

指導力向上研修「理科」

音の伝搬現象を 耳と目で体感する

2018年12月13日(木)

神戸市立工業高等専門学校 電子工学科
長谷 芳樹 Yoshiki NAGATANI

Welcome!
ultrasonics.jp/nagatani/

はじめまして

• 長谷 芳樹 Yoshiki NAGATANI

• 専門分野

- 音響工学・超音波エレクトロニクス・医工学

• 経歴

- 2006年 博士（工学）（同志社大学）
- 2006年～2008年 奈良県立医科大学 医学部 特別研究員
- 2008年～神戸市立工業高等専門学校 電子工学科 講師（2011年～現在 准教授）
- 2008年～現在 独立行政法人 産業技術総合研究所 客員研究員
- 2014年～2015年 フランス Universite Paris-Est Creteil (UPEC) Visiting Researcher

• 著書

- 豊田政弘編 「FDTD法で見る音の世界 DVD付 (音響サイエンスシリーズ)」（コロナ社, 2015）
- Pascal Laugier, Guillaume Haiat編 「Bone Quantitative Ultrasound」（Springer, 2010）
- その他の業績：<https://researchmap.jp/nagatani>

• コンタクト

- nagatani@ultrasonics.jp / <https://ultrasonics.jp/nagatani/> / @nagataniyoshiki



今日の流れ

- **自己紹介**
- 『音』とは？
- **スピーカーから出る音**
 - スピーカーを製作しましょう
 - 音を鳴らしてみましょう
 - なぜスピーカーは箱に入っているのでしょうか？
 - さらに大きな音を出すには（参考資料）
- **音を見してみる**
 - 音を見してみる（波形&スペクトル）
 - 音波伝搬シミュレーションを体験する
 - 音波伝搬シミュレーションの原理（参考資料）



今日の資料について

- **今日の資料等は全て↓に置いてあります。**

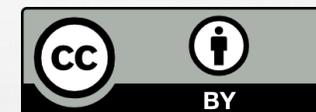
- https://ultrasonics.jp/nagatani/edu_rika/2018/
- この資料自体も pptx で置いてあります。必要に応じてお使い下さい。

- **ライセンス**

- CC BY 4.0 とします。（Creative Commons - 表示 4.0 国際）
 - <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>
- あなたは以下の条件に従う限り、自由に：
 - 共有 — どのようなメディアやフォーマットでも資料を複製したり、再配布できます。
 - 翻案 — 資料をリミックスしたり、改変したり、別の作品のベースにしたりできます。営利目的も含め、どのような目的でも。
 - あなたがライセンスの条件に従っている限り、許諾者がこれらの自由を取り消すことはできません。
- あなたの従うべき条件は以下の通りです。
 - 表示 — あなたは適切なクレジットを表示し、ライセンスへのリンクを提供し、変更があったらその旨を示さなければなりません。あなたはこれらを合理的などのような方法で行っても構いませんが、許諾者があなたやあなたの利用行為を支持していると示唆するような方法は除きます。
 - 追加的な制約は課せません — あなたは、このライセンスが他の者に許諾することを法的に制限するようないかなる法的規定も技術的手段も適用してはなりません。
- 表記例：『音の伝搬現象を耳と目で体感する』（2018年）
長谷芳樹（神戸市立工業高等専門学校）

- **フォント**

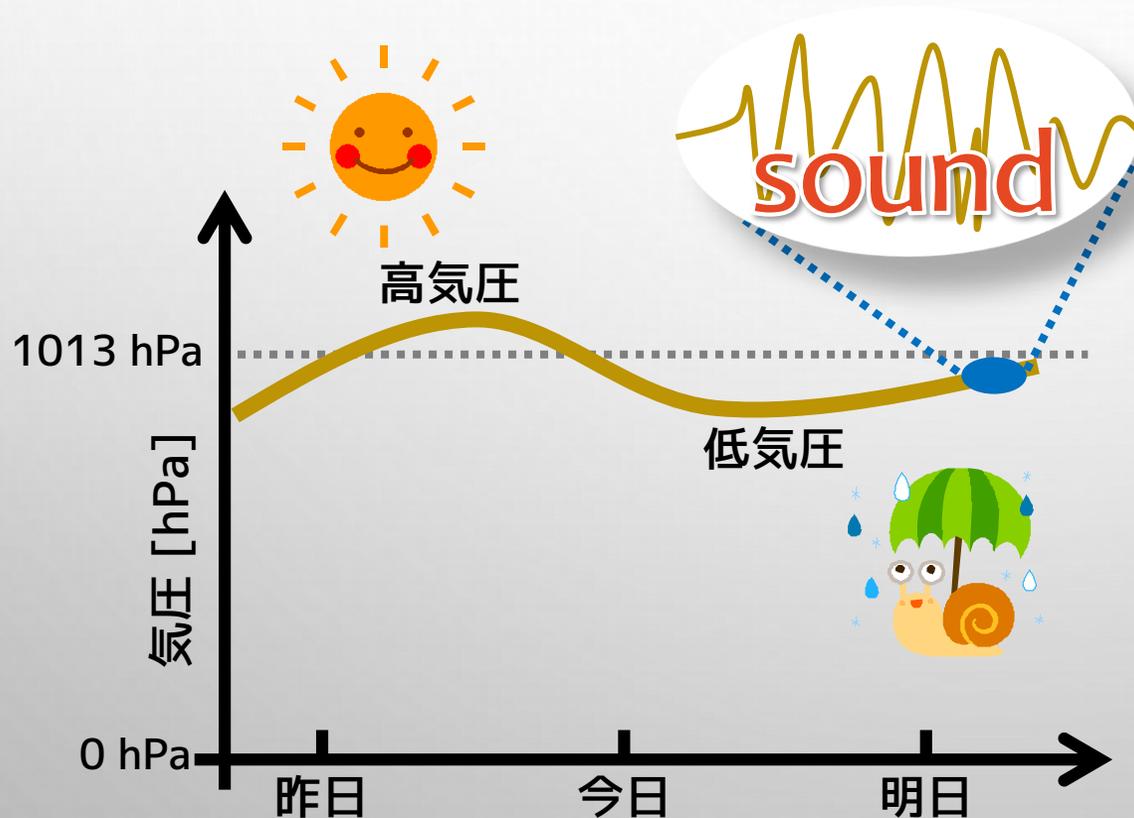
- この資料ではWindows標準搭載のフォントに加えて森下浩司氏が作成されているフリーフォント「M+ C Type-2」（M+ 2c）フォントを使用しています。（ダウンロード先：<https://mplus-fonts.osdn.jp/about.html>）



『音』とは

• 音 = 気圧の時間的な変動

- 時間～日の気圧の変動：**高気圧 & 低気圧 [hPa]**
- 1/200000秒～1/20秒の気圧の変動：**音 [Pa]**

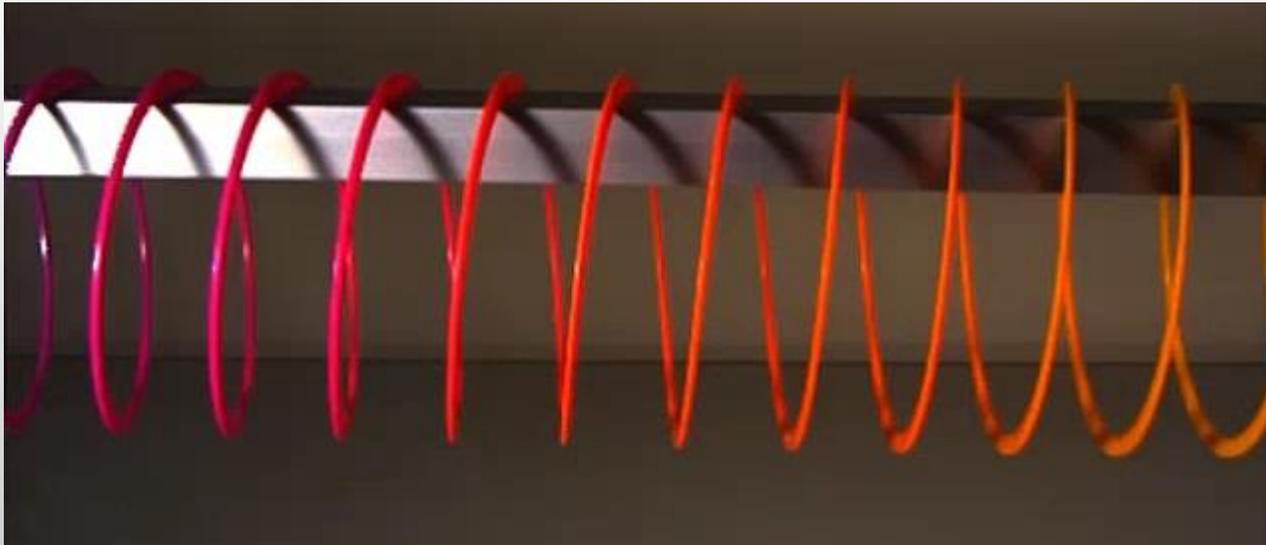


(日本科学未来館にて)

