

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報理工 学研究科 情報・通信工学 専攻 博士前期課程		
氏名	金子 将大	学籍番号	1531027
論文題目	超音波変換無線中継方式における伝送特性の解析		
要旨	<p>無線通信は人と人との通信のみならず、今後は機器間 (M2M) の通信に広く使われることが想定される。その導入事例の1つとして工場における機器の制御システムの無線化がある。しかし、実環境では鉄板などの金属隔壁に電波が遮蔽されて無線通信が困難な場合が存在する。そこで無線信号をまず数 MHz 以下の IF(Intermediate Frequency) 周波数に変換し、変換された信号を超音波探触子(セラミックサウンダ)を用いて電気信号から音響信号に変換することで遮蔽物内部を通過させた後に電気信号に再変換し、さらに周波数変換して元の周波数の無線信号を中継する超音波無線中継方式が提案されている。</p> <p>この中継方式を実現するために考慮すべき点として、金属隔壁など電波遮蔽物における音響信号の信号伝送特性の影響がある。そこで媒質内における超音波伝搬を弾性 (Elastic)有限時間領域差分法(FDTD 法: Finite-Difference Time-Domain method)により解析し、中継信号の伝送特性を実測値とシミュレーション値で比較することで、解析法の妥当性を検証した。送信無線信号としてはサウンダの周波数特性によるスペクトルひずみを受けにくい無変調正弦波と、遮蔽物内部で生じる遅延波による特性の劣化の可能性を考慮して OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)信号について、中継信号電力と信号スペクトルを評価した。その結果から弾性 FDTD シミュレーションによる音響信号の伝送特性の評価がある程度可能であることを示した。</p> <p>これらの検討結果から超音波無線中継方式を使用した無線通信の実用可能性を示すと共に、超音波探触子や音響媒質の選択、等化器の使用などによるさらなる通信性能の改善の必要性があることを示した。</p>		

平成 28 年度 修士論文

超音波変換無線中継方式における
伝送特性の解析

電気通信大学 大学院 情報理工学研究科
情報・通信工学専攻 情報通信システムコース

学籍番号 1531027

氏名 金子 将大

主任指導教員 山尾 泰 教授
指導教員 藤井 威生 教授
提出日 平成 29 年 3 月 10 日

概要

無線通信は人と人との通信のみならず、今後は機器間（M2M）の通信に広く使われることが想定される。その導入事例の1つとして工場における機器の制御システムの無線化がある。しかし、実環境では鉄板などの金属隔壁に電波が遮蔽されて無線通信が困難な場合が存在する。そこで無線信号をまず数 MHz 以下の IF(Intermediate Frequency) 周波数に変換し、変換された信号を超音波探触子(セラミックサウンダ)を用いて電気信号から音響信号に変換することで遮蔽物内部を通過させた後に電気信号に再変換し、さらに周波数変換して元の周波数の無線信号を中継する超音波無線中継方式が提案されている。

この中継方式を実現するために考慮すべき点として、金属隔壁など電波遮蔽物における音響信号の信号伝送特性の影響がある。そこで媒質内における超音波伝搬を弾性(Elastic)有限時間領域差分法(FDTD 法 : Finite-Difference Time-Domain method)により解析し、中継信号の伝送特性を実測値とシミュレーション値で比較することで、解析法の妥当性を検証した。送信無線信号としてはサウンダの周波数特性によるスペクトルひずみを受けにくい無変調正弦波と、遮蔽物内部で生じる遅延波による特性の劣化の可能性を考慮して OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)信号について、中継信号電力と信号スペクトルを評価した。その結果から弾性 FDTD シミュレーションによる音響信号の伝送特性の評価がある程度可能であることを示した。

これらの検討結果から超音波無線中継方式を使用した無線通信の実用可能性を示すと共に、超音波探触子や音響媒質の選択、等化器の使用などによるさらなる通信性能の改善の必要性があることを示した。

目次

概要.....	0
第1章 序論.....	1
第2章 基礎事項.....	2
2.1 電波と超音波の特徴.....	2
2.2 電気音響変換器.....	2
2.3 無線信号変調方式.....	4
第3章 関連技術.....	5
3.1 超音波変換無線中継方式.....	5
3.2 サウンダと整合回路の特性.....	6
3.3 有限時間領域差分法(FDTD 法).....	10
第4章 弾性 FDTD 法と超音波変換無線中継.....	11
4.1 2次元弾性 FDTD 法.....	11
4.2 境界条件と安定条件.....	14
4.3 電気音響変換伝送系.....	15
4.3.1 シミュレーションで考慮するパラメータ.....	15
4.3.2 中継信号電力と周波数スペクトルの求め方.....	17
第5章 弾性 FDTD 法による伝送特性の評価.....	19
5.1 粒子速度分布と中継信号電力.....	19
5.2 中継信号周波数スペクトル.....	23
第6章 結論.....	28
謝辞.....	29
参考文献.....	30
関連発表.....	31

第 1 章 序論

無線通信は人と人との通信のみならず，今後は機器間 (Machine to Machine) の通信に広く使われることが想定されている[1]．無線による機器間通信の導入によってワイヤリングコストの削減や機器設置の自由度を向上させることが可能となる．その例の 1 つとして工場における機器の制御システムの無線化がある[2]．しかし，実環境では鉄板などの金属隔壁に電波が遮蔽されて無線通信が困難な場合が存在する．そこで無線信号をまず数 MHz 以下の IF(Intermediate Frequency) 周波数に変換し，変換された信号を超音波探触子(セラミックサウンダ)を用いて電気信号から音響信号に変換することで遮蔽物内部を通過させた後に電気信号に再変換し，さらに周波数変換して元の周波数の無線信号を中継する超音波無線中継方式が提案されている[3]．この中継方式を実現するために考慮すべき点として，金属隔壁など電波遮蔽物における音響信号の信号伝送特性の影響がある．さらに伝送特性に影響を与える要素は音響媒質中に限らない．本研究ではサウンダとこれを駆動する電気回路との不整合により発生する損失，電気信号と音響信号の変換に生じる変換利得，サウンダのくさび(アクリル材)中の伝搬損失や鉄板中の伝搬損失などに加え，サウンダ内の圧電素子から放射される送受信総合の指向性も考慮する．本研究では共振周波数が 1.9 MHz 程度の 45° の傾斜を有する斜角サウンダを送信用・受信用に各 1 個用意し，送受信サウンダを直接接触させる場合とサウンダ間に厚さが 20 mm の鉄板を挿入する場合について条件を変えつつ実験・シミュレーションを行った．まず弾性 FDTD シミュレーションを用いて，このような電気音響変換伝送系における超音波伝搬を解析し，受信サウンダで得られた中継信号の伝送特性を実測値とシミュレーション値で比較することで，解析法の妥当性を検証した．送信無線信号としては，サウンダの周波数特性によるスペクトルひずみを受けにくい無変調正弦波と，遮蔽物内部で生じる遅延波による特性の劣化の可能性を考慮して OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)信号の 2 種類とし，中継信号電力と信号スペクトルを評価した．その結果から弾性 FDTD シミュレーションによる音響信号の伝送特性評価の妥当性を示す．

第2章 基礎事項

超音波変換無線中継方式の解析においては、電波と超音波の物理的性質の違いを理解する必要がある。さらに電気音響変換器の性質や媒質内を伝搬させる超音波信号の変調方式について検討する必要がある。本章では、超音波変換無線中継方式を構成するいくつかの要素について説明する。

2.1 電波と超音波の特徴

無線通信では空間を超高速で伝搬する電波や光を用いた通信が主流であるが、一方で低速の超音波を用いた通信も存在する。超音波の特徴として電波や光が大きく減衰してしまう水中や金属、コンクリートなどの媒質中を通過可能であることなどが挙げられる。この性質を利用して、建造物内部の傷を超音波の反射を利用して調べる非破壊検査や生体内部の検査技術に応用されている[4]。しかしながら超音波は使用する周波数の2乗に比例して損失が大きくなるので[5]、使用周波数は用いられる帯域幅を満たしつつ低損失が得られるように選択する必要がある。そこで本研究では比較的損失が大きい中心周波数が数MHz程度の超音波を用いて、各種実験・シミュレーションを行った。

2.2 電気音響変換器

電気音響変換器（以下サウンダ）とは圧電効果・逆圧電効果を利用して電気信号と音響信号を相互変換するデバイスである。圧電効果とは水晶やセラミックなどに圧力を加えることで圧力に比例した分極が発生する現象であり、逆圧電効果とは電圧を印加することで電圧に比例した圧力が発生する現象である。本研究では図1に示すセラミックを圧電素子として内蔵した斜角サウンダを使用している。

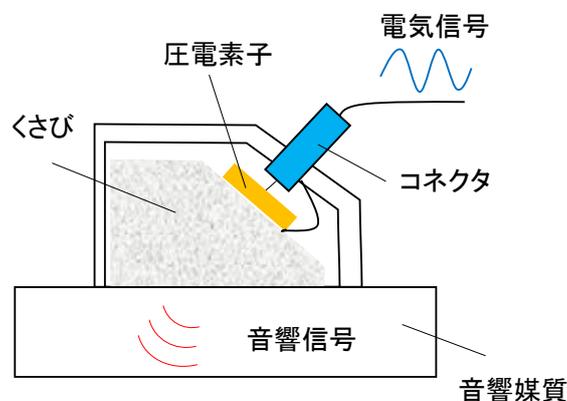


図1 斜角サウンダの構成図

音響媒質に対して圧電素子が斜角を有していることで、圧電素子から放射された音響信号が音響媒質境界において反射し、送信信号と干渉するのを避けることができる。サウンドに電力を入力し、超音波として音響媒質中を透過させることで、無線信号の中継を試みる。まず送信側ではコネクタを通過した電気信号が電圧として圧電素子に印加され、電圧に比例した圧力が発生する。すると圧力が音響信号としてくさび（アクリル材）中を伝搬して、音響媒質中に透過していく。受信側では同様のサウンドを用いて音響媒質を透過してきた音響信号を電気信号に再変換することで無線信号の中継が可能になる。

またサウンドに用いられている圧電素子はその共振周波数付近で図 2 のような等価回路で表すことができる。

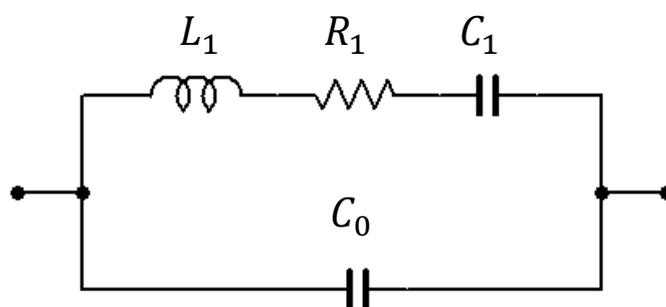


図 2 圧電素子の等価回路

ここで C_0 は圧電振動子の誘導率と電極の寸法から決定される容量であり、振動子に流れる電流成分を表している。 L_1 、 C_1 は振動子の振動モード、素子の寸法、弾性率、圧電定数などで決まる機械振動を表し、 R_1 は機械振動による損失を表している。実験で得られたサウンドの周波数特性とこの等価回路を用いて、使用したサウンドの C_0 、 L_1 、 C_1 、 R_1 のパラメータを決定することができる。

