

圧電・音波解析入門セミナー



☆圧電解析

1. 事例
2. 機能
3. ポイント

☆音波解析

4. 事例
5. 機能
6. ポイント

☆圧電・音波連成解析

7. 事例
8. ポイント



☆圧電解析

1. 事例
2. 機能
3. ポイント

☆音波解析

4. 事例
5. 機能
6. ポイント

☆圧電・音波連成解析

7. 事例
8. ポイント

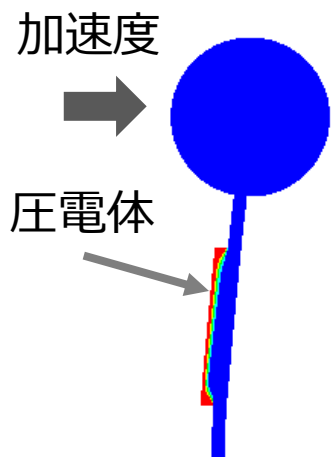


1. 圧電解析の事例

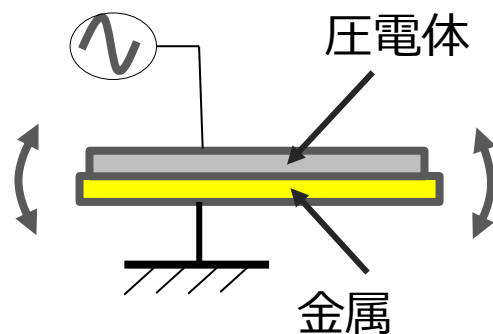
力⇒電気

電気⇒力

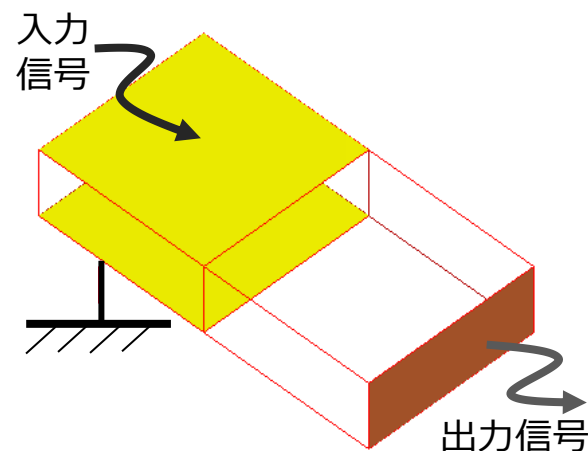
その他



加速度センサー