『音』とは

- **音 = 気圧の時間的な変動が空気中を伝わるもの**

- 空気が押される → 隣の空気を押す → さらに隣の空気を押す...
= 進行方向に対して縦方向の振動 = 「縦波」



こちら側から
パルスを
送っている



スピーカー



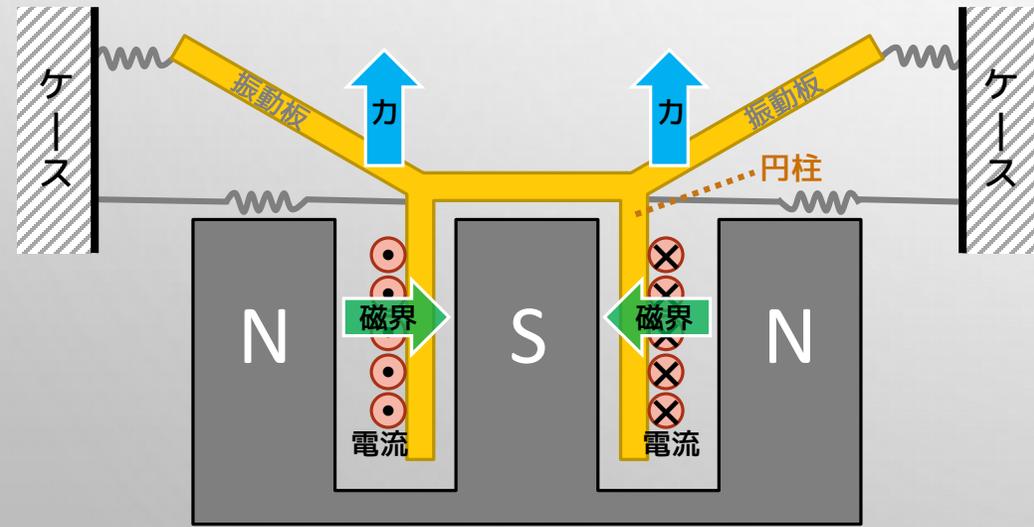
• スピーカーは、電気的には...

• 電気信号を振動に変える装置です。

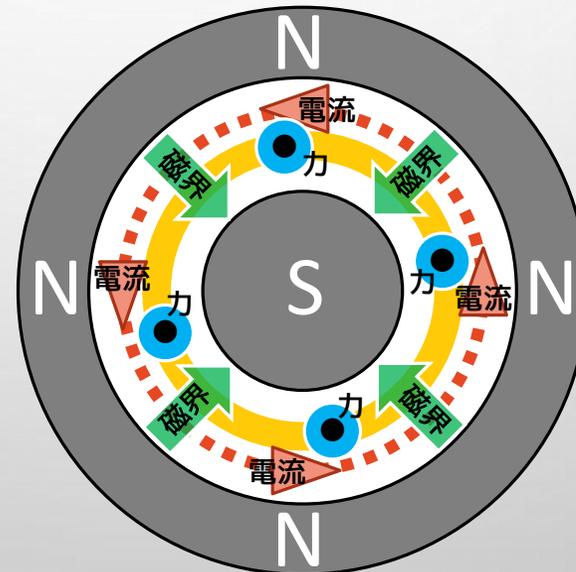
• 最も普通のスピーカーは

『**電流 → 電磁力 → 力 ($F = I \times B$) → 空気の振動 (縦波)**』

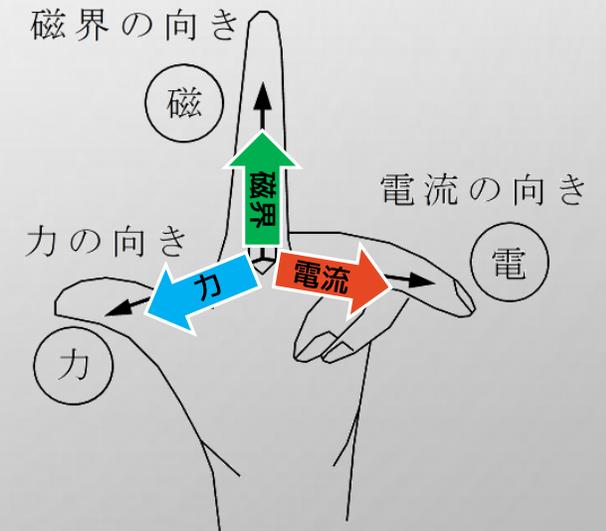
の変換で電流の変化を振動 (音) に変えています (モーターと同じ原理)。



スピーカーを横から見た断面図



スピーカーを上から見た図



フレミングの左手の法則

スピーカー

• スピーカーは、**機械的**には...

• 質量 & バネ & ダンパーの単一共振系です。

• 振動板 : 質量 (慣性の法則) (力 \propto 加速度 = d^2 変位/ dt^2) $\leftarrow F = ma$

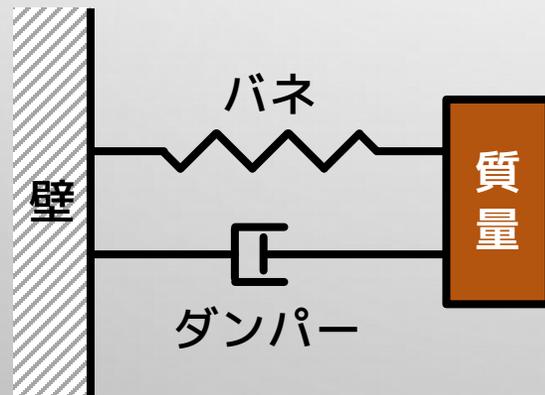
ダンパー : 摩擦 (力 \propto 速度 = d 変位/ dt)

バネ : フックの法則 (力 \propto 変位) $\leftarrow F = kx$

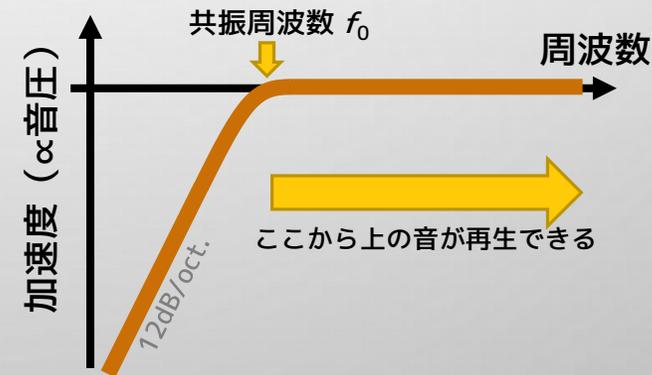
$$f(t) = m \frac{d^2 \xi}{dt^2} + r_m \frac{d\xi}{dt} + \frac{1}{C_m} \xi$$

• 振動板の加速度が音圧に比例 (厳密には円形振動板から十分に遠距離での音軸上での音圧に限る)

→ 共振周波数 f_0 より高い周波数の音が再生できる (スピーカーの大きさには無関係)



スピーカーの模式図



スピーカーの周波数応答の例

スピーカーの製作

• というわけでスピーカーを作ってみましょう。

• 材料

- 3.5mmステレオオーディオケーブル (イヤホンと同じコネクタ)
<https://www.marutsu.co.jp/pc/i/62238/>
- スピーカーユニット (直径50mm, 0.5W, 8Ω)
<https://www.marutsu.co.jp/pc/i/62282/>
- 段ボール箱
<https://www.askul.co.jp/p/364631/>