サウンドが電気エネルギーと機械的エネルギーを変換する効率を表す定数として電気機械結合係数 $k(\%)$ が定義されている。圧電素子に入力されるエネルギーを E_i 、圧電素子から出力されるエネルギーを E_o とすると、電気機械結合係数の二乗は(1)式で定義される。

$$k^2 = \frac{E_o}{E_i} = \left(\frac{\pi \cdot f_r}{2 \cdot f_a} \right) \cot \left(\frac{\pi \cdot f_r}{2 \cdot f_a} \right) \quad (1)$$

f_r はサウンドの共振周波数、 f_a は反共振周波数である。実験では直接的に E_i 、 E_o を求めるのは困難であるため、実際には実験で得られた f_r 、 f_a の値から電気機械結合係数を求めた。

2.3 無線信号変調方式

直交周波数分割多重方式 (OFDM; Orthogonal Frequency Division Multiplexing)[6]はマルチキャリア通信システムの一つとして知られている。地上波デジタル放送，無線LAN，電力線モデムなどの伝送方式に実用されている。シングルキャリア通信ではある一定の周波数帯域幅を一つのキャリアで通信するのに対し，マルチキャリア通信は一定の帯域幅を複数のサブキャリアに分割して通信する。OFDMの特徴として周波数軸上でサブキャリア同士を重ね合わせるように配置できるため，周波数利用効率を向上させることができる。

OFDMを用いる他の利点として，マルチパスや周波数選択性フェージングの影響をうけにくいことも挙げられる。図3は周波数選択性フェージングが存在する伝送路においてシングルキャリア，マルチキャリア(OFDM)通信をそれぞれ行った場合の信号のスペクトルが受ける影響を示している。シングルキャリアの場合，フェージングにより信号は大きく歪んでしまうため復調が困難になる。一方マルチキャリア(OFDM)の場合はサブキャリアの帯域の狭さにより，サブキャリア単位で見ればフェージングの影響は単純な減衰となり復調が可能である。

本研究で対象とする機器間通信用の規格としては，第4世代移動通信のLTE規格を3GPPが機器間通信向けに狭帯域化した，eMTC(Enhanced Machine Type Communication)[7]を想定した。eMTCでは，既存の携帯電話基地局を利用して従来のスマートフォン・携帯電話向け通信サービスとIoT向けの通信サービスが同時に提供され，IoT端末はLTE信号内の6リソースブロック（帯域幅1.08 MHz）のみを受信する。したがって，音響変換中継伝送においても，この帯域幅を伝送できるようにシステムを構築することとする。帯域幅1.08 MHzをカバーするには，音響中心周波数は最低でも1.5 MHz以上が必要であり，本検討では中心周波数が1.9 MHzのサウンダを使用した。

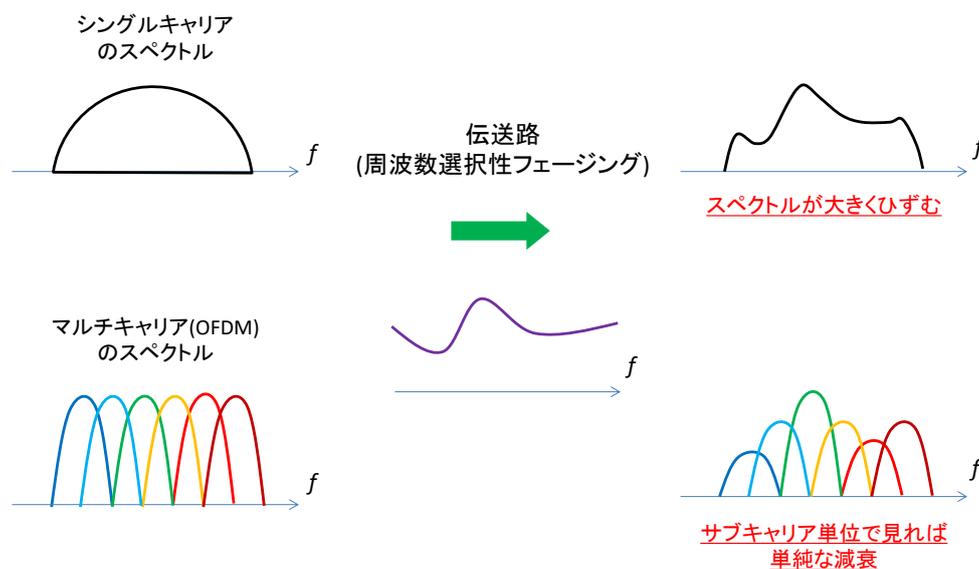


図3 シングルキャリアとマルチキャリアの減衰

第3章 関連技術

本章では超音波変換無線中継方式の概要とそれに関連するサウンダと整合回路の特性について説明する。さらに本方式における超音波伝搬を解析する手法である FDTD 法の概要についても説明する。

3.1 超音波変換無線中継方式

本研究で検討している超音波変換無線中継方式の構成図は図 4 である。中継器は受信した中心周波数 f_c の RF 信号と周波数 f_{LO} の局部発振信号を DBM (Double Balanced Mixer) により乗算することで、RF 信号を中間周波数 f_{IF} の信号にダウンコンバートする。その後、送信側のサウンダにより電気信号を音響信号に変換して音響媒質中を通過させ、通過した音響信号は受信側のサウンダにより電気信号に変換される。次に送信側と同じ周波数 f_{LO} の局部発振信号を DBM により中間周波数 f_{IF} の信号に乗算することで、再び周波数 f_c の RF 信号にアップコンバートされる。最後に RF 信号を増幅してアンテナから送信することで中継が完了する。なお中間周波数については後述する電気音響変換効率を考慮し、使用するサウンダの共振周波数付近を使用した。本方式において音響媒質に対して送受信サウンダをどこに設置するかで伝送特性は大きく変動する可能性がある。本研究ではサウンダの水平距離を変動させ、送受信サウンダ間の距離が伝送特性に与える影響を実験・シミュレーションにより評価した。

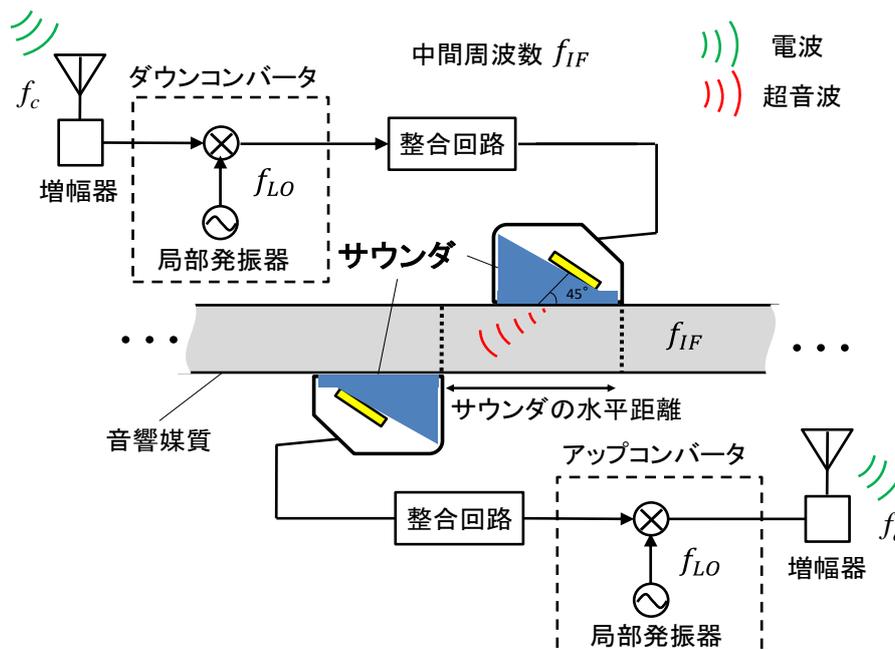


図 4 超音波変換無線信号中継方式の構成図

3.2 サウンダと整合回路の特性

本研究で使用したサウンダは 1.7~1.9MHz 付近の共振周波数を有している。図 5 は送受信サウンダを直接結合させた時に±3V の白色雑音を送信サウンダから入力し、受信サウンダからの出力をパワースペクトル密度で表したものである。整合回路の挿入の有無により特性が約 3dB 程改善していることが分かる。本研究では超音波変換無線中継方式における音響媒質中の超音波伝搬を弾性 FDTD シミュレーションで解析するため、サウンダの周波数特性をシミュレーションに組み込む必要がある。そこでこれら実測値と図 2 の圧電素子の等価回路を用いて、サウンダの周波数特性の計算値を求める。

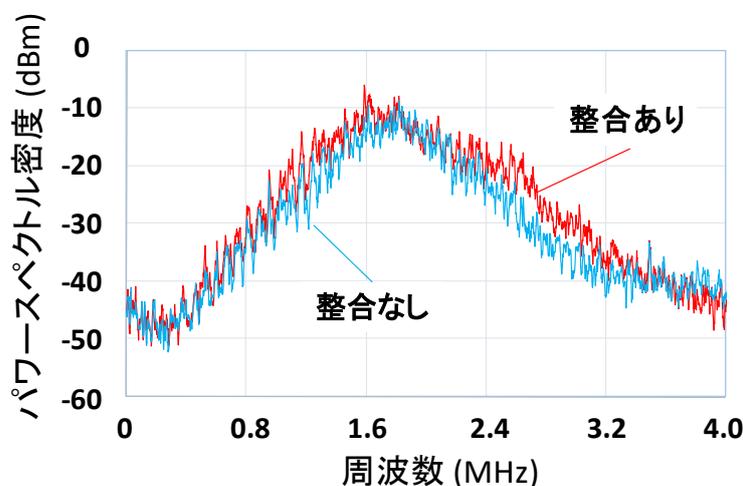


図 5 整合の有無によるサウンダの周波数特性

サウンダで電気信号と音響信号を相互変換する際に生じる損失を小さくするためには特性インピーダンスを 50Ω に整合する必要があるため、図 6 のようにコイルとコンデンサから構成される整合回路を使用した。