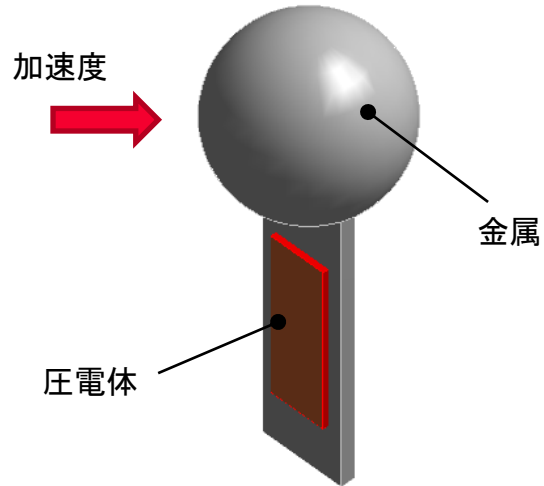
圧電ブザー



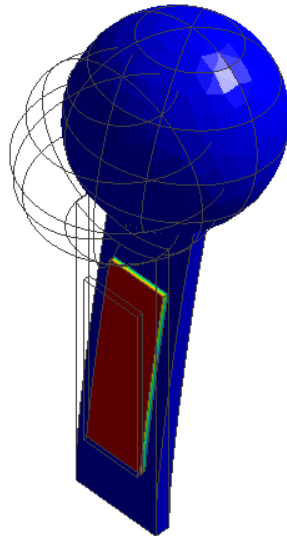
圧電トランス



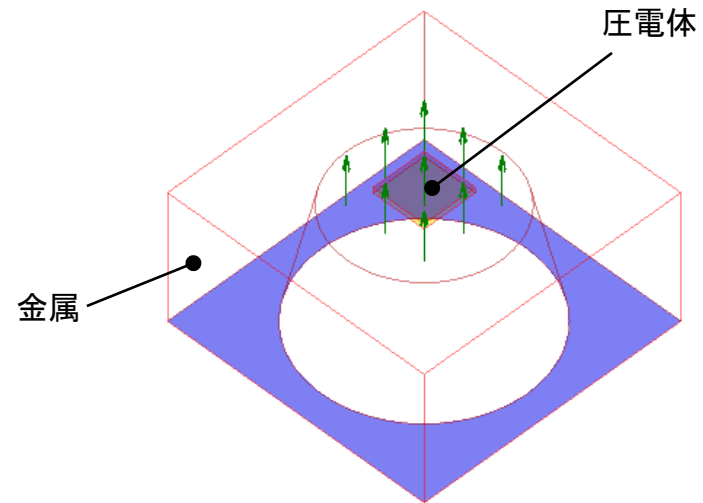
加速度センサー



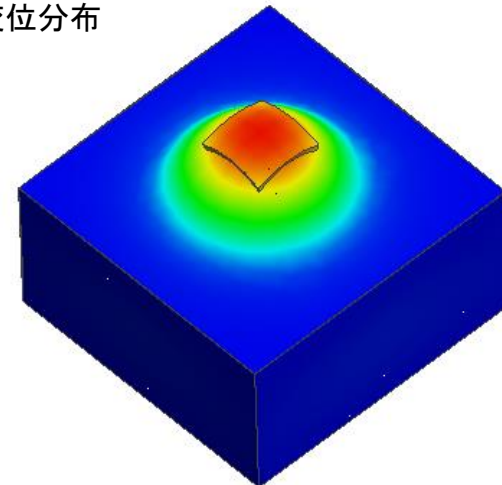
電位分布



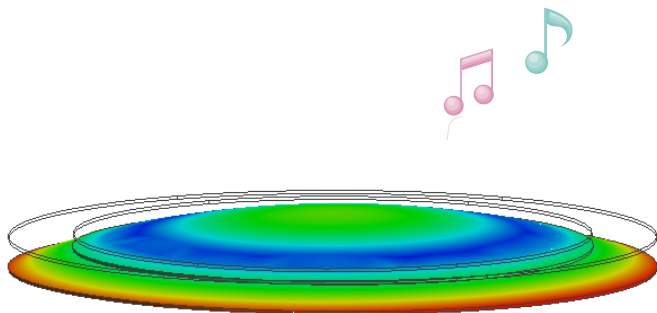
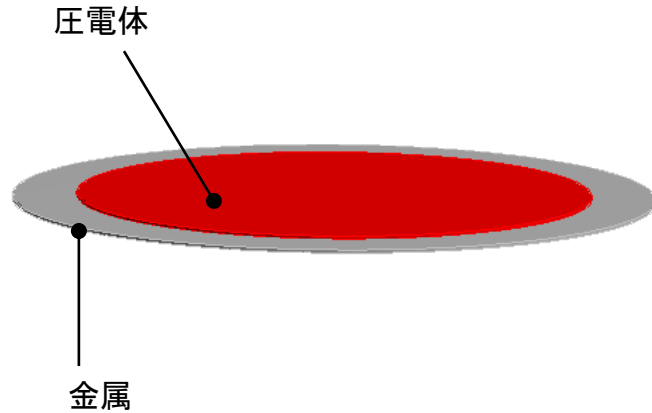
圧力センサー



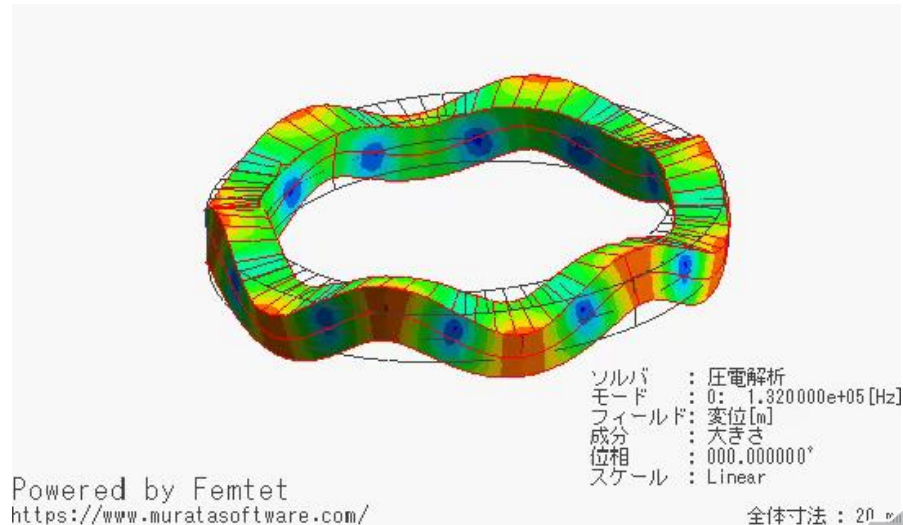
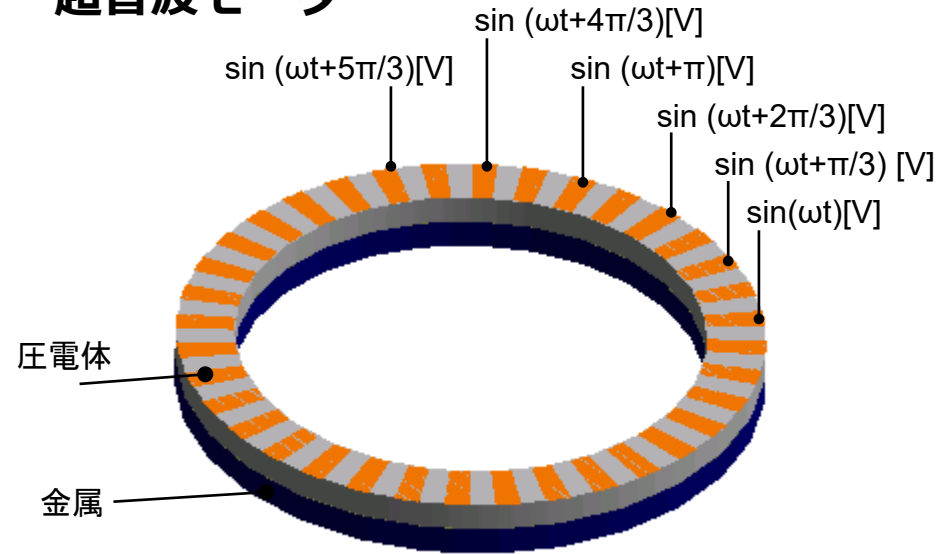
変位分布