• 工具

- ニッパー
- 半田ごて + こて台 + 半田
- カッターナイフ + ボールペン

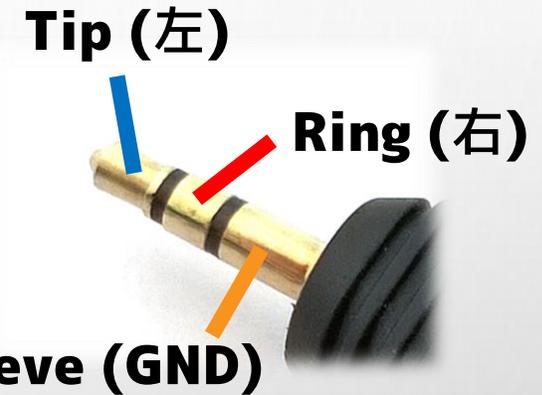
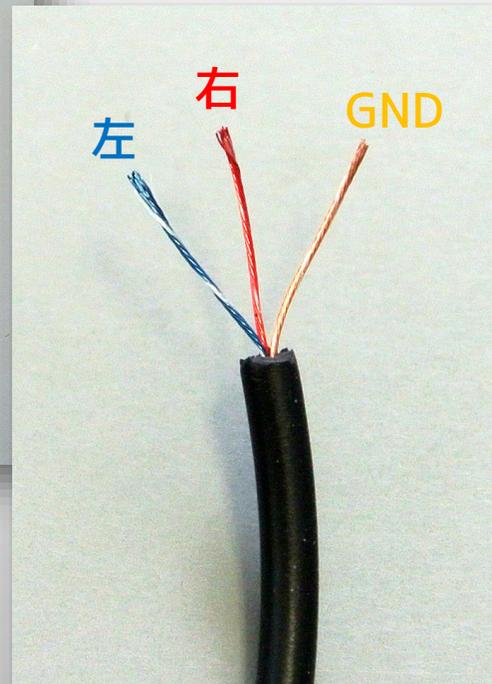
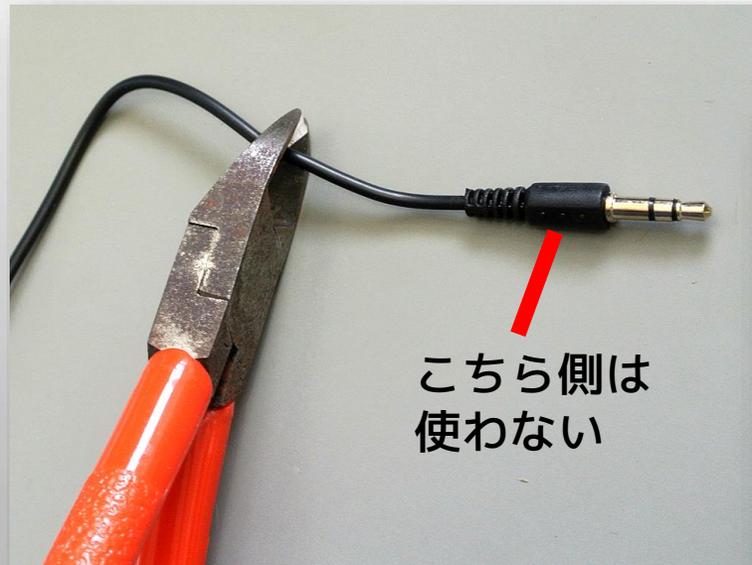


※ 今日の講座で使用する部品は入手性を重視したためにあまり音が良いものが用意できませんでした。
日本橋などにはたくさん安くて良いものがあります (請求書払いは不可の店が多い)。
ご自身で買われる場合はご相談ください。
なお、少々高くても構わない場合は
FOSTEX FE83En (税込4,000円程度)
<https://www.fostex.jp/products/fe83en/>
なども良いでしょう。

ケーブルの準備：切断

• オーディオケーブルを切断します

- 片方の端子だけ使います。なるべく長く。
- **青**：左 / **赤**：右 / **金**：GND（共通）



3.5mm ステレオコネクタのアサイン

100均で売っているケーブルでも構いません。
長めのケーブルであれば、2本分として使えます。
通常は「白：左 / 赤：右 / 黒か金か銀：GND」であることが多いです。

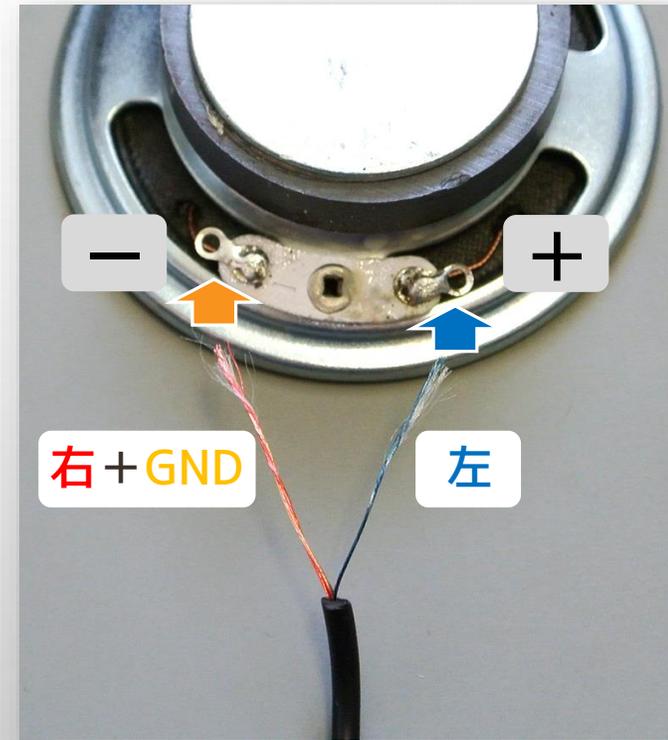
ケーブルの準備：半田付け

・スピーカーにオーディオケーブルを半田付けします

・ **青 (左)** : プラス側 / **赤 (右)** + **金 (GND)** : マイナス側

・ 樹脂で絶縁コーティングされていますが、
しっかり目に半田付けすれば溶けて導通します
(おそらくこのケーブルはポリウレタンコーティングなので120℃
で溶けます。いわゆる「エナメル線」は半田ごてでは溶けません
のでヤスリで削ってください。また、ビニール被覆の場合は
ニッパーかワイヤーストリッパーなどで取り去ってください。)

・ スピーカーの穴に通して、折り返しておけば
半田付けがしやすくなります。



右チャンネルとGNDをショートすることになります。スマホやPCなどでは大丈夫のほうです。高級なオーディオ機器などではオススメしません。



今回は直付けしますが、スピーカーターミナルなどを使えばさらにオサレに仕上げることができます。
例：<https://www.marutsu.co.jp/pc/i/163637/>

ひとまずこれで完成

- **これでひとまず音は出ます。**
- **音楽プレーヤー/タブレット/スマホやPCから好きな音楽を鳴らしてみましよう。**
 - 音源をお持ちでは無い場合
 - PCのデスクトップにいくつか .mp3 ファイルを用意しています
- **正弦波やホワイトノイズなども鳴らしてみましよう**
 - WaveGene を使用します（次ページ）
（タブレット/スマホをお持ちの方はアプリを使用しても構いません。）



• Android

- 「Function Generator」がオススメです。
2ch (L+R) それぞれの信号を設定して遊べます。
かなり高級な発振器の機能を備えています。

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.keuwl.functiongenerator>



• iOS

- 残念ながらiOS版では強くオススメできる無償アプリは見つけれられていませんが、「Audio Function Generator」で最低限の音は出せます。

<https://itunes.apple.com/us/app/audio-function-generator/id768229610>

- 有償版であれば、「Audio Function Generator PRO」は悪くありません。

<https://itunes.apple.com/app/g-audio-function-generator/id895074703>



おめでとうございます！

- **音が出ましたね！ おめでとうございます！**
- **しかし、全然感動は無いはずですよ。**
（無理しなくてもイイですよ）
- **なんとかもう少しマシな音にならないでしょうか？**
 - 音楽を鳴らしてみてもいいですし、
正弦波などを鳴らして違いが出るかを
試してみるのもイイでしょう。