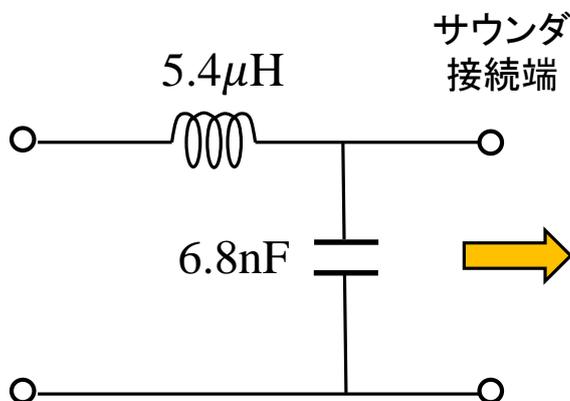


図 6 サウンダの整合回路

図 6 の整合回路を圧電素子の等価回路に連結した回路図が図 7 である．このときの回路パラメータを表 1 に示す．各パラメータの値は，共振周波数と反共振周波数の計算値が実測値に近似するようにそれぞれ設定した．

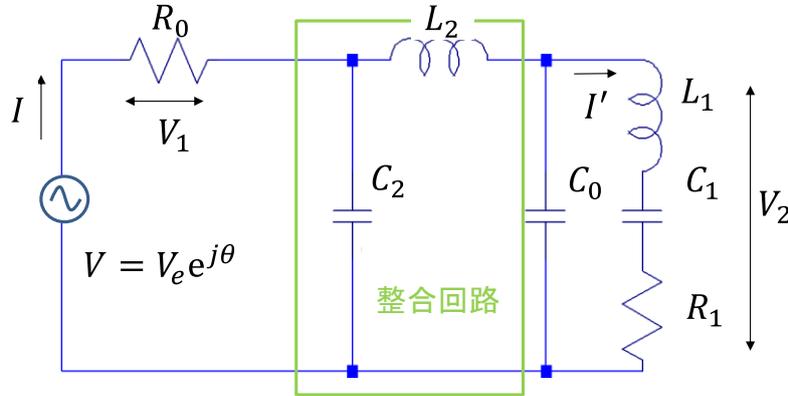


図 7 サウンダと整合回路を連結した回路

表 1 回路パラメータ

R_0	50Ω
R_1	200Ω
L_1	$1.5 \times 10^{-5} \text{ H}$
C_1	$5.5 \times 10^{-10} \text{ F}$
C_0	$1.3 \times 10^{-9} \text{ F}$
L_2	$5.4 \times 10^{-6} \text{ H}$
C_2	$6.8 \times 10^{-9} \text{ F}$
f_r (計算値)	1.750 MHz
f_r (実測値)	1.720 MHz
f_a (計算値)	2.090 MHz
f_a (実測値)	2.215 MHz

図 7 の回路において実際にサウンダに入力された電力が消費される箇所は抵抗 R_1 と入力インピーダンス R_0 である．2 章で説明した通り抵抗 R_1 は圧電素子の機械振動による損失を表している．したがって(1)式の電気機械結合係数と合わせて R_1 における消費電力特性を算出することにより，サウンダの周波数特性およびサウンダ入力電力特性を同時に求めることができる．まず R_1 における消費電力 P_{R_1} を求める式は(2)式のとおり．

$$P_{R_1} = R_1 |I'|^2 \quad (2)$$

すなわち圧電素子の等価回路のうち R_1 に流れてくる電流 I' を用いて消費電力 P_{R_1} を求めることを考える．まず電流 I' を求めるには付加電圧 V_2 を用いて(3)式のように算出できる．

$$I' = \frac{V_2}{R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{V_2}{R_1 + jX_1} \quad (3)$$

電圧 V_2 は圧電素子の等価回路部に並列に付加されているので、右端のインピーダンス部を式の分母にしていることが分かる。なお虚数部は式の簡略化のため X_1 として(4)式のようにまとめた。

$$\begin{cases} Z_0 = \frac{1}{j\omega C_0} & \equiv jX_0 \\ Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} & \equiv R_1 + jX_1 \\ Z_2 = \frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{j\omega L_2}} & \equiv jX_3 \end{cases} \quad (4)$$

次に V_2 の値を求めるために入力インピーダンス R_0 に付加される電圧 V_1 を求めることを考える。 V_1 は(4)式を用いて(5)式のように立式化して求められる。

$$V_1 = R_0 I = \frac{R_0 V}{R_0 + \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{Z_1}} + Z_2} \quad (5)$$

すなわち回路の入力電圧 V を回路全体のインピーダンスで除算して R_0 を乗算した式になる。以上の式を用いて V_2 を(6)式より算出し、(7)式に代入することで図8に示すようにサウンダの周波数特性およびサウンダ入力電力特性を表す $P_{R_1} = P_{ML}$ が算出できる。ただしこのとき入力電圧 V は振幅が1の正弦波であるとする。

$$V_2 = V - V_1 = \left(1 - \frac{(Z_0 + Z_1)R_0}{(Z_0 + Z_1)(R_0 + Z_2) + Z_0 Z_1}\right) V \quad (6)$$

$$P_{R_1} = R_1 |I'|^2 = R_1 \left| \frac{V_2}{R_1 + jX_1} \right|^2 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_1^2} |V_2|^2 \quad (7)$$

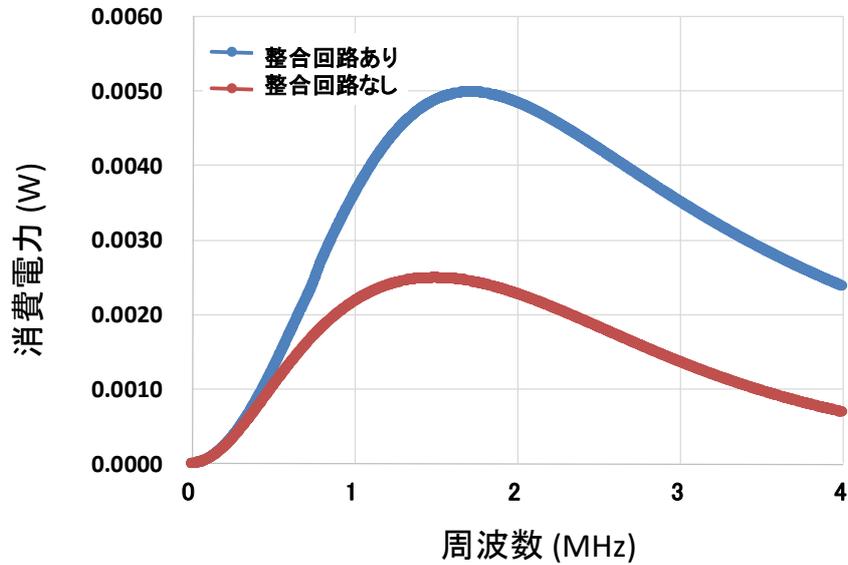


図 8 サウンダ入力電力特性 P_{ML}

図 5 と図 8 を比較すると縦軸は異なるが，その周波数特性のグラフの傾向はほぼ一致しているといえる．また図 8 において整合回路の有無を問わず，音響周波数を 1.9MHz 付近に設定した．(8)式により有能電力 P_0 を求め，グラフの消費電力値を(9)式に代入した結果，整合回路を挿入した場合は入力電力効率が 99%となり，整合回路を用いない場合は 47%とそれぞれ求められた．これらの特性は送受信サウンダにそれぞれ設定した．

$$P_0 = \frac{V_e^2}{4R_0} \quad (8)$$

$$\text{入力電力消費効率} = \frac{P_{R1}}{P_0} \quad (9)$$

実際に弾性 FDTD シミュレーションにこの特性を組み込むには縦軸の消費電力を電気音響変換効率に変える必要がある．そこで(10)式に示される電気音響変換効率係数を図 8 のそれぞれのグラフ全体に乗算し，その結果をシミュレーション上における各信号の周波数特性に乗算することで，電気音響変換による損失とサウンダの周波数特性を同時に再現する．

$$\text{電気音響変換効率係数} = \frac{k}{P_0} \quad (10)$$

3.3 有限時間領域差分法(FDTD 法)

FDTD 法(Finite-Difference Time-Domain method)[8]とは電波伝搬の時間変化を解析する数値シミュレーションとして利用されることが多い解析法であるが、流体や固体の振動・波動解析にも広く利用されている。FDTD 法は差分法を用いて解析空間における諸パラメータを計算していく。差分法は(11)式のように微分可能な関数 $f(x)$ を差分式で代用する手法である。

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \left\{ \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \right\}_{\Delta x \rightarrow 0} \quad (11)$$

左辺の微分式を右辺の差分式で近似していることが分かる。すなわち空間刻み Δx が小さいほど差分法の精度は高くなるといえる。しかし空間刻み Δx を設定する場合には計算結果が発散しないように FDTD 法における安定条件に気をつけねばならない。実際にシミュレーションを行うときは求めたいパラメータに対して時間ステップ Δt ごとに差分法を実行し、解析空間上の隣接する格子点どうしの差分をとることで計算する。

第4章 弾性 FDTD 法と超音波変換無線中継

固体媒質中の弾性波を解析する手法として弾性 FDTD 法[9]が知られている．本章ではこの弾性 FDTD 法の原理および解析式を提示するとともに，超音波変換無線中継解析において考慮すべき特性についても説明する．

4.1 2次元弾性 FDTD 法

弾性 FDTD シミュレーションを行うにあたって，解析の簡単化のため y 方向への音場が一樣である 2次元等方性固体を仮定する．このとき， $x-z$ 平面における固体中の超音波の伝搬は(12), (13)式で表される支配方程式で記述できる[9]．

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} T_{xx} \\ T_{zz} \\ T_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & 0 \\ c_{31} & c_{11} & 0 \\ 0 & 0 & c_{55} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} u \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ここで u , w はそれぞれ x , z 方向の粒子速度ベクトル， T_{xx}, T_{zz} は x , z 方向の垂直応力， T_{xz} はせん断応力， c_{ij} はステイフネス， ρ は媒質の密度である．3次元空間で微小粒子に働く応力と粒子速度の対応関係は図9で示される．

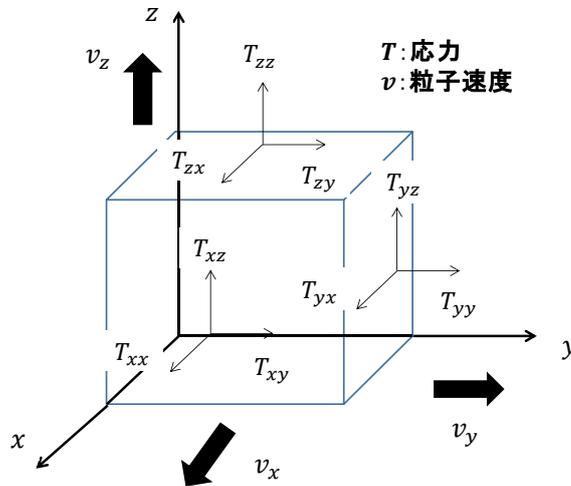


図9 3次元空間における粒子速度と応力

今回は2次元等方性固体を仮定しているため、 y 方向の粒子速度と応力は計算に用いないとする。弾性FDTD法は式(12)に示したフック則と式(13)に示した運動方程式の空間、時間微分を中心差分で近似することにより定式化することができる。以下、 n を時間サンプル番号とし、 i, k を整数で空間立方格子点での位置と定義すると、粒子速度と応力の各成分は図10が示すようにそれぞれ異なる格子点から求められることが分かる。