ブザー



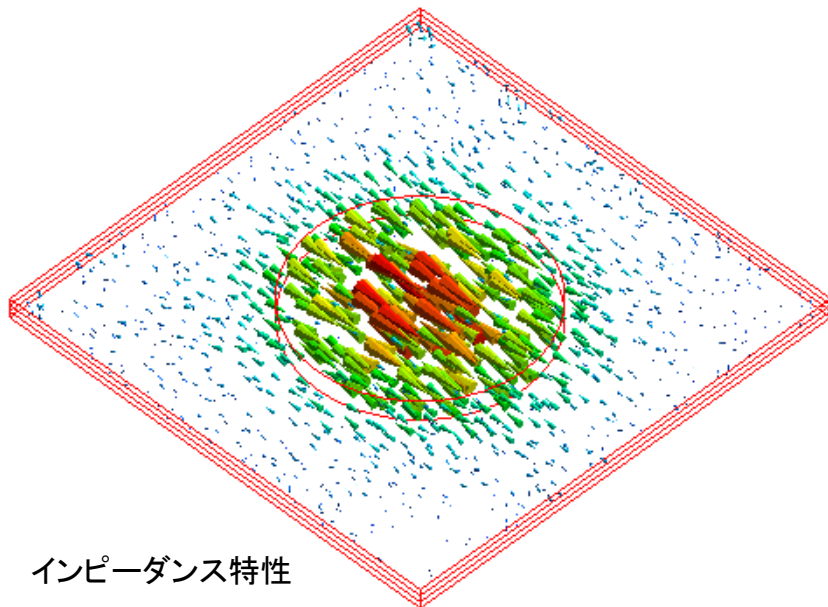
超音波モータ



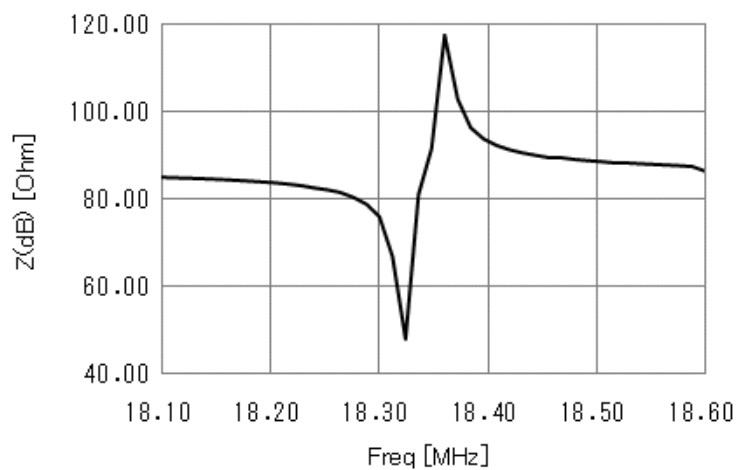
Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>



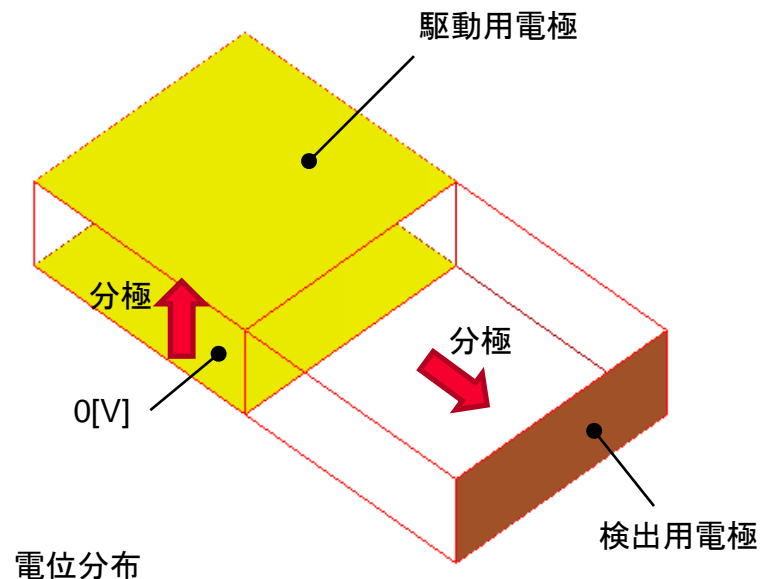
水晶振動子



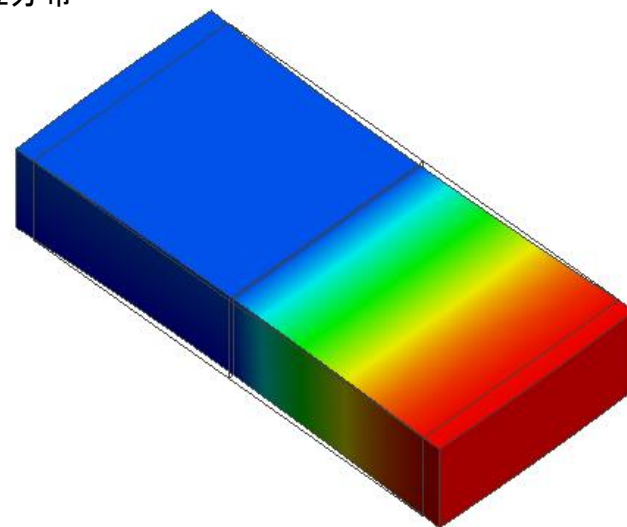
インピーダンス特性



圧電トランス



電位分布



- (1) 解析条件
- (2) 境界条件
- (3) 材料定数
- (4) ボディ属性
- (5) 結果表示



(1) 解析条件

解析条件の設定

ソルバの選択

圧電解析

メッシュ

開放境界

共振解析

調和解析

過渡解析

ステップ/熱荷重

加速度

角速度

一定温度

高度な設定

結果インポート

説明

圧電解析

解析の種類

静解析

共振解析

調和解析

過渡解析

解析平面

2次元断面

平面応力

拘束する変数

電位

X方向変位

Y方向変位

Z方向変位

大変形

大変形

オプション

加速度 熱荷重

角速度

初期応力 静荷重を境界条件で指定

Thermoelastic Damping T0= 20.0 [deg]

共振モード利用の過渡解析

出力設定

結果フィールドを出力する

結果グラフ

アドミタンス インピーダンス ...