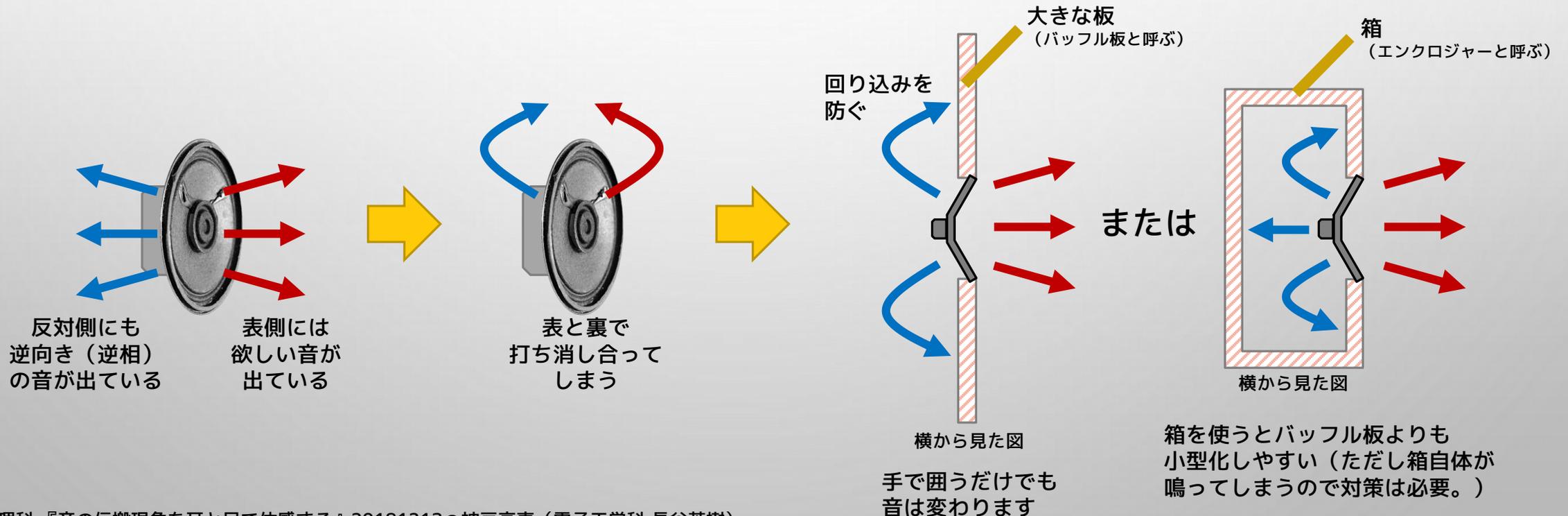
音が悪い理由

• 1. スピーカーユニットの限界

- それはその通りです。スミマセン。。

• 2. でも、それ以外にも理由があります。

- 回折（回り込み）の影響です → **箱**の存在意義



エンクロージャー（箱）の準備

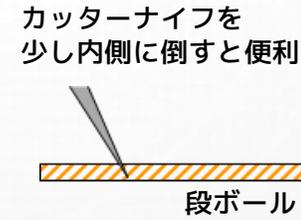
・ダンボールに穴を開けます。



(1) スピーカーを段ボールに置いて円を描く。



(2) 描いた線に沿って切り抜く。
このとき、大きな穴になりすぎないように注意。



(3) 穴が開きました。



(5) 完成例。
ケーブルは隙間から出しておきます。

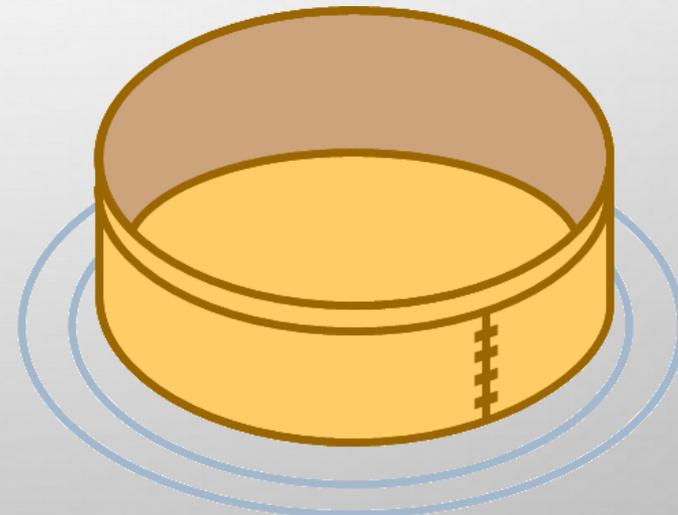
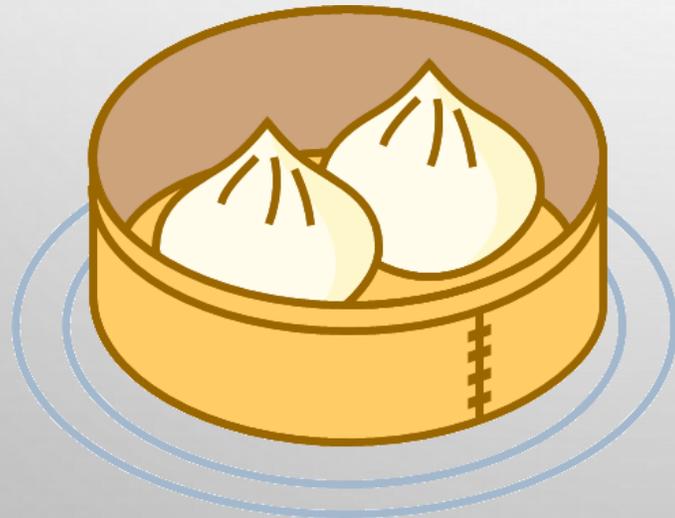


(4) スピーカーユニットをはめ込む。
(穴が大きすぎた場合はビニテなどで隙間を埋める)

エンクロージャー（箱）の効果

• エンクロージャー「アリ」と「ナシ」で比べてみましょう。

- 音楽を耳で聞いてみましょう。
- WaveGeneで正弦波やホワイトノイズなどを出してみましょう。
 - 例えば 250 Hz の正弦波は，エンクロージャーの有無で聞こえ方はどう変わるでしょう？
同じように，1000 Hz ではどうでしょう？



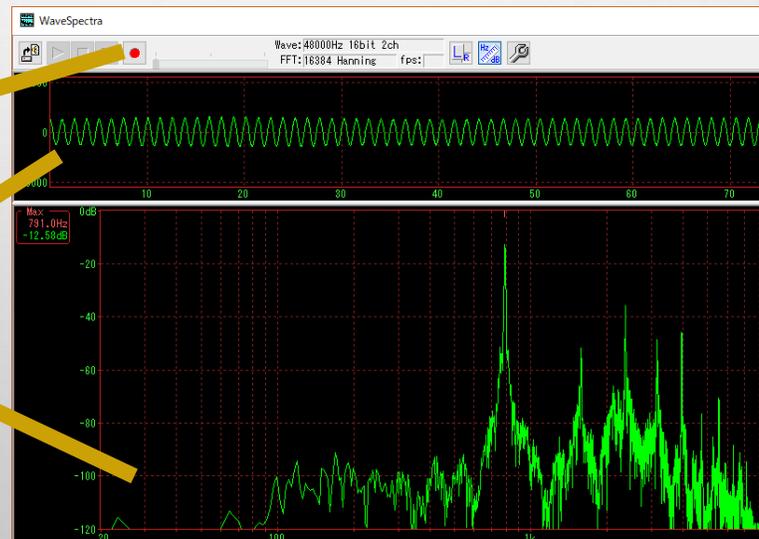
「WaveSpectra」

• Windows

- <http://www.efu.jp.net/soft/ws/ws.html>
- 波形と振幅スペクトル（どの周波数の音が多く含まれるか）をリアルタイムに確認することができます。
 - WaveGene でホワイトノイズなどを出して WaveSpectra でスペクトルを見てみましょう。



- ここ（●）で解析を開始します
- ここに波形が表示されます
- ここにスペクトルが表示されます



声や楽器の音などを見ても楽しいでしょう。
「あ」と「い」はどう違う？
リコーダーの音はどんな感じ？
・・・など。

タブレットの場合

• Android

- 「Sound Oscilloscope」で波形と振幅スペクトルを観測できます。

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.bolshakovdenis.soundoscilloscope>



• iOS

- 「Sonic Tools SVM」で波形と振幅スペクトルを観測できます。

<https://itunes.apple.com/ru/app/sonic-tools-svm/id1245046029>



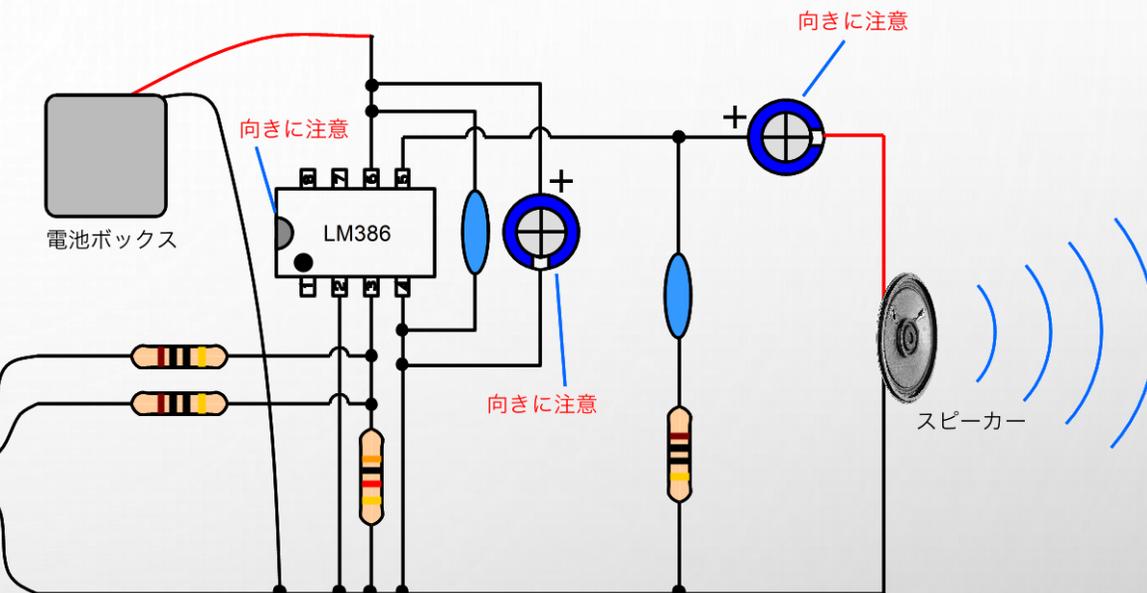
- タブレットは比較的高性能なマイクロホンを内蔵していることが多いので簡易的な信号解析に適しています。