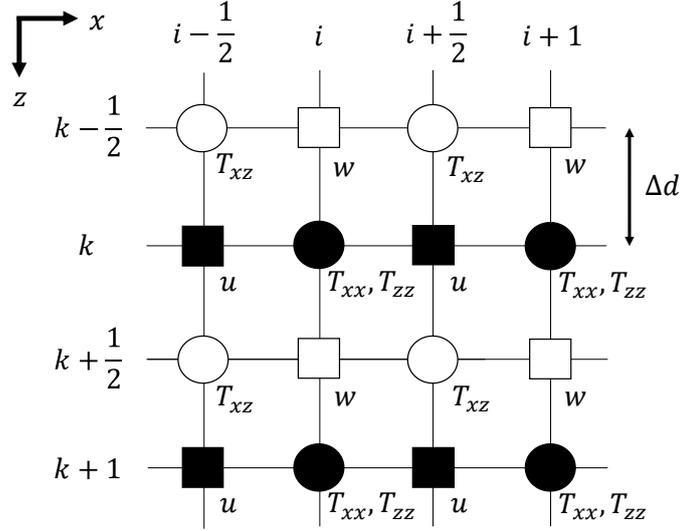


図10 弾性FDTD法における格子点配置図

ここで空間刻みを $\Delta x = \Delta z = \Delta d$ とすると、(12)、(13)式のそれぞれの第1式の空間・時間微分を中心差分すると(14)、(15)式のように記述され、応力と粒子速度は時間サンプル間隔 Δt ごとに交互に計算されていく。

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta d}{\Delta t} \left\{ T_{xx}^{n+\frac{1}{2}}(i, k) - T_{xx}^{n-\frac{1}{2}}(i, k) \right\} \\ & = c_{11} \left\{ u^n \left(i + \frac{1}{2}, k \right) - u^n \left(i - \frac{1}{2}, k \right) \right\} \\ & \quad + c_{13} \left\{ w^n \left(i, k + \frac{1}{2} \right) - w^n \left(i, k - \frac{1}{2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\Delta d}{\Delta t} \left\{ u^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, k \right) - u^n \left(i + \frac{1}{2}, k \right) \right\} \\ & = \left\{ T_{xx}^{n+\frac{1}{2}}(i+1, k) - T_{xx}^{n+\frac{1}{2}}(i, k) \right\} \\ & \quad + \left\{ T_{xz}^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2} \right) - T_{xz}^{n+\frac{1}{2}} \left(i + \frac{1}{2}, k - \frac{1}{2} \right) \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

弾性 FDTD シミュレーションでは(14), (15)式を解き, 空間立方格子上的格子点における粒子速度と応力を算出する. ただし本論文では受信した音響信号を電気信号に再変換するにあたって, 得られた粒子速度をそのまま用いるのではなく, 縦波と横波の粒子速度を分離する必要がある. (16)式は $x-z$ 方向の粒子速度 u, w からスカラ速度ポテンシャル ϕ を求める式である. スカラ速度ポテンシャルは縦波に相当する成分であり, これを求めることで各方向の粒子速度から縦波成分のみを抽出することができる. c_p, Z_0 はそれぞれ縦波の音速と媒質の音響インピーダンスを表している. 今 y 方向に一様な 2 次元場を仮定しているので, ϕ から x 方向の縦波粒子速度 u_ϕ , z 方向の縦波粒子速度 w_ϕ をそれぞれ(17), (18)式により算出できる. 得られたそれぞれの縦波粒子速度により, 音響信号から電気信号に変換する際に, 縦波信号成分のみを参照することができる.

$$\begin{aligned} \rho\phi^{n+1}(i, k) &= \rho\phi^n(i, k) \\ &+ \frac{c_p Z_0}{\Delta d / \Delta t} \left\{ u^{n+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - u^{n+\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, k\right) \right\} \\ &\quad + \frac{c_p Z_0}{\Delta d / \Delta t} \left\{ w^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) - w^{n+\frac{1}{2}}\left(i, k - \frac{1}{2}\right) \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Z_0 u_\phi^n\left(i + \frac{1}{2}, k\right) &= Z_0 u_\phi^{n-2}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) \\ &\quad + \frac{c_p}{\Delta d / \Delta t} \{ \rho\phi^{n-1}(i + 1, k) - \rho\phi^{n-1}(i, k) \} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Z_0 w_\phi^n\left(i, k - \frac{1}{2}\right) &= Z_0 w_\phi^{n-2}\left(i, k - \frac{1}{2}\right) \\ &\quad + \frac{c_p}{\Delta d / \Delta t} \{ \rho\phi^{n-1}(i, k) - \rho\phi^{n-1}(i, k - 1) \} \end{aligned} \quad (18)$$

4.2 境界条件と安定条件

超音波変換無線中継方式では、サウンドを構成するアクリル材や鉄板、空気など異なる音響媒質が接しているために、これらの境界面での反射率を考慮した境界条件を設定する必要がある。ここで音速を c 、境界の反射率を R 、 $\chi = c\Delta t/\Delta d$ とすると、境界付近における 1 次元の音圧 p は(19)式で定義できる[10].

$$p^{n+1}(i+1) = p^n(i) + \frac{(1+R)\chi - (1-R)}{(1+R)\chi + (1-R)} \{p^{n+1}(i) - p^n(i+1)\} \quad (19)$$

すなわち(19)式は Mur の 1 次吸収境界条件[11]を任意の反射率に拡張したものと言える。本論文では(19)式を 2 次元に拡張し、粒子速度の境界条件として適用した。

FDTD 法をシミュレーションで実装するにあたって、空間刻み Δd や時間サンプル間隔 Δt の大きさを適切に設定する必要がある。FDTD 法は微分方程式を差分法で計算するため、差分化するセルの大きさによっては値が正確さに欠けたり、場合によっては発散を起こすこともある[12]。まず時間に関して解を安定させるためには時間サンプル間隔 Δt は(20)式を満たす必要がある。

$$c \cdot \Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (20)$$

この条件式は Courant の安定条件とも呼ばれ、わずかでも満たさないと値が発散する。今回の解析は y 方向に一樣な 2 次元場であり、 $\Delta x = \Delta z = \Delta d$ を満たすことから次の(21)式のように書き換えることができる。

$$c \cdot \Delta t \leq \frac{\Delta d}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

続いて空間刻みに関して解を安定させるための条件を求める。差分近似を行うことで生じる数値誤差を小さくするための条件は、波長を λ とすると(22)式で求められる。

$$\left(\frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}}{\lambda}\right)^2 \ll 1 \quad (22)$$

(22)式の条件式により空間刻み Δd は想定する波長 λ の 1/10 から 1/20 以下程度に設定するのが好ましいとされている。また時間刻みの安定条件と同様に 2 次元場であることを考慮すると、今回の解析では(23)式のように書き換えて用いている。

$$\frac{2\Delta d^2}{\lambda^2} \ll 1 \quad (23)$$

4.3 電気音響変換伝送系

4.3.1 シミュレーションで考慮するパラメータ

超音波変換無線中継方式ではサウンダを音響信号の送受信器として使用することで固体媒質中の音響信号中継伝送を行う。本研究では音響信号を通過させる音響媒質として厚さ 20 mm の鉄板を使用した。図 11 はサウンダを用いた電気音響変換伝送系である。図 11 が示すように媒質を挟まず送受信サウンダを結合させた(a) 直接結合の場合とサウンダ間に厚さ 20 mm の鉄板を挿入した(b) 鉄板挿入の場合の 2 種類の条件で各種実験・シミュレーションを行った。

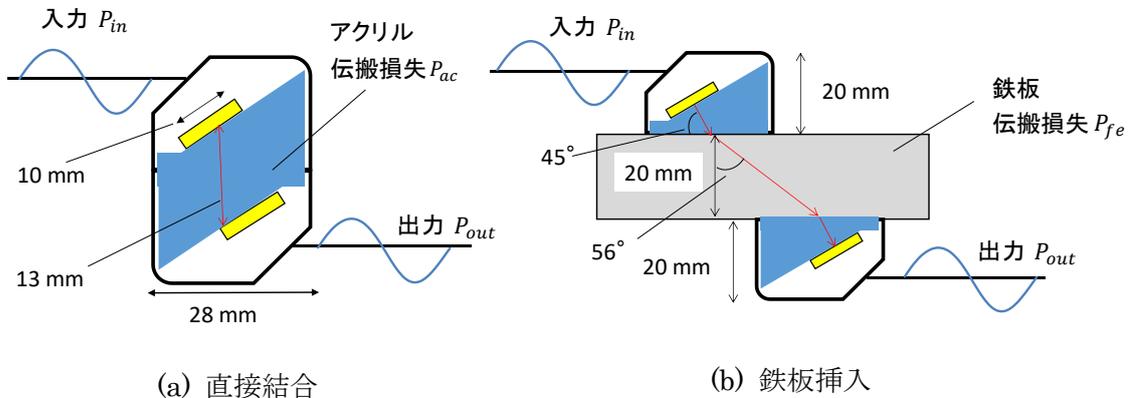


図 11 電気音響変換伝送系

使用するサウンダは媒質に対して 45° の音響入射角を有しており、アクリルから鉄板に縦波が 45° の入射角で入射した場合、スネルの法則より屈折角 56° の横波透過波が鉄板中に伝搬する。このとき縦波は鉄板境界で全反射することになる。またサウンダ中の圧電素子の寸法は縦横 10 mm の正方形であり、電圧が印加されることで圧電素子が振動し、縦波の超音波を発生させる。電気音響変換伝送系において考慮している損失はサウンダとこれを駆動する電気回路との不整合により発生する損失 P_{ML} 、電気信号と音響信号の変換に生じる変換利得 P_{CL} 、サウンダのくさび（アクリル材）中の伝搬損失 P_{ac} 、鉄板中の伝搬損失 P_{fe} などである。さらにサウンダに内蔵されている圧電素子から放射される超音波は高周波になる

ほど指向性をもつため、送受信総合の指向性を決定する関数 $f(m)$ も考慮する必要がある。以上のことを踏まえると電気音響信号変換伝送回路は図 12 のようになる。