解析の種類

- 静解析
- 調和解析
- 共振解析
- 過渡解析

解析のオプション

- 加速度
- 熱荷重
- 角速度
- 初期応力を考慮した解析
- Thermoelastic Dampingを考慮する
- 共振モード利用の過渡解析

解析平面

2次元解析で使用

拘束する変数

例えば、電気的な性質を考慮しない解析では、電位にチェックを入れる。



解析条件の設定

ソルバの選択

圧電解析

メッシュ

開放境界

共振解析

調和解析

過渡解析

加速度

角速度

熱荷重

一定温度

高度な設定

結果インポート

説明

調和解析

周波数

スイープタイプ

等間隔 周波数間隔

等間隔 分割数

対数間隔

ひとつの周波数

テーブル

周波数確認

スイープ値

最小周波数 kHz

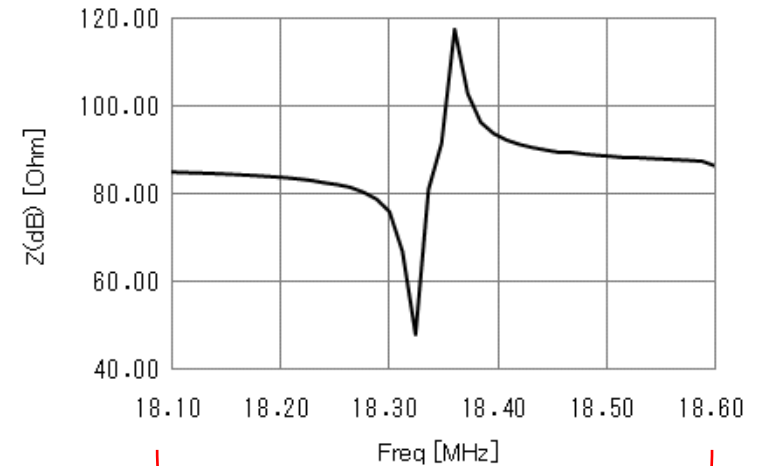
最大周波数 kHz

分割数

周波数スイープ

逐次スイープ

フィールド表示でポート毎に重み指定を可能にする



計算する周波数の設定

他に「高速スイープ」を選択できるが
圧電解析では収束性が悪いため
「逐次スイープ」の使用をおすすめします。
PC性能(特にメモリ)が高い場合は
「並列逐次スイープ」(※)が利用できます。

ONにすると、計算後に電極の位相を変更できる

※ 別途「高速化オプション」が必要です。



解析条件の設定

ソルバの選択

圧電解析

メッシュ

開放境界

共振解析

調和解析

過渡解析

加速度

角速度

共振解析

共振解析

モード数

6

周波数の近似値

0

kHz

入力電力

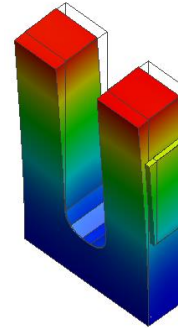
1.0

[W]

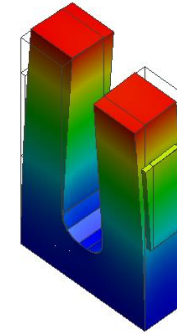
Q値を高精度で計算する

[周波数の近似値]から近い共振モードを
[モード数]の数だけ計算する

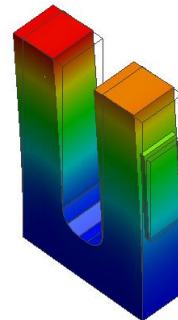
6.862kHz



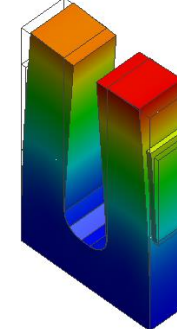
7.020kHz



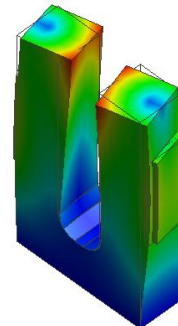
8.322kHz



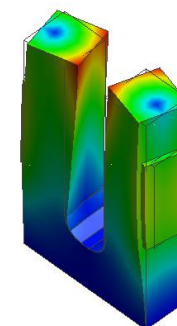
8.378kHz



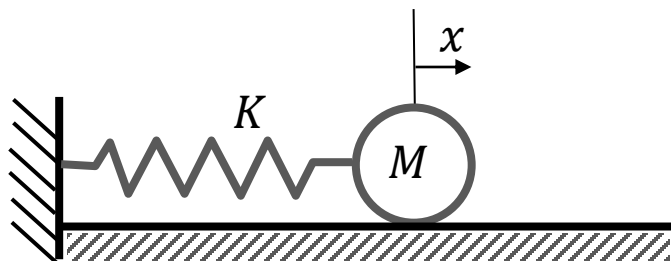
29.753kHz



30.146kHz



共振解析



**駆動源は無い
周波数が求まる**

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -Kx$$

$x = x_0 \cos(\omega t)$
を仮定すると。

$$-M\omega^2 x = -Kx$$

固有振動周波数が得られた

$$\omega = \sqrt{K/M}$$

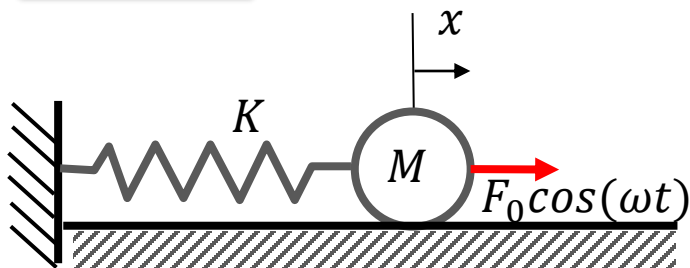
K :ばね定数[N/m]、 M :質量[kg]、 x :変位[m]、 ω :角周波数[rad/s]

