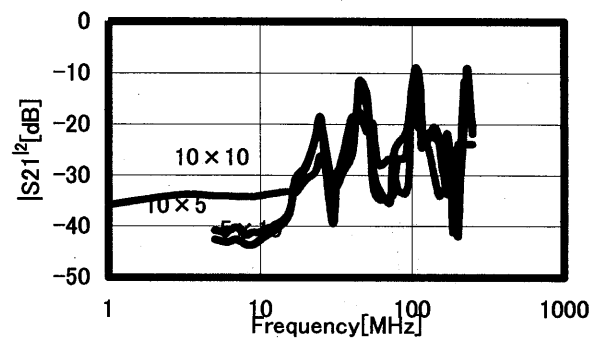


図7 電極形状

#### 4. 数値解析

これらの実験結果から伝送路に関する物理的な説明をする必要がある。しかしながらカンテンの電磁的性質や伝搬モードについてほとんど理解されていない。そこで、カンテン自体は等方性の誘電体媒質と仮定して、その上に図8のように電極を置き、裏面は空气中に露出しているような物理モデルを用いて数値解析を行った。ペアになる電極は平衡でドライブするものとし入出力回路の特性インピーダンスを $50\Omega$ とした。メッシュサイズは $1\text{mm}$ とし、解析領域は $250 \times 250 \times 250$ の立方体としている。なお、数値解析にはモーメント法を使うエムイーエル社のSNAP Fieldを使用した。

2. において測定したカンテンの電気的特性を用いて解析した結果の一例を図9に示す。(1 - 1)の電極がある側(下側)は電極に流れる電流が多く、(2, - 2)側はほとんど流れない。誘電体の厚さや解析空間、導電率などを変えた計算を行ってみた

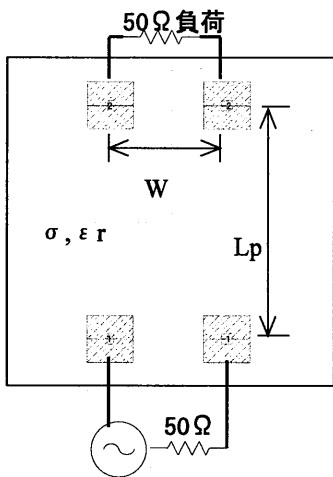


図8 シミュレーションモデル

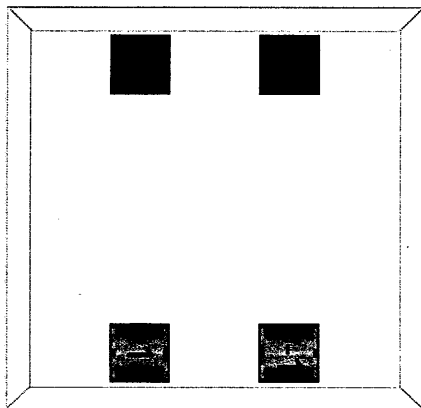


図9 解析例 (W=15mm, Lp=45mm)

が、VHF帯域において信号が伝搬することを示すような結果を得ることができなかった。たとえば導電率を高くすると、HF帯ではなべて減衰量が低下するがVHF帯にはほとんど影響がない。このことはVHF帯では誘電体内を電磁波が通過していないということを意味すると思われる。

しかしながら、ここで比誘電率を十分高くすると、VHF帯でのS21を大きくし、実験値と近い結果を得ることができることを見出した。図10には比誘電率 $\epsilon_r$ が30の場合と5000の場合のS21, S11の周波数特性の計算結果を示す。この場合の、 $\sigma = 0.08\text{S/m}$ , 比透磁率1, 誘電体厚 $15\text{mm}$ としている。同図にはS11も記しているが計算上は悪くはないことを示している。確認のためポートインピーダンスを $100\Omega$ ,  $200\Omega$ とした解析を試してみたところ、かえってS11が大きくなり、悪化することを確認した。

#### 5. まとめ

生体表面での電磁波伝搬を扱うための準備的な研究を行った。今回はカンテンを簡単な生体モデルと考え、カンテン表面の電磁波伝搬の測定実験及び数値解析を行った。

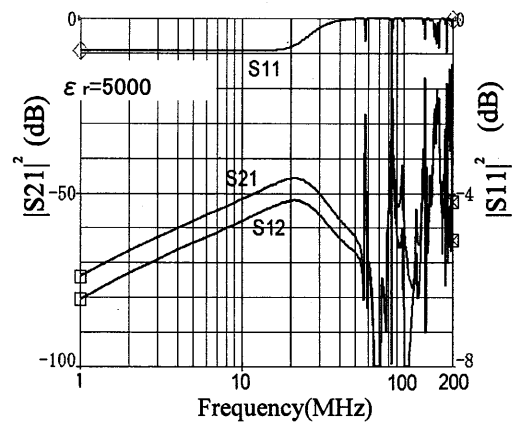
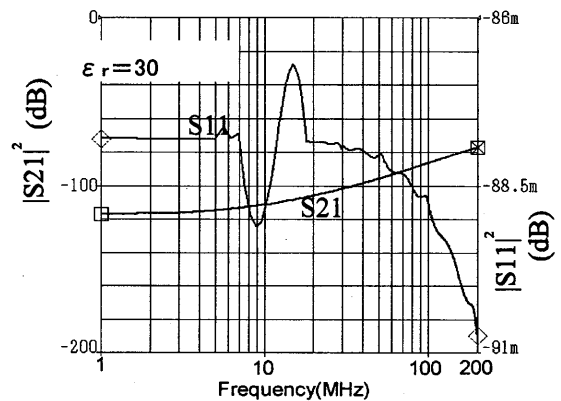


図10 比誘電率と伝送帯域

はじめに、カンテン表面の伝搬損失特性を測定し生体表面での通信に利用可能な周波数帯域を調べた。40 MHz, 100 MHz の VHF 帯において伝搬可能な帯域があり、通信に利用可能であると思われる。その帯域では電極間隔や電極形状を変えてもほぼ同じ特性を示す。

次に、実測した誘電率、導電率を導入して数値解析を行ったが、VHF 帯での伝搬モード解析を行ったが目指すような伝送特性にはならなかった。そこで、各パラメータを変化させたところ、比誘電率 5000 などと極端に大きくすることで実験結果に適する結果が得られることが分かった。比誘電率が含水組織の知られている誘電率は 50 程度であるにもかかわらず、それに比べても極端に大きいことから、偶然の一致であるのか、それとも、なんらかの物理的現象として説明できるものなのかは今のところ不明である。一応考えられるのは、構成する分子の共振周波数に近いために誘電率が急激に変化するような場合かも知れない。この点については今後の研究

課題としたい。ともかく、カンテンの表面に VHF 帯の伝送帯域が存在するということが非常に興味深いところである。HF 帯では電磁波が誘電体内を優先的に通過し、VHF 帯では表面を伝搬するということが確認できた。

[1] 板生 清：“ウェアラブル・コンピュータとは何か”, NHK 出版, May, (2004).

[2] 藤井 勝之, 伊藤 公一, 田島 茂：“人体を伝送路として利用した通信システムのモデル化に関する検討”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 56, No. 11, pp. 1845-1849, Nov., (2002).

[3] 大森 豊明：“電磁気と生体”, 日刊工業新聞社, p159, p164, (昭和 62 年).

[4] 岡部 雅之, 柚木 孝介, 田中 聡：“生体モデルとしてのカンテン表面の電磁波伝搬”, 平成 17 年度電気・情報関連学会中国支部連合大会講演論文集, p. 53, (2005).