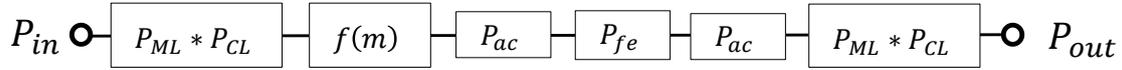


図 12 電気音響信号変換伝送回路

図 12 は鉄板挿入時の伝送回路図であるが、直接結合時には鉄板中の伝搬損失 P_{fe} がなくなる。 $f(m)$ は送信サウンダ上で送受信総合の指向性を与えるサウンダ音響振幅分布関数であり、(24)式に示す正規確率密度関数を粒子速度分布として離散音源の初期条件に与えることで指向性を得ることが可能である[13]。

$$f(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(m-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (24)$$

ここで離散音源は送信サウンダに内蔵されている圧電素子上に分布している。 m は音源の格子点の番号を示し、弾性 FDTD シミュレーションにおける空間刻み Δd によって定まるパラメータである。音源の格子点数を $M(1 \leq m \leq M)$ とすると離散音源群の中心点である μ は $\mu = M/2$ 、また実測値とのフィッティングから $\sigma = 15$ とした。すなわち図 13 に示すように、 M 個の離散音源から構成される圧電素子の中心で音響振幅が最大になるように、振幅に音源の位置で決まる $f(m)$ を振幅重みとして乗算することで、超音波に指向性をもたせた。

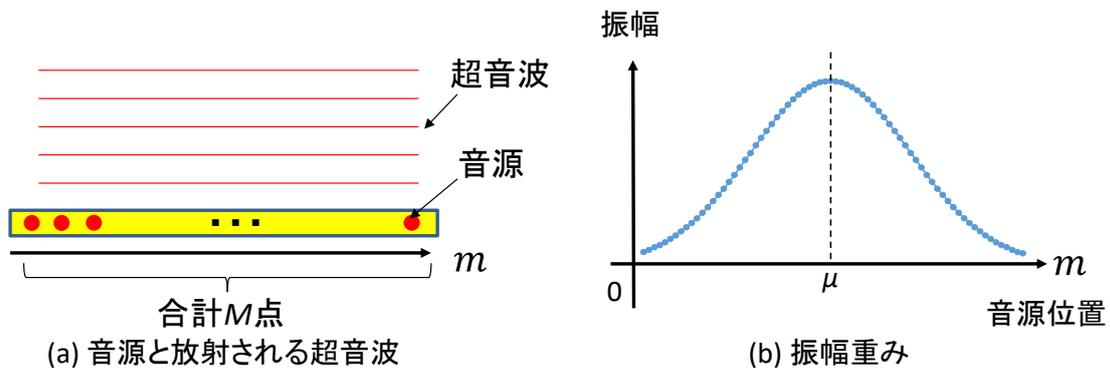


図 13 離散音源群と振幅重み

また媒質中で生じる伝搬損失は減衰係数 η と $x-z$ 方向の粒子速度 v, w の積で表現できる[14]。このとき減衰係数 η は式(25)で示される。

$$\eta = \frac{2k\alpha c}{\sqrt{k^2 - \alpha^2}} \quad (25)$$

ここで k は波数, c は音速, α は吸収係数である. 吸収係数は式(26)に示されるように距離 d , 入出力音響インテンシティ I_i, I_o , 入出力電力 P_i, P_o で表現できる. 吸収係数で用いられている各パラメータは実測値を使用している.

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \frac{I_o}{I_i} = -\frac{1}{d} \ln \frac{10^{\frac{P_o + P_{CL}}{10}}}{10^{\frac{P_i - P_{CL}}{10}}} \quad (26)$$

4.3.2 中継信号電力と周波数スペクトルの求め方

本論文では FDTD シミュレーションにおいて超音波伝搬解析を行った後, 得られた粒子速度から中継信号電力を求める必要がある. 2次元場を仮定しているので $x-z$ 方向の粒子速度 v_{xkm}, v_{zkm} から合成粒子速度 v^2 を(27)式から求める.

$$v^2 = \frac{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{m=1}^M \left\{ \left(v_{xtm} * \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right)^2 + \left(v_{ztm} * \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right)^2 \right\}}{M * T} \quad (27)$$

ここで v_{xkm}, v_{zkm} の粒子速度は図 14 が示すように受信サウンダに内蔵されている圧電素子上の M 個の受信点から求めることができる. つまり時間ステップごとに M 個の受信点にそれぞれ入力される M 個の瞬時粒子速度を計算する. この処理を入力信号のサンプル数 T 回行った結果, (27)式で示された合成粒子速度が得られる.

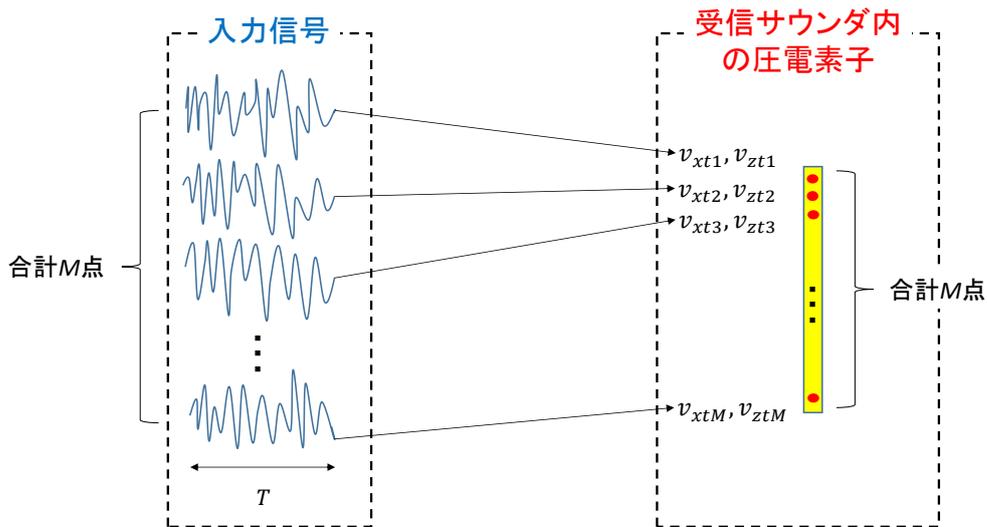


図 14 受信サウンダ内の圧電素子と入力信号の関係

次に合成粒子速度を用いて音響パワー P_U を(28)式, 音響インテンシティ I を(29)式から求めることを考える.

$$P_U = I \cdot S \quad (28)$$

$$I = \rho \cdot c \cdot v^2 \quad (29)$$

ただし c は媒質の音速, S はエネルギーの通過面積である. 合成粒子速度から音響インテンシティを算出し, 音響パワーを求めることができる. 得られた音響パワーを(30)式により **dBm** 単位に変換することで中継信号電力を計算する.

$$P_E = 10 \log_{10}(P_U \cdot 10^3) \quad (30)$$

周波数スペクトルを求める場合は中継信号電力を求めた場合と同様に, 受信点から(31)式に示す合成粒子速度を求める.

$$v = \frac{\sum_{t=\Delta t}^T \sum_{m=1}^M \left\{ \left(v_{x_{tm}} * \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \right) + \left(v_{z_{tm}} * \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \right) \right\}}{M * T} \quad (31)$$

(27)式と異なる点は(29)式により音響インテンシティを求めないため, 合成粒子速度が二乗されていないところである. (31)式で得られた合成粒子速度を **FFT** 処理により周波数スペクトルを求める.

第5章 弾性 FDTD 法による伝送特性の評価

本章では超音波変換無線中継方式において、実際に超音波が伝搬する電気音響変換伝送系における超音波伝搬を弾性 FDTD シミュレーションを用いて解析を行う。評価項目は中継信号の出力電力および周波数スペクトルである。これらの特性を解析することで音響媒質内での超音波伝搬の様子を知ることができ、今後のシミュレーション解析や超音波変換無線中継方式の設計に役立てることができる。

5.1 粒子速度分布と中継信号電力

弾性 FDTD シミュレーションでは送受信サウンダと音響媒質を含めた電気音響変換伝送系を主な解析対象とする。実際に超音波が伝搬するわけではないが、サウンダとそれを駆動する電気回路との整合損失を考慮するため、サウンダに連結する整合回路の入力電力特性 P_{ML} (図 8) もシミュレーション上でパラメータとして組み込んでいる。電気音響変換伝送系においてサウンダ間の水平距離の変化による中継信号電力の変動が想定される。そのため図 15 に示すようにサウンダ間の水平距離を変化させ、その時の中継信号電力をシミュレーションで求めた。

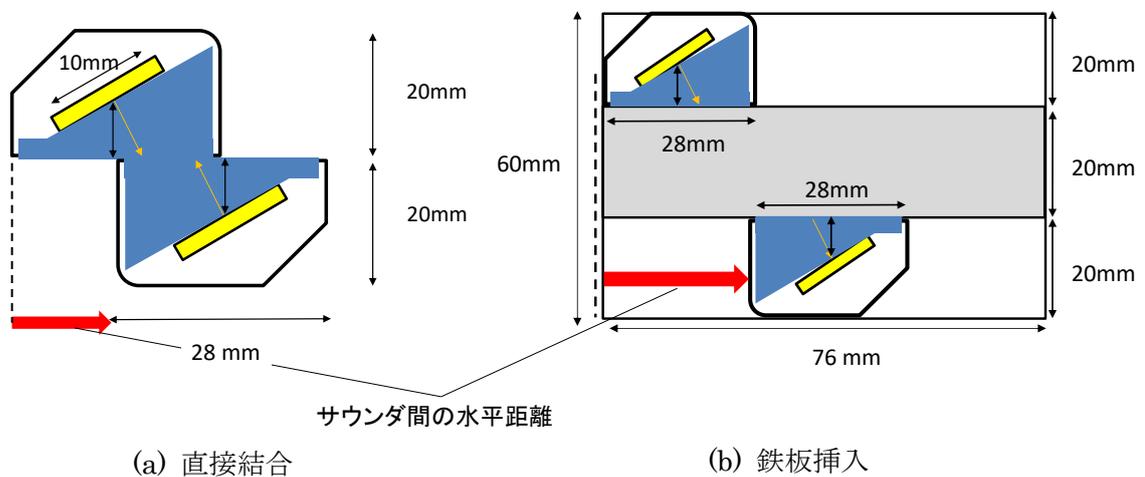


図 15 電気音響変換伝送系とサウンダ間の水平距離

まず中継信号電力を求める弾性 FDTD シミュレーションを行う。シミュレーション諸元を表 2 に示す。FDTD では空間をサンプルで扱うが、その時間サンプル間隔 Δt と空間刻み Δd の値は(21), (23)式の安定条件を満たし、値が発散しないよう注意した。今回サウンダから入射される縦波と鉄板中を伝搬する横波の波長を想定して空間刻みを 0.1 mm とした。図 11(a)に示したように今回のモデルでは圧電素子の横幅は 10 mm であり、サウンダ放射面

に対して 45° の傾斜を持っている. シミュレーションにおいて斜め 45° に隣接する格子点は $\sqrt{2}\Delta d$ なので圧電素子の格子点数 M を $M = 10/\sqrt{2}\Delta d \cong 72$ とした. なお送信信号には無変調正弦波を使用した.