Femtetが扱っているのは連続体なので、メッシュに依存したサイズの行列演算を行っている。

共振解析の場合は

$$[K]\{u\} = \omega^2 [M]\{u\}$$

調和解析



**駆動源と周波数を入力
振幅が求まる。**

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + Kx = F_0 \cos(\omega t)$$

$x = x_0 \cos(\omega t)$
を仮定すると。

$$(K - M\omega^2)x_0 = F_0$$

結果として
振幅 x_0 が求まる。

調和解析の場合は

$$([K] - \omega^2 [M])\{u\} = \{f\}$$

[K] : 形状、材料定数から決まる行列。
[M] : 形状、密度から決まる行列。
{u}: 変位、電位に対応する未知ベクトル
{f}: 力に対応するベクトル。
 ω : 周波数。(共振解析では未知、調和解析ではユーザが設定するので既知)

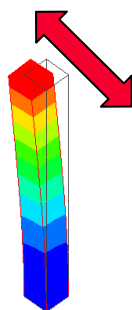
共振解析

モデルの持つ固有の振動（固有振動数（周波数）、固有振動モード）を解析する。様々な振動モードが得られる。

下面固定

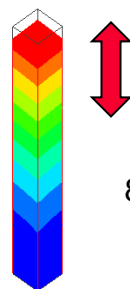


モデル 1



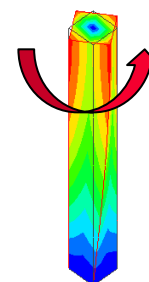
結果図 1

8243[Hz]



結果図 2

8253[Hz]



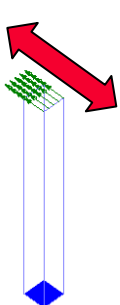
結果図 3

76542[Hz]

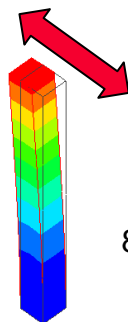
調和解析

ある周波数で振動源を設定した解析。振動源の振動方向に合わせた振動モードのみ励振される。

上面励振
下面固定

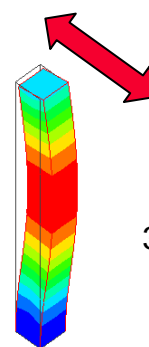


モデル 2



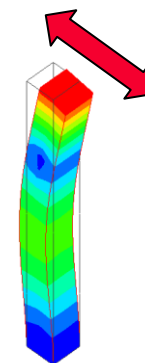
結果図 4

8080[Hz]



結果図 5

33000[Hz]



結果図 6

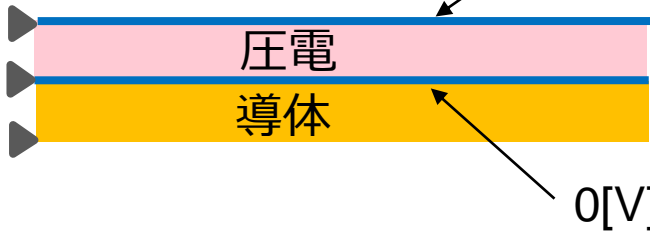
58000[Hz]



過度解析

解析モデル

入力電圧



解析時間ステップの設定 解析条件、過度解析タブ

解析条件の設定

ソルバの選択

- 圧電解析
- メッシュ
- 開放境界
- 共振解析
- 調和解析
- 過度解析**
- 加速度
- 角速度
- 熱荷重
- 一定温度
- 高度な設定
- 結果インポート

過度解析

時間ステップ

指定 自動

リスタート 前回の続き

No.	ステップ数	出力間隔	時間ステップ[s]
1	500	1	0.1
2			
3			
4			
5			

指数

入力電圧 境界条件、電気タブ

境界条件の編集 [hot]

電気

機械

対称/不連続

説明

境界条件の種類

電気壁 表面インピーダンス

開放境界 入出力ポート

磁気壁 積分路

めっき壁 集中定数

電位指定

電位指定

電位

位相 [deg]

時間依存

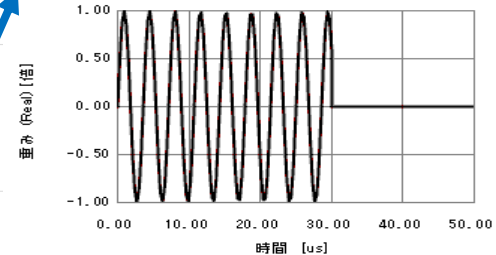
非線形テーブルの編集

[時刻-重み] 曲線

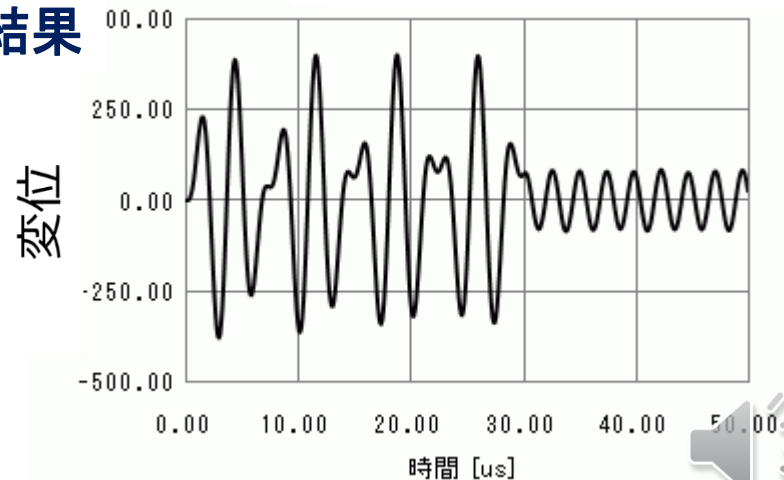
No.	時刻	重み
1	0.0000000000	0.0000000000
2	0.0000003000	0.5036232016
3	0.0000006000	0.8701837547
4	0.0000009000	0.9999210442
5	0.0000012000	0.8575266562
6	0.0000015000	0.4817536741
7	0.0000018000	-0.0251300954
8	0.0000021000	-0.5251746300
9	0.0000024000	-0.8822912264
10	0.0000027000	-0.9992894726
10	0.0000040000	0.9999207264
17	0.0000048000	0.8305958992