さらに大きな音を出すには

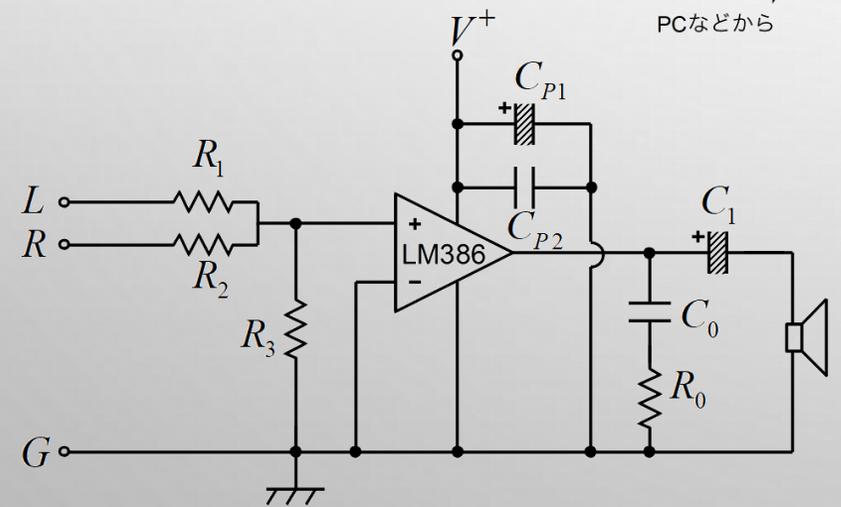
- PCやタブレットの出力はヘッドホン用なので、スピーカーで大きな音を出すほどの出力はありません。



PCなどから



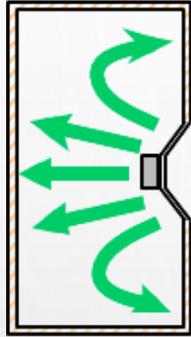
- $R_0 = 10 \Omega$
- $R_1 = R_2 = 10 \Omega$
- $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$
- $C_0 = 0.1 \mu\text{F}$
- $C_1 = 470 \mu\text{F}$
- $C_{P1} = 470 \mu\text{F}$
- $C_{P2} = 0.1 \mu\text{F}$
- $V^+ = 6.0 \text{ V}$



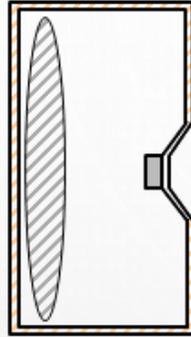
例えばLM386（あるいは互換品のNJM386）というオーディオアンプを使えば手軽に大きな音を出すことができますようになります。単3×4本=6Vや、006P（9V）の電池だけでもかなり良い音が出ます。ぜひお試しください。
オーディオパワーアンプ NJM386BD (@70円)
<https://www.marutsu.co.jp/pc/i/56343/>

さらに音質を向上するには

・いろいろ工夫が可能です。

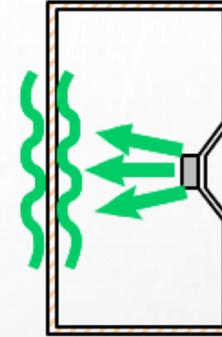


内部の反射があると
箱が響いてしまう。



吸音材（スポンジや布など）
を入れると反射が減る。

反射を消す

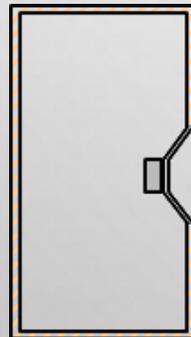


箱そのものが
振動してしまう。

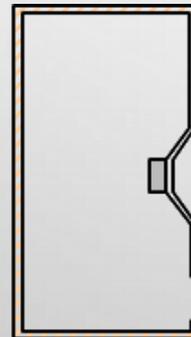


段ボールの切れ端や厚めの
テープなどを貼って補強する。

箱の振動を抑える

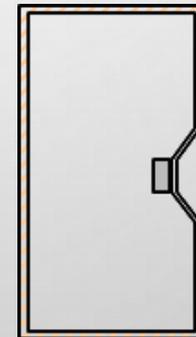


密室だと空気がバネになって
振動板が動きにくい。



穴を空けて振動板を動きやすくする。
(あるいは筒を追加して共鳴させる)

低音を補強する



?

他にも試してみてください！

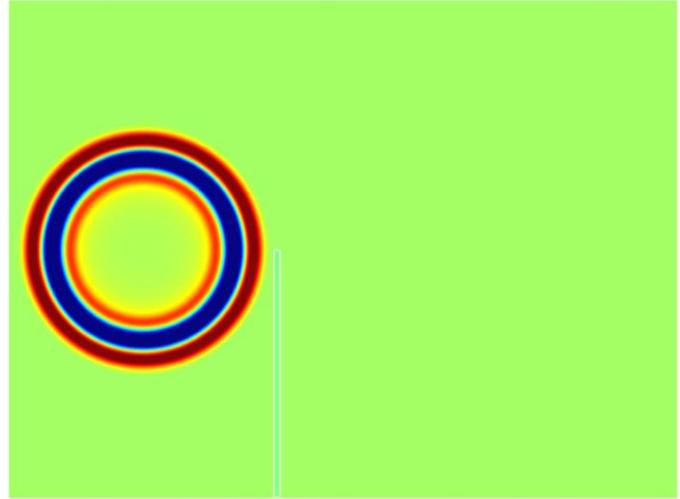
音を見てみましょう

- 耳で聞くのも重要ですが、もう少し別の視点からも音の振る舞いを理解しましょう。
- FDTD法というシミュレーション手法で音の伝搬を可視化します。
 - https://ultrasonics.jp/nagatani/edu_rika/2018/
 - HTML5 対応のウェブブラウザ（現代のブラウザなら全てOK）で動きます。（JavaScriptです）
 - タブレット & スマホでも動きます。
 - 複数の媒質（材料）の境界で音が反射したり、壁の向こう側へ回折する様子などが観察できます。



2-D 音響 FDTD サンプルプログラム (JavaScript 版)

[640 × 480 pixels = 16 mm × 12 mm]



←拡大→ →縮小← ↑拡大↓ ↓縮小↑ ← → ↑ ↓

周波数: ●4000 Hz ●2000 Hz ●1000 Hz ●500 Hz ●250 Hz ●125 Hz
波の数: ●10波 ●5波 ●3波 ●1波
カラーマップ: ●カラー ●グレースケール
明るさ: ●最大 ●明るめ ●普通 ●暗め ●最小
表示データ: ●音圧(符号付き) ●音圧(絶対値) ●粒子速度(縦方向) ●粒子速度(横方向)

音場をクリア 一時停止

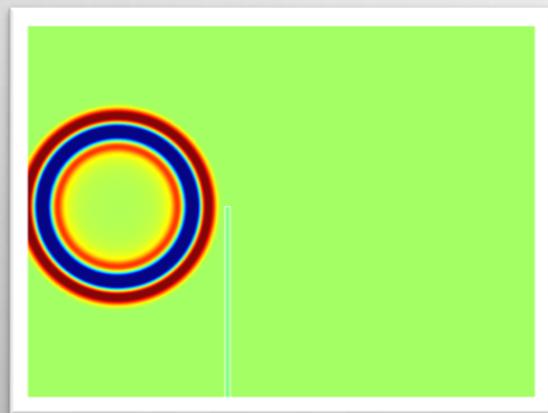
媒質の選択:

外側	内側	媒質	密度 ρ [kg/m ³]	体積弾性率 κ [Pa]	音速 c [m/s]
●	○	水	1000	2.20×10^9	1,483
○	○	シエチルエーテル	714	0.722×10^9	1,006
○	○	エタノール	789	1.08×10^9	1,170
○	○	オリーブオイル	904	1.88×10^9	1,442
○	○	水銀	13,600	28.6×10^9	1,450
○	○	ヘリウム	0.179	0.178×10^6	997
○	●	空気	1.29	0.150×10^6	341