表 2 シミュレーション諸元

		鉄板挿入	直結結合
送信信号		無変調正弦波	
搬送波周波数		1.9 MHz	
サウンド内媒質		アクリル	
サウンド変換効率 P_{CL}		45%	
波長 (縦波)	アクリル	1.4 mm	
	鉄板	3.1 mm	
波長 (横波)	アクリル	0.75 mm	
	鉄板	1.7 mm	
時間サンプル間隔 Δd		6.0 ns	
空間刻み Δd		0.1 mm	
α_{ac}		91.39 m^{-1}	
α_{fe}		93.61 m^{-1}	
試行回数		5000	3000

図 15 の電気音響変換伝送系において, サウンド間の水平距離が 20 mm におけるそれぞれの粒子速度分布を図 16 と図 17 に示す. 図 16 の直接結合の場合を見るとアクリル間の伝搬では反射が起きず, アクリル-空気間の伝搬では反射が起きており, 反射条件の効果が確認できる.

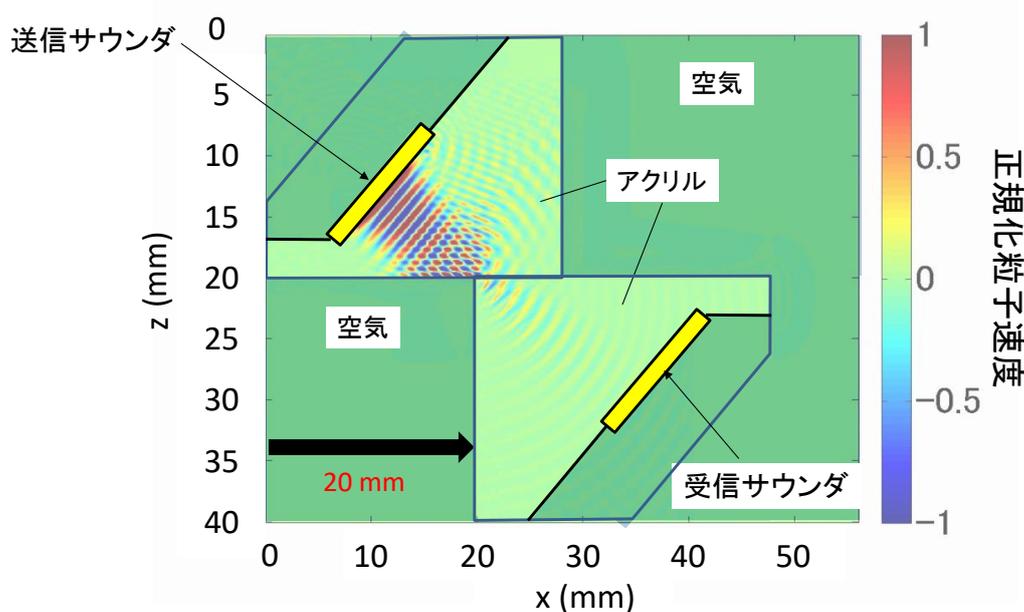


図 16 直接結合時の粒子速度分布

また(24)式の音響振幅分布関数の導入により、送信サウンダにおける圧電素子から放射される超音波の正規化粒子速度の強さを見ると圧電素子の中心付近で最大、両端付近で最小となっていることが確認できる。一方図 17 を見ると図 16 のアクリル-空気間の反射と比較してアクリル-鉄板間の反射が弱く、圧電素子から放射された超音波のほとんどが鉄板内に透過していくのが確認できる。これは隣接する媒質の音響インピーダンスの差が小さいほど反射が弱くなる性質によるものである。アクリル-アクリル間の伝搬とは異なりアクリル-鉄板間の伝搬では音速および波長が変化することによる伝搬波の屈折が生じていることも読み取れる。また鉄板挿入時は直接結合時と比べると超音波の伝搬距離が伸びるので、超音波の距離減衰の影響が顕著であり、受信サウンダ付近では粒子速度の強さは肉眼ではほとんど確認することができなくなっている。

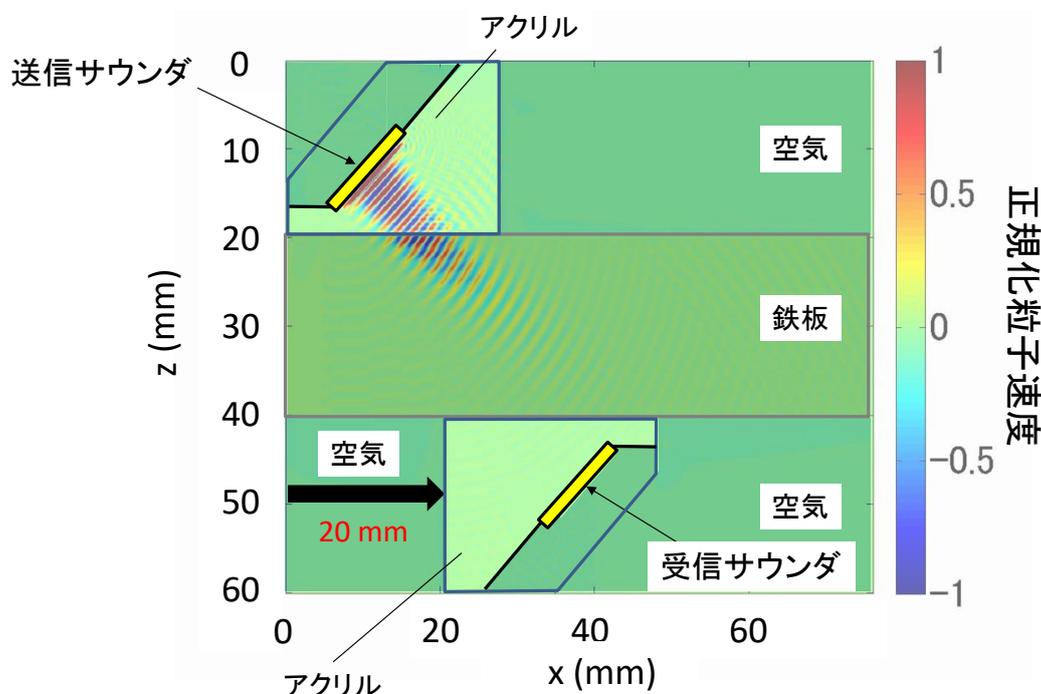


図 17 鉄板挿入時の粒子速度分布

直接結合時と鉄板挿入時それぞれの場合において、サウンダ間の水平距離の変化による受信サウンダにおける中継信号電力を実験値とシミュレーション値で比較したグラフを図 18, 図 19 に示す。図 18 の直接結合時の場合、サウンダ間の水平距離が 0~6 mm と 21~26 mm の場合には両者はほぼ一致しているのに対し、7~20 mm の間は最大 10 dB 近く実測値の方が低いことが分かる。これはサウンダ間を直接結合した場合、サウンダのズレが大きくなると放射された超音波の一部が空間に解放された接触面から空気中に放射されて損失になったためと考えられる。また今回のシミュレーションでは送受信サウンダ間の接触部分は同じアクリル素材で構成されているので反射は起きないものと仮定したが、実際には微小

な隙間ができる。このことが原因で両者の値が隔離してしまった可能性もある。次に図 19 の鉄板挿入時の場合における実験値とシミュレーション値は概ね一致していることが分かる。これは直接結合の場合と比較して、サウンダが常に鉄板に接しているかつ鉄板が空気よりアクリルとの反射率が低いことから、サウンダの放射面での多重反射が起りにくく、鉄板とアクリルの境界面における超音波の入射角度がサウンダの水平距離に依存しなかったことが要因と考えられる。