単位 s 倍

最終時刻: 5.000000e-05[s] まで設定してください。



解析結果



解析条件の設定

ソルバの選択

圧電解析

メッシュ

開放境界

共振解析

調和解析

過渡解析

加速度

角速度

熱荷重

一定温度

角速度

角速度

X 0.0

Y 0.0

deg/s

Z 57

※静解析では遠心力が考慮されます。
圧電調和解析ではコリオリ力が考慮されます。

回転軸上の点

X 0.0

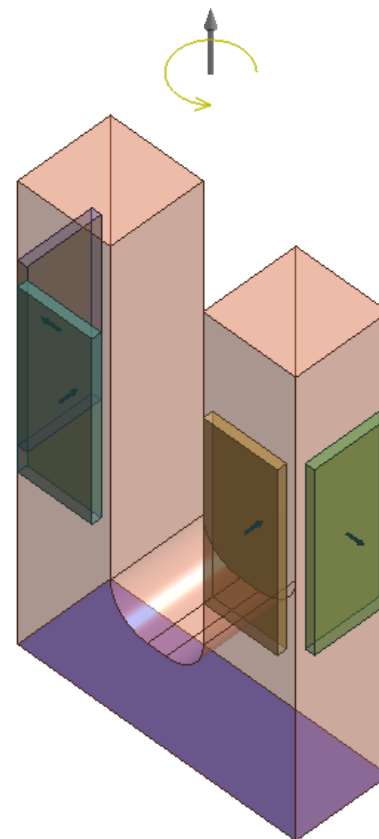
Y 0.0

mm

Z 0.0

※圧電解析(Rayleigh)では回転軸は原点
必ず通ります。

角速度を指定する事で
コリオリ力を考慮する事ができます。



初期応力を考慮した解析

解析条件の設定

ソルバの選択

- 圧電解析
- メッシュ
- 開放境界
- 共振解析
- 調和解析
- 過渡解析
- 加速度
- 角速度
- 熱荷重
- 一定温度
- 高度な設定
- 結果インポート

圧電解析

解析の種類

- 静解析
- 共振解析
- 調和解析
- 過渡解析

解析平面

- 2次元断面
- 薄板広がり

大変形

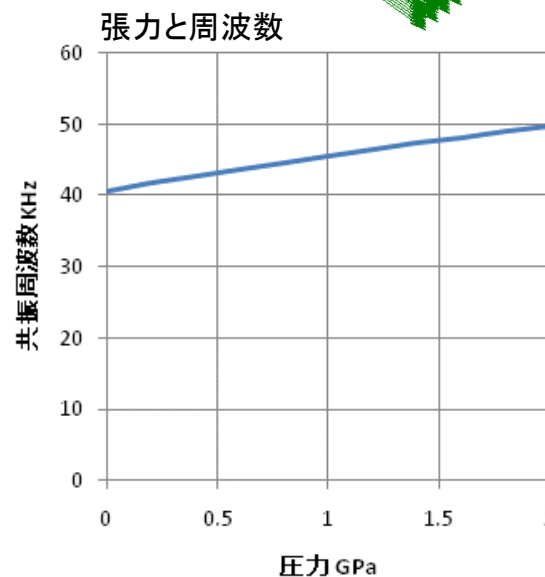
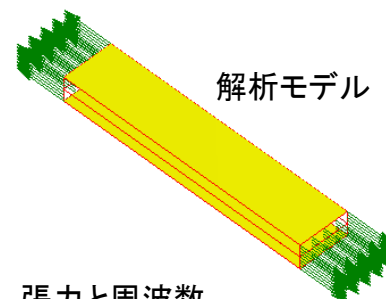
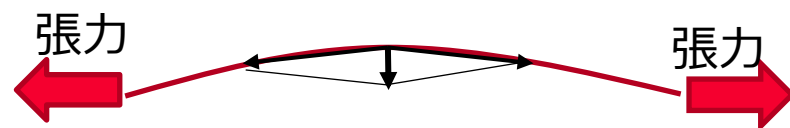
- 大変位

拘束する変数

- 電位
- X方向変位
- Y方向変位
- Z方向変位

オプション

- 加速度
- 角速度
- 一定温度
- 初期応力
- 計算結果を使用する(結果インポート) ▼
- Thermoelastic Damping T0= 20.0 [deg]
- 共振モード利用の過渡解析



一度「静解析」で解析を行い。
その結果を「結果インポート」機能を用いて
取り込んで「調和解析」「共振解析」を行います。

(2) 境界条件

「機械」的な境界条件

「電気」的な境界条件

境界条件の編集 [hot]

電気

機械

対称/不連続

説明

電気

境界条件の種類

- 電気壁
- 表面インピーダンス
- 多層電極
- 開放境界
- 入出力ポート
- 電気抵抗
- 磁気壁
- 積分路
- めっき壁
- 集中定数

電位指定

電位指定

電位 V

位相 [deg]