[クリックまたはドラッグで音源を生成できます]

回折

- **周波数を変えて、壁の向こう側への回折を観察しましょう。**
 - 周波数 = 4000 Hz のとき
 - 周波数 = 125 Hz のとき を比較
 - 波の数が多い方が見やすいです → 「波の数 = 10」などに設定
- **赤：プラス / 青：マイナス の音圧を示しています。**



周波数: 4000 Hz 2000 Hz 1000 Hz 500 Hz 250 Hz 125 Hz

波の数: 10波 5波 3波 1波

カラーマップ: カラー グレースケール

明るさ: 最大 明るめ 普通 暗め 最小

表示データ: 音圧(符号付き) 音圧(絶対値) 粒子速度(縦方向) 粒子速度(横方向)

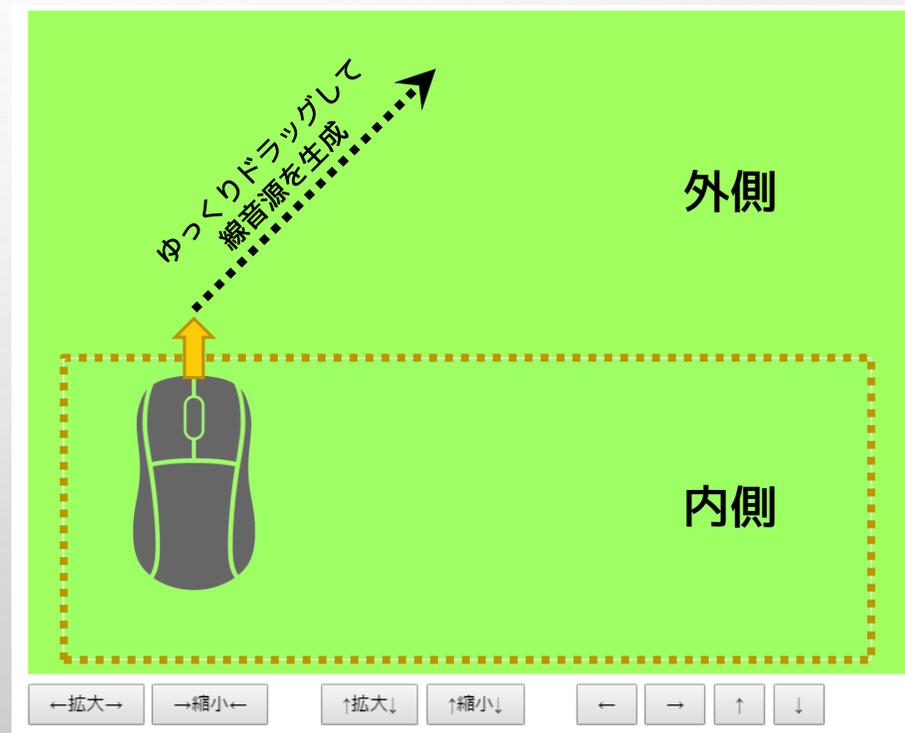
一時停止

屈折 & 反射

• 媒質を変えて、屈折と反射を観察しましょう。

- 周波数=1000 Hz, 波の数=1波 くらいが見やすいかもしれません。
- [← 拡大 →] [→ 縮小 ←] などを押して、望みのサイズのモデルを作ってください。
- 「水 → エタノール」や、「ヘリウム → 空気」などを試してみてください。

- **マウスでドラッグすると
線上の音源を生成できます。**
(すでに音が出ている場合は [音場をクリア])



• Finite Difference Time Domain Method = 有限差分時間領域法（時間領域差分法）

- 長い歴史を持つ
 - 電磁波の解析用に考案（Yee, 1966!!）
 - アルゴリズムの考案は古いが，計算機の発達によって応用事例は絶賛進化中
- 伝搬の時間応答が求まる
 - 波動方程式を直接解く（定常解ではない）
 - 受波波形から周波数分析も可
- モデル化：シンプル
 - モデルの形状さえボクセルデータとして与えればとりあえず計算はできる（安定条件さえ満たせば発散はしない）
- メモリ & 演算時間：中
 - 要求される空間解像度はFEAなどより高め
 - 演算量はFEAよりは少ない
 - 望みの時間長まで逐次計算するだけ
- 非線形性や吸収減衰は少し面倒
 - 通常は非線形性や吸収減衰はナシ（考慮するためにはメモリ & 演算量増）

Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media

KANE S. YEE

Abstract—Maxwell's equations are replaced by a set of finite difference equations. It is shown that if one chooses the field points appropriately, the set of finite difference equations is applicable for a boundary condition involving perfectly conducting surfaces. An example is given of the scattering of an electromagnetic pulse by a perfectly conducting cylinder.

INTRODUCTION

SOLUTIONS to the time-dependent Maxwell's equations in general form are unknown except for a few special cases. The difficulty is due mainly to the imposition of the boundary conditions. We shall show in this paper how to obtain the solution numerically when the boundary condition is that appropriate for a perfect conductor. In theory, this numerical attack can be employed for the most general case. However, because of the limited memory capacity of present day computers, numerical solutions to a scattering problem for which the ratio of the characteristic linear dimension of the obstacle to the wavelength is large still seem to be impractical. We shall show by an example that in the case of two dimensions, numerical solutions are practical even when the characteristic length of the

obstacle is moderately large compared to that of an incoming wave.

A set of finite difference equations for the system of partial differential equations will be introduced in the early part of this paper. We shall then show that with an appropriate choice of the points at which the various field components are to be evaluated, the set of finite difference equations can be solved and the solution will satisfy the boundary condition. The latter part of this paper will specialize in two-dimensional problems, and an example illustrating scattering of an incoming pulse by a perfectly conducting square will be presented.

MAXWELL'S EQUATION AND THE EQUIVALENT SET OF FINITE DIFFERENCE EQUATIONS

Maxwell's equations in an isotropic medium [1] are:¹

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times \mathbf{E} = 0, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1b)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (1c)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad (1d)$$

Manuscript received August 24, 1965; revised January 28, 1966. This work was performed under the auspices of the U. S. Atomic Energy Commission.

The author is with the Lawrence Radiation Lab., University of California, Livermore, Calif.

¹ In MKS system of units.

・流体（液体・気体）内の音波伝搬を計算【波動方程式】

音圧 Sound Pressure

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\kappa \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)$$

連続の式



粒子速度 Particle Velocity

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

運動方程式 ($a = F/m$)

p : 音圧 Pressure

v : 粒子速度 Particle Velocity

κ : 体積弾性率 Bulk modulus

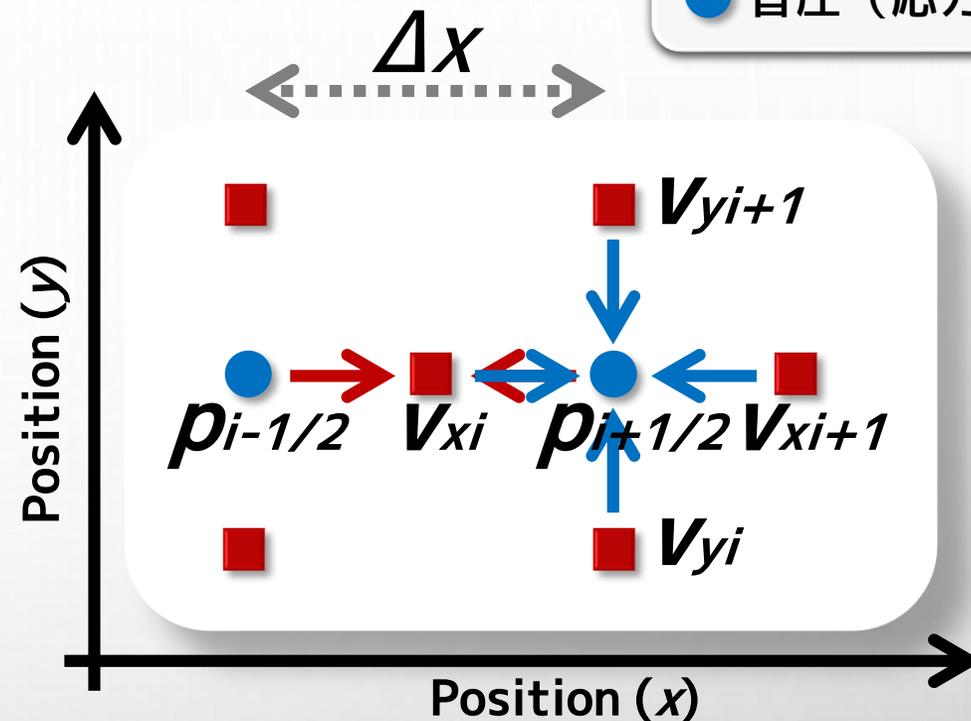
ρ : 密度 Density

音圧と粒子速度を計算することにより縦波が扱える

■ 粒子速度
● 音圧 (応力)