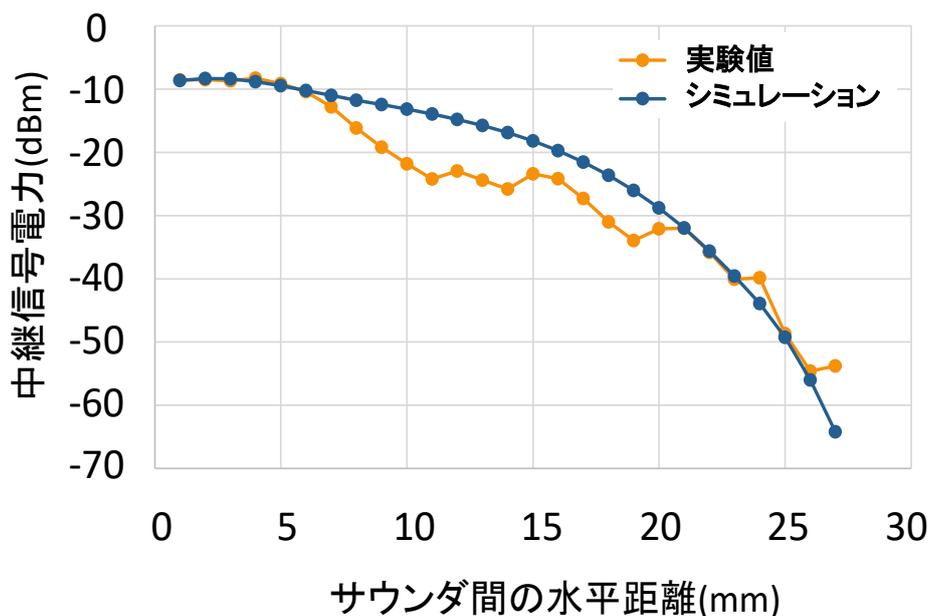


図 18 直接結合時の中継信号電力

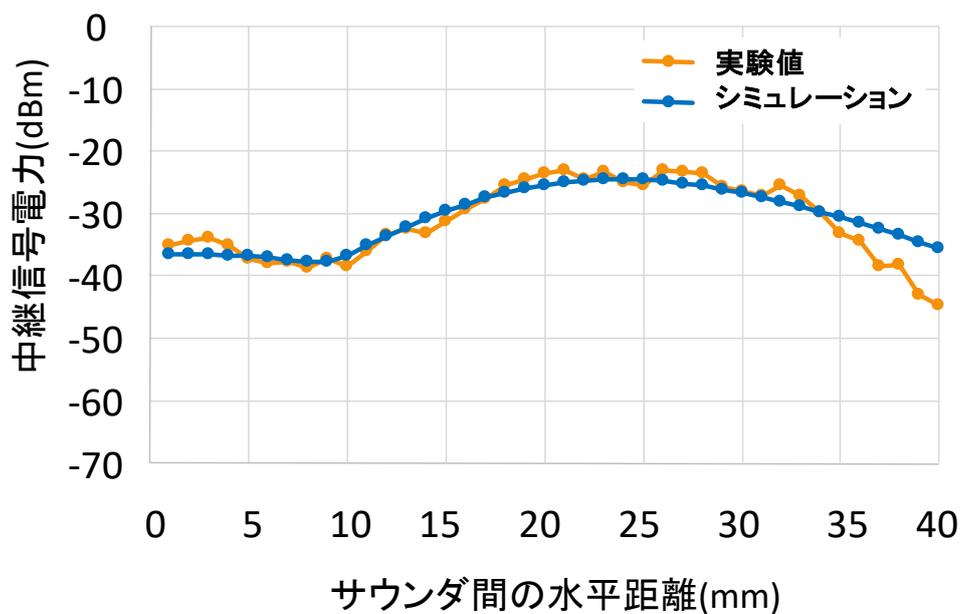


図 19 鉄板挿入時の中継信号電力

5.2 中継信号周波数スペクトル

無線中継信号の伝送特性を評価するため、伝送された無線信号の PSD(Power Spectral Density)解析を行う。音響媒質中の伝搬では媒質境界の反射で生じた遅延波による干渉で信号の伝送特性が劣化する可能性がある。そこで OFDM 信号を送信信号に用いることで、高いデータレートを保持しつつ遅延干渉に強い伝送が可能であることが知られている [15][16]。OFDM 信号伝送による PSD 評価のシミュレーション諸元を表 3 に、OFDM 送信信号スペクトルを図 20 にそれぞれ示す。サウンド間の水平距離は 5.1 章のシミュレーションにおいて中継信号電力が最大になる配置に固定して行った。すなわち直接結合時には 3 mm に鉄板挿入時には 27 mm にそれぞれ設定して検証を行った。図 20 の OFDM 送信信号に、図 8 で求めたサウンド入力電力特性 P_{IN} を乗算すると図 21、図 22 の送信サウンド出力特性をもつ信号が得られる。

表 3 PSD 評価シミュレーション諸元

波長 (縦波)	アクリル	1.4 mm	変調方式	OFDM/QPSK
	鉄板	3.1 mm	搬送波周波数	1.9 MHz
波長 (横波)	アクリル	0.75 mm	サブキャリア数	72
	鉄板	1.7 mm	サブキャリア間隔	15 kHz
音速 (縦波)	アクリル	2730 m/s	シンボル周期	66.7 μ s
	鉄板	5900 m/s	サンプリング周波数	1.92 MHz
音速 (横波)	アクリル	1430 m/s	サンプリング周期	520 ns
	鉄板	3200 m/s	周波数分解能	1 kHz
時間刻み Δt	4 ns		FFTサイズ	128
空間刻み Δd	0.05 mm			
離散音源間隔	0.14 mm			
試行回数	5000			

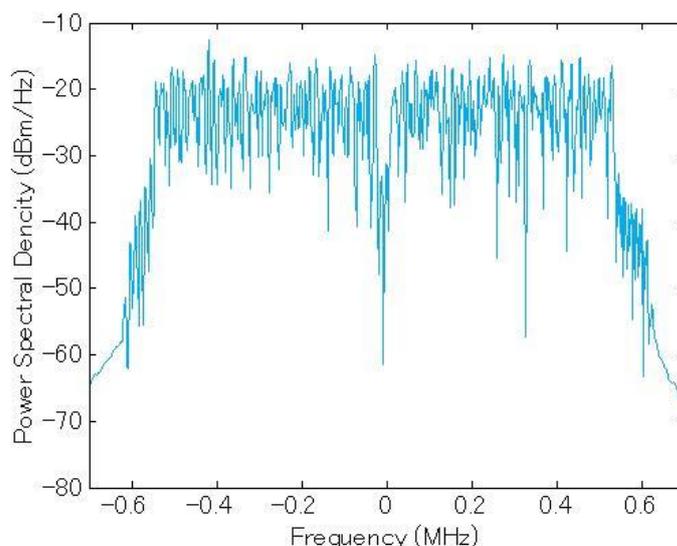


図 20 OFDM 送信信号スペクトル

図 21, 図 22 の 2 つの特性を比較すると, 図 20 の送信信号の PSD と比較して, 整合しない場合の送信サウンダ出力は全体的に 10 dB ほど低下するのに対して, 整合した場合は 5 dB 程度の低下になっていることが分かる. これは整合することでサウンダに入力電力が無駄なく電気音響変換に使用され, サウンダと駆動する電気回路との整合損失を抑えることができることを示している. 以降に示す受信サウンダ出力の結果はすべて整合されているものとする.

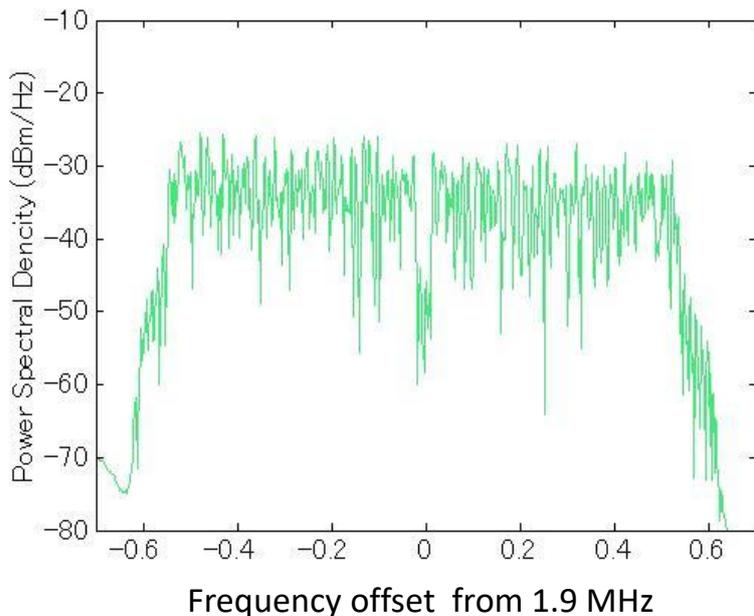


図 21 送信サウンダ出力(整合なし)

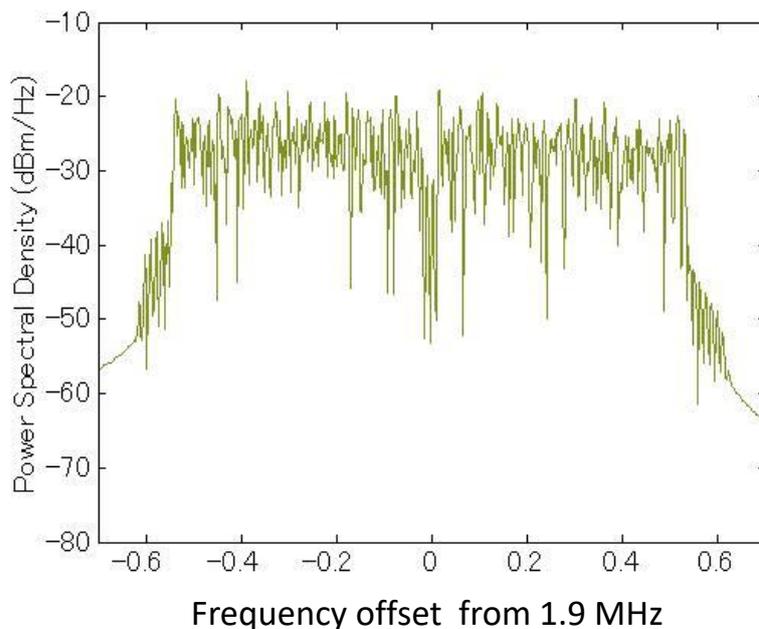


図 22 送信サウンダ出力(整合あり)

次に直接結合時の受信サウンダ出力を確認する。受信サウンダ側でも同様に P_{IN} を乗算すると図 23 の特性をもつ信号が得られる。また図 24 は受信サウンダ出力の実測値を示している。図 23, 図 24 を見ると実測値では OFDM 信号の PSD のレベルは概ね一致しており、またスペクトルの傾向も近似していることが分かる。実測値と比較してシミュレーション値ではスペクトルの変動が大きいのが、これは図 20 の OFDM 送信信号の特性による影響が大きいと考えられる。

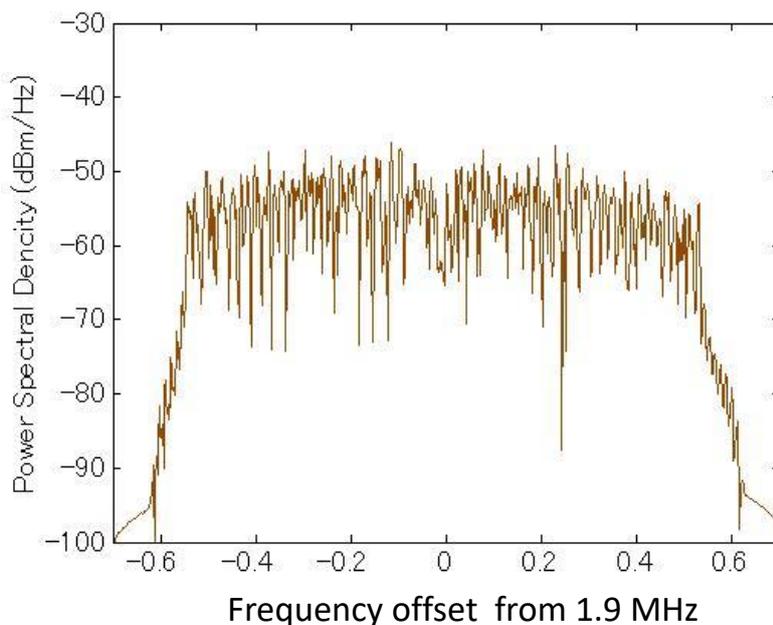


図 23 直接結合時の受信サウンダ出力(シミュレーション値)

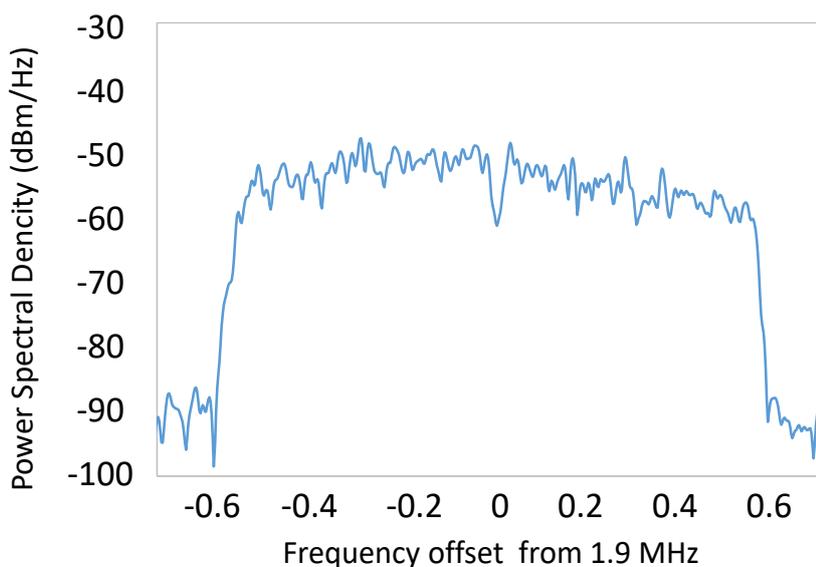


図 24 直接結合時の受信サウンダ出力(実測値)