時間依存

浮き電極

グランドとの間に抵抗を挿入する

抵抗値 [Ω]

「対称／不連続」境界条件

機械

境界条件の種類

- 変位
- 集中荷重(点)
- 簡易接触
- 音響インピーダンス
- 垂直変位
- 分布荷重(線)
- 接触表面
- 開放境界
- 回転変位
- 分布荷重(面)
- ばね接続
- 拘束なし
- 加速度
- 圧力
- リモート荷重
- トルク荷重
- ジョイント荷重

トータル荷重で入力する

Pa

対称/不連続

対称

対称面

周期的

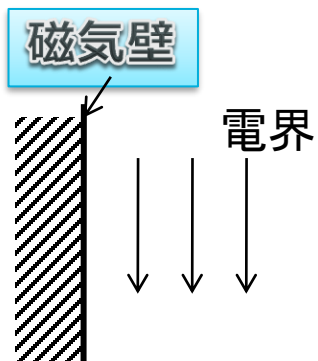
不連続

不連続



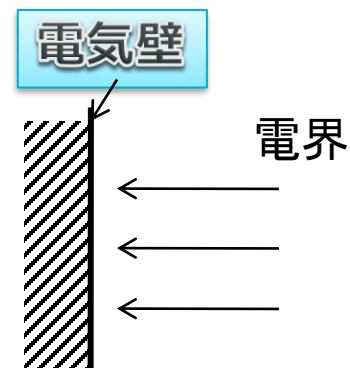
磁気壁

電界が水平方向となる境界条件

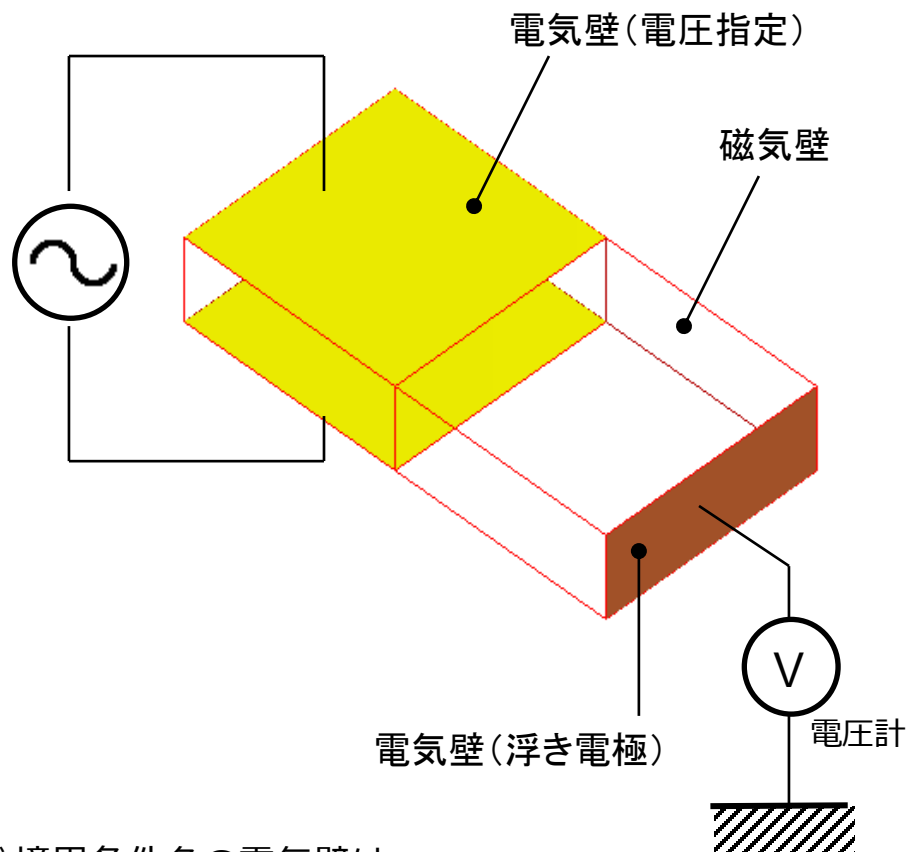


電気壁

電界が垂直方向となる境界条件



圧電トランスの例



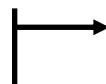
メモ：同じ境界条件名の電気壁は同電位になります。



$u=0$ (拘束)



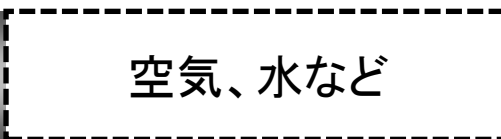
$u=1$ [mm] 強制変位



$T=p$ [Pa]
圧力、荷重



音響インピーダンス(空気、水などの媒質の抵抗)