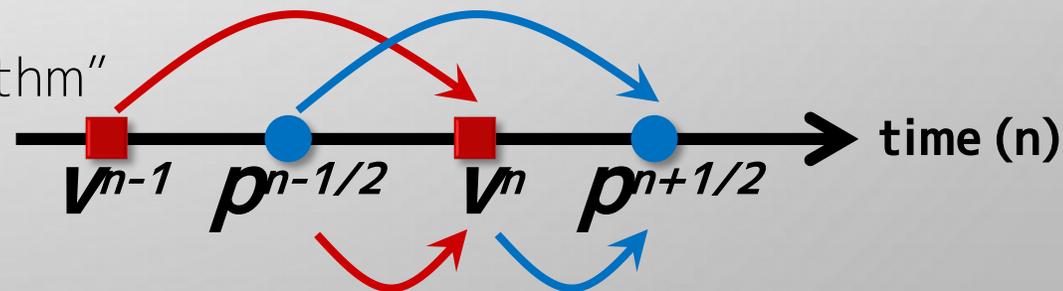
音圧と粒子速度の変数は空間的に交互に配置 (Staggered Grid)

- v_{xi} はその前後の $p_{i-1/2}$ と $p_{i+1/2}$ を用いて計算
- $p_{i+1/2}$ はその前後の v_{xi} と v_{xi+1} を用いて計算



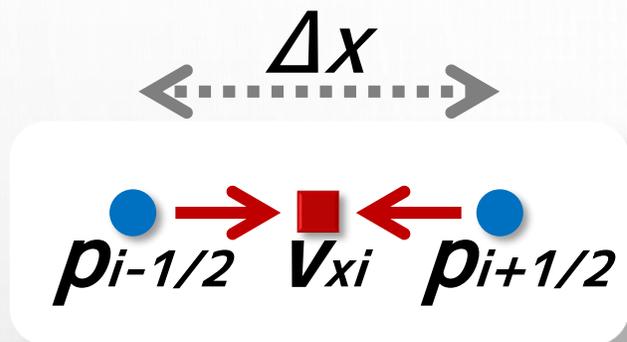
音圧と粒子速度を交互に計算 ($p \rightarrow v \rightarrow p \rightarrow v \dots$)

- このアルゴリズムは“蛙跳び差分 leap-frog algorithm”と呼ばれる。
このアルゴリズムにより、シミュレーション空間内の音場の分布が逐次計算される。



離散化：微分方程式 → 差分式

- δ を Δ に置き換えるだけ



- $p_{i-1/2} < p_{i+1/2}$ ならば v_{xi} は左向きに加速 (右向きに減速)
 - 右の方が圧力が高いから左に加速
- $p_{i-1/2} > p_{i+1/2}$ ならば v_{xi} は右向きに加速
 - 左の方が圧力が高いから右に加速

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\Delta v_x}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

$$\Delta v_x = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} \Delta t$$

$$v_x^{new} = v_x^{old} + \Delta v_x = v_x^{old} - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta x} \Delta t$$

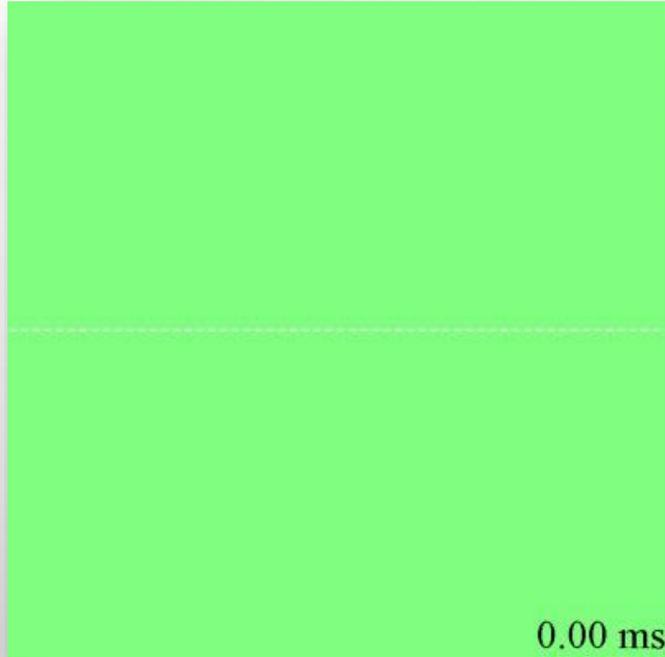
↑
未来の v の値

↑
過去の v の値 + 変化分

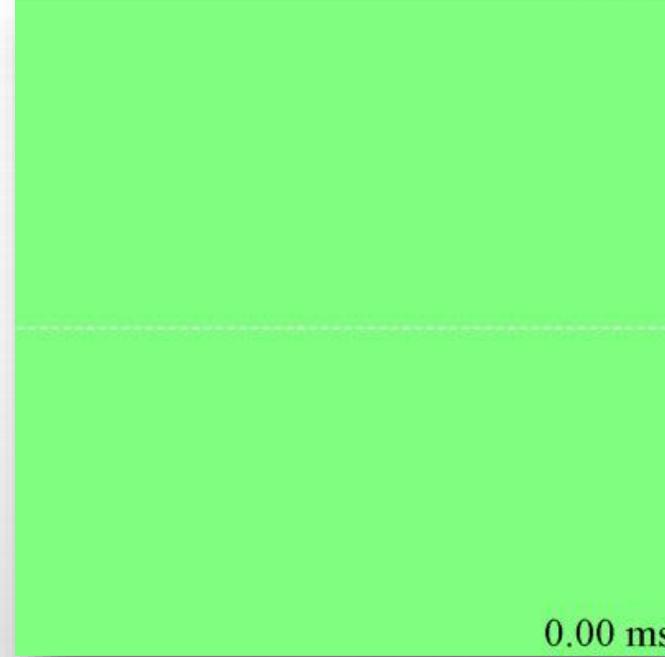


屈折

・ 2次元シミュレーション



音速が遅い媒質に入射する場合



音速が速い媒質に入射する場合

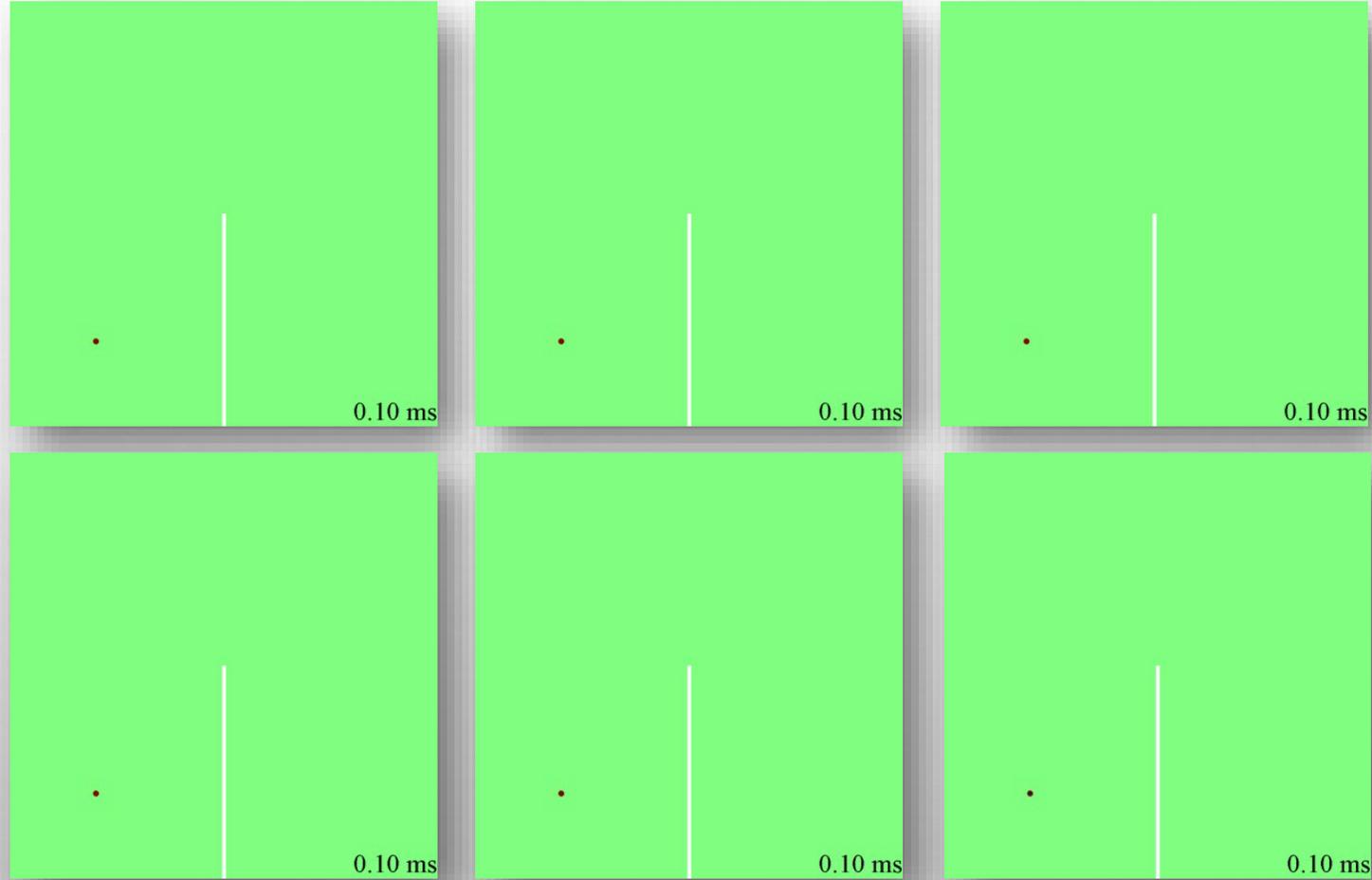
豊田政弘：音響学会サイエンスシリーズ「FDTD法で視る音の世界」（2015年12月，コロナ社）