次にシミュレーションにおける鉄板挿入時の受信サウンダ出力を図 25 に、実測値を図 26 にそれぞれ示す。直接結合の結果と比較すると実測値・シミュレーション値ともにレベルは全体的に 15~20 dB 程度下がっている。これは鉄板の挿入による損失であると考えられる。また直接結合の結果と異なる点はシミュレーション値よりも実測値の方が PSD のレベルが全体的に高い点や、帯域外放射のレベルの違いなどがある。実測値において帯域外放射のレベルが高いのはノイズレベルをこれ以上下げられなかったためである。また実測値とシミュレーション値でレベルが異なる原因としては、直接結合時と比較してアクリル-鉄板境界と鉄板-アクリル境界による反射損失の影響や鉄板内を伝搬することで生じた通信路特性の影響が考えられる。送信サウンダから放射された超音波は鉄板透過時にはすべて横波として伝搬するが、透過した超音波の一部は横波から縦波へとモード変換して伝搬していく。これによる二種類の波の干渉が鉄板の通信路特性として結果に反映された可能性がある。また異なる媒質間の境界条件について(19)式を適用したが、これはあらかじめ設定した角度からの入射波を想定しているに過ぎず、今回使用したモデルのようなサウンダや鉄板内部で生じる乱反射による多方向からの入射波は想定されていない。これにより実環境における反射条件を忠実に再現できていなかった可能性がある。また鉄板の通信路特性の影響について、シミュレーションでは鉄板の終端は吸収境界としているが、実環境では鉄板終端で反射が起きる。したがってその反射波が受信サウンダ出力の変動に影響を与えている可能性が考えられる。

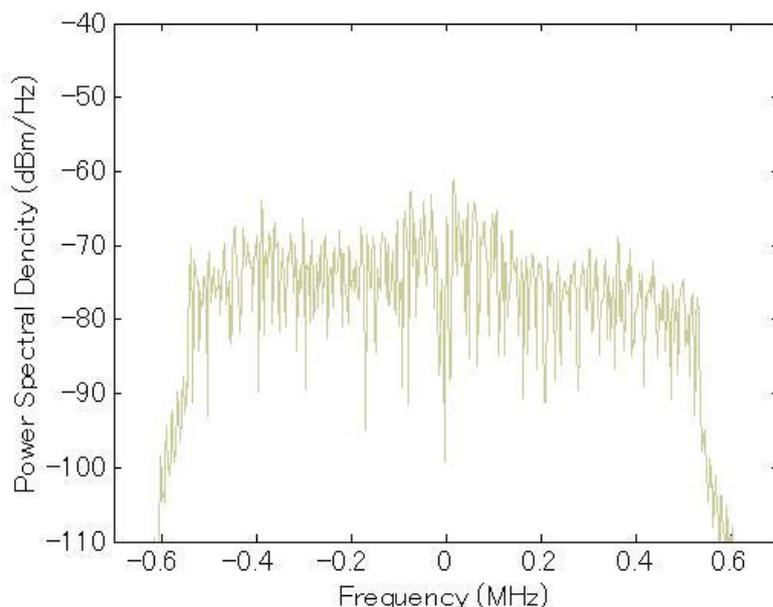


図 25 鉄板挿入時の受信サウンダ出力(シミュレーション値)

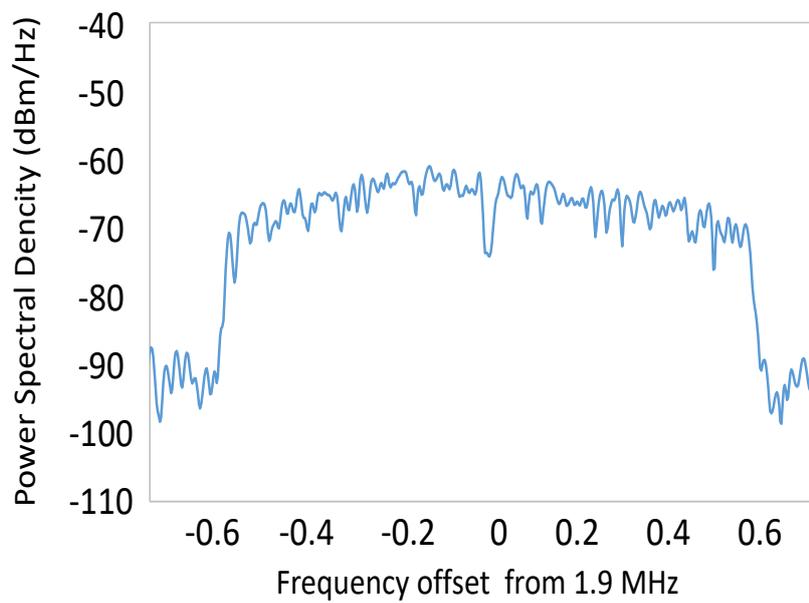


図 26 鉄板挿入時の受信サウンダ出力(実測値)

第6章 結論

本論文では超音波変換無線中継方式における音響信号伝送を弾性 FDTD シミュレーションにより解析し、超音波伝搬の伝搬式および電気音響変換伝搬モデルを示し、シミュレーションを行った結果を実測値と比較・考察を行った。その結果、中継信号電力シミュレーションにおいて、直接結合・鉄板挿入時どちらにおいても実測値と同様の傾向を示していることが分かった。また OFDM 送信信号による PSD 評価シミュレーションにおいては音響媒質内で乱反射があまり発生せず、反射境界が少ない直接結合時では実測値と比較的に近い結果が得られた。鉄板挿入時は実測値とスペクトルの傾向は近い結果が得られたが、レベルは全体的に 5 dB ほどの差が確認できた。これは直接結合時の場合では存在しなかったアクリル-鉄板境界と鉄板-アクリル境界による反射損失や鉄板通信路で生じた周波数特性も中継信号の特性に影響を与えた可能性がある。異なる媒質間における境界条件および送信サウンドにおける超音波の指向性条件、サウンドの周波数特性の再現などについてさらに考察することで、シミュレーションの精度を向上できる可能性がある。

謝辞

本研究にあたり、お忙しい中大変丁寧なご指導を賜りました山尾泰先生に心より感謝申し上げます。日頃のゼミでの議論では、山尾先生をはじめ、山尾研究室の皆様にも多くのご意見を頂き、研究を遂行することができました。

また、研究以外の活動に関しても様々な助言を頂きました藤井威生先生、石橋功至先生、安達宏一先生に深く感謝申し上げます。また藤井研究室、石橋研究室の皆様にもいろいろとお世話になりました。3年間ありがとうございました。

参考文献

- [1] 森川博之, 鈴木誠, “M2M が未来を創る,” 電子情報通信学会誌 96(5), pp.292-298, 2013年5月.
- [2] 野場敏裕, 小川恭孝, 西村寿彦, 大鐘武雄, ”OFDM 無線 LAN 環境におけるスマートアンテナを用いた干渉の低減,” 信学技報, 109(440), RCS2009-262, pp.29-34, 2010年3月.
- [3] 筒井康介, 山尾泰, “機器間通信のための超音波 IF 変換を用いたワイヤレス中継方式の一検討,” 電子情報通信学会 2014年総合大会, A-1-20, 2014年3月.
- [4] 鈴木真ノ介, 石原学, 片根保, 斎藤制海, 小林和人, ”超音波によるウェアラブルデバイス用情報伝送システムの基礎開発,” 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, vol27, pp87-88, 2006年11月.
- [5] 橋本裕介, 明石尚之, 榎引淳一, ”VHF/UHF 帯における水の超音波減衰係数の測定,” 信学技報, 97(276), US97-50, pp37-42, 1997年9月.
- [6] P. H. Moose, “A technique for orthogonal frequency division multiplexing frequency offset correction,” IEEE Trans. Communications. 42, 10, pp.2908-2914, 1994.
- [7] 3GPP, “Progress on 3GPP IoT,”
< http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1766-iot_progress >, Feb.2016.
- [8] K. S. Yee, “Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell’s Equations in Isotropic Media,” IEEE Trans. Antennas Propag, AP-14, 8, pp.302-307, 1966.
- [9] 佐藤雅弘, “FDTD 法による弾性振動・波動の解析入門,” pp. 36-39, 森北出版株式会社, 2003年.
- [10] 土屋隆生, 石井琢人, 大久保寛, “波動方程式に基づく FDTD 法(WE-FDTD 法)による音響レンダリング”, 信学技報, 111(88), US2011-17, pp25-30, 2011年6月.
- [11] G. Mur, ”Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations,” IEEE Trans. Electro-magnetic Compatibility EMC-23, 4, pp.377-382, 1981.
- [12] 伊藤大地, 小林良太郎, 島田俊夫, ”音響 FDTD 法演算支援 LSI の設計,” 信学技法, VLD2005-90, pp13-18, 2006年1月.
- [13] 鹿野洋, フスティーチャバ, 坂本慎一, 横山栄, “FDTD 法における音源の指向性制御を用いたインパルス応答の合成,” 日本音響学会講演論文集, 2-4-11, pp.1221-1222, 2010年3月.
- [14] 山谷千秋, 井上浩, “吸収媒質中の超音波伝搬と熱の解析に関する検討,” 信学技報, 105(313), US2005-50, pp37-42, 2005年9月.
- [15] K. Wanuga, M. Bielinski, R. Primerano, M. Kam, K. R. Dandekar, “High-data-rate ultrasonic through-metal communication,” IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control. vol. 59, pp. 2051-2053, Sep. 2012.
- [16] 金子将大, 山尾泰, “超音波 IF 変換を用いた狭帯域 OFDM 信号の無線中継の検討,” 2015年電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-22-6, 2015年9月.

関連発表

- [1] 金子将大, 山尾泰, “超音波 IF 変換を用いた狭帯域 OFDM 信号の無線中継の検討”, 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 A-22-6, 2015 年 9 月
- [2] 金子将大, 山尾泰, “弾性 FDTD 法による超音波変換無線信号中継伝送特性の解析”, 信学技報, EA2016-79, pp.67-72, 2017 年 1 月