※この動画は再配布できません。右記の書籍の付録 Animation_2*.mpg を pptx と同じフォルダに入れると動きます。

回折

・周波数による回折の違い → スピーカー設計に重要



豊田政弘：音響学会サイエンスシリーズ「FDTD法で視る音の世界」（2015年12月，コロナ社）

※この動画は再配布できません。右記の書籍の付録 Animation_2.*.mpg を pptx と同じフォルダに入れると動きます。



音の反射率&透過率は媒質によって異なる

音響インピーダンス： $Z = \rho \times c$

(※平面進行波に限る。正確には比音響インピーダンスまたは固有音響インピーダンスと呼ぶ。)

媒質	密度 ρ [kg/m ³]	音速 c [m/s]	Z [Pa·s/m]
空気	1.29	331	430
水	1000	1483	1.5×10^6
骨	2000	3800	7.6×10^6



反射率&透過率

(※平面波の場合)

反射率 $r_p = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$ $r_u = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$

透過率 $t_p = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$ $t_u = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2}$

音圧

粒子速度

音響インテンシティ
(音の強さ) = 音圧 × 粒子速度



蝉の声は
ほとんど岩には
染み入らない



- **「音」 = 「気圧の変化」である**

- 気圧が素早く変化したものが「音」

- **回折**

- 高い音ほど回折が小さい \Leftrightarrow 低い音ほど回折が大きい
- スピーカーの箱は「裏面からの回折」を防いで、音が互いに打ち消し合うのを防いでいる。

- **屈折&反射**

- 「音速」が異なると屈折が起きる。
- 「密度 \times 音速」が異なると反射が起こる。



• 音について

- 日本音響学会編, “音のなんでも小事典” (講談社 ブルーバックス, 1996)
 - 音に関する幅広い事例や技術について網羅した読み物。類似品は多いが, 本書は音響学会編であり, 一定の信頼が置ける。
- 鈴木陽一他, “音響学入門” (日本音響学会 音響入門シリーズ) (コロナ社, 2011)
 - 音響入門の定番書。音の歴史から基礎にはじまり, 応用まで広く網羅。CD-ROMも充実。
- 古井貞熙, “新音響・音声工学” (近代科学社, 2006)
 - 上記の音響学入門と重複する範囲を別の視点から解説するとともに, デジタル技術の応用事例や音声処理についても記されている。
- 日本音響学会編の各シリーズ (コロナ社)
 - 音響入門シリーズ: 入門者に対するわかりやすさを心がけつつ, 基礎となる理論をしっかりと記述。付録CD-ROMも充実。勉強になる。
 - 音響テクノロジーシリーズ: 実際に研究・開発を進めるために必要な技術や規格を分野横断的に記したシリーズ。役に立つ。
 - 音響サイエンスシリーズ: 最新のキャッチーな事例を紹介。ただし, 著者自身の研究紹介に偏っている場合もあるので注意。ネタ収集に。

• シミュレーションについて

- 豊田政弘他, “FDTD法で見る音の世界” (音響サイエンスシリーズ) (コロナ社, 2015)
 - 多方面の応用事例の紹介 (DVDが充実)。
 - 2次元&3次元音響FDTDのサンプルコード+可視化指南付き。
(C, Fortran, Scilab, MATLAB, JavaScript) (CおよびFortranは2次元&3次元音響FDTDでPML実装サンプル)
- 日本建築学会編, “はじめての音響数値シミュレーション プログラミングガイド” (コロナ社, 2012)
 - FDTD以外のシミュレーション手法も幅広く網羅。Pythonによるコード例付き。
- 宇野亨, “FDTD法による電磁界およびアンテナ解析” (コロナ社, 1998)
 - 国内FDTDの定本。ただし電磁界限定 (音についての話は載っていない)。吸収境界等にも詳しい。

【参考資料】 自由な形状のモデルでのシミュレーション

- **JavaScript 版はユーザーインタフェースに制約があるので、さらに自由にモデル形状やモデルの定数を変えたい場合は Processing 版をお試し下さい。**

- https://github.com/nagataniyoshiki/FDTD_processing
 - モデル形状は png ファイルから読み込みます（設定した閾値で分離）。
 - 媒質の密度や音速も自由に設定できます。

```
41
42 String photo_file = "lena.png";           // Arbitrary photo file (.png/.jpg)
43 int Thresh = 192;                          // Threshold for Binarizing Photo Image (0
```

```
57
58 float rho[] = {1.29, 0.73};               // Densities [kg/m^3]
59 float kappa[] = {142.0e3, 160.0e3};       // Bulk Moduli [Pa]
60
61 float freq = 1.0e3;                        // Frequency of Initial Waveform [Hz]
62
```

音速 c [m/s] と
体積弾性率 κ [Pa] と
密度 ρ [kg/m³] の関係 $c = \sqrt{\frac{\kappa}{\rho}}$

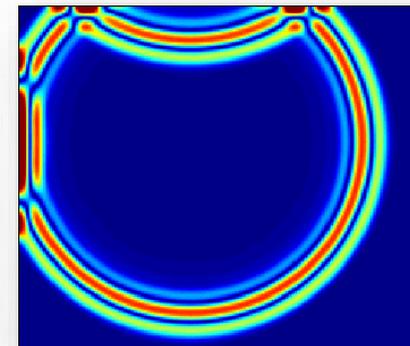
※安定な時間刻みの条件および
空間刻みの決め方は次ページ参照

• 空間刻み Δx

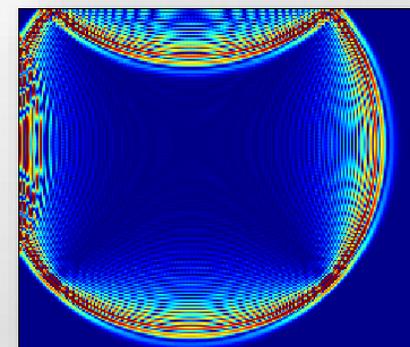
(最短の波長 = 音速最遅の媒質に依存)

- 波長の1/10から1/20程度以上を推奨
- 細かくすれば精度向上
- 粗くても発散するわけではないので要注意
(結果がギザギザになる(数値分散)だけなので目で見てチェックする必要がある)
- 送波波形がパルス性の場合には高周波成分に注意

$$\Delta x \leq \frac{\lambda_{\min}}{10 \sim 20}$$



Δx が十分な場合



Δx が不足している場合

• 時間刻み Δt (Courant条件)

(音速最速の媒質に依存)

- この条件は必須 (満たさないと発散)
- 細かくしても精度向上なし
 - 0.9~0.99 などに設定することが多い

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_{\max} \sqrt{d}}$$

• 減衰や大きな屈折のある場合はこれら以上が必要な場合もある

λ_{\min} : 最遅の媒質の波長
 c_{\max} : 最速の媒質の音速
 d : 次元 (2 or 3)