圧電体と空気の接する面に、音響インピーダンスの境界条件を設定することで、空気の抵抗を考慮した解析をすることができます。

$$\text{音響インピーダンス} = \text{圧力} / \text{速度}$$

図1

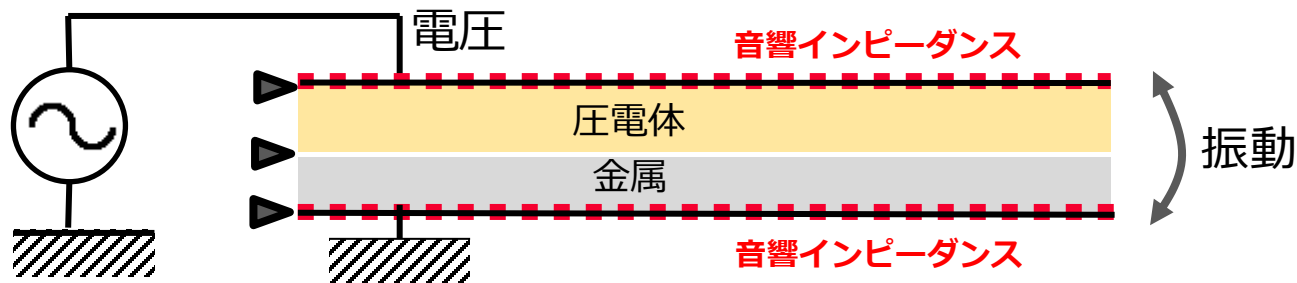
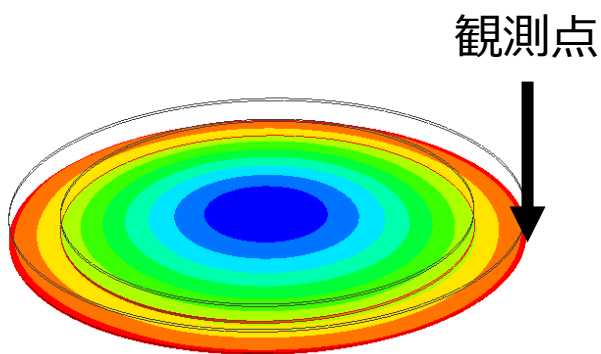


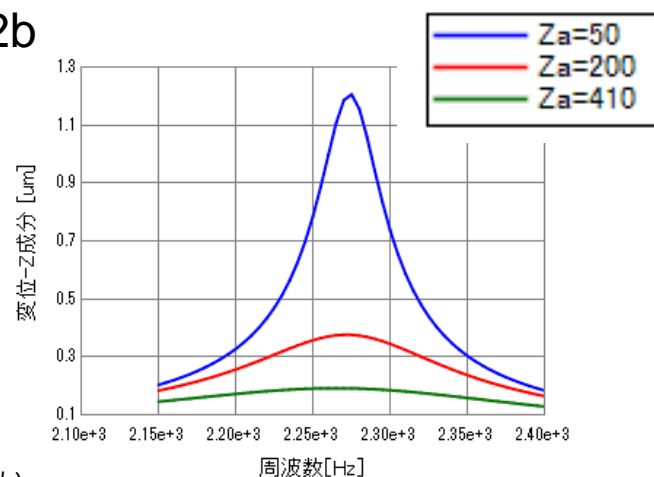
図2a

実位図: 10.642 倍



Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

図2b



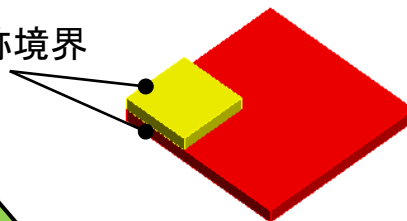
注意：共振解析の場合、共振解析タブの「周波数の近似値」におおよその周波数を入力してください。

フルモデル

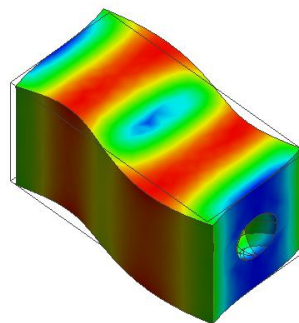
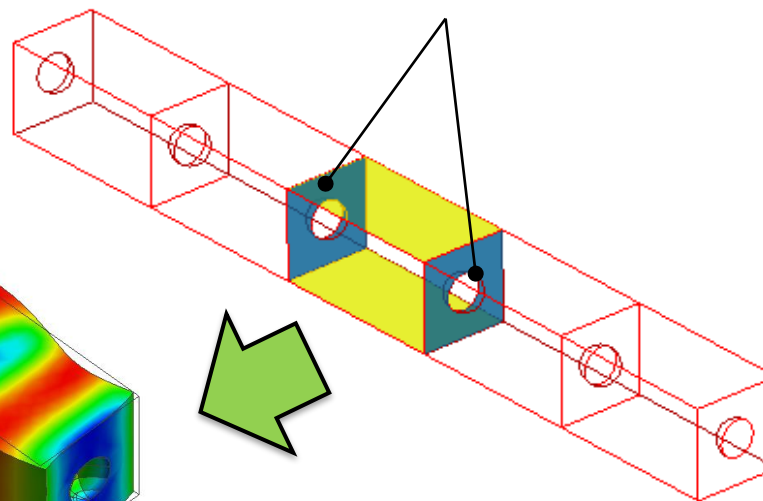


対称モデル

対称境界



周期境界



調和解析と共振解析の比較(境界条件)

境界条件のタブ	項目	静解析		調和解析	共振解析	過渡解析
		線形解析	非線形解析			
機械	● 変位	○	○	○	○	○
	● 垂直変位	○	○	○	○	○
	● 回転変位	○	○	○	×	○
	● 加速度	×	×	○	×	×
	● 集中荷重(点)	○	○	○	×	○
	● 集中荷重(面)	○	○	○	×	○
	● 分布荷重(面)	○	○	○	×	○
	● 圧力	○	○	○	×	○
	● トルク荷重	○	○	○	×	○
	● 簡易接触	○	○	○(すべり、開放のみ)	×	×
	● 接触	×	○	×	×	○
	● リモート荷重	○	○	○	×	○
	● 音響インピーダンス	×	×	○	○	×
	● 開放境界	×	×	○	○	×
電気	● 拘束なし	○	○	○	○	○
	● 電気壁	○	○	○	○	○
	● 磁気壁	○	○	○	○	○
対称/不連続	● 対称面	○	○	○	○	○
	● 周期的	○	×	○	○	×
	● 不連続	○	○	○	○	○

変位 0 : 利用できる
 変位 0 以外 : 駆動になるので使えない。

共振解析では駆動するタイプの境界条件 (●) は使えない。

電位 0 : 利用できる
 電位 0 以外 : 利用できる
 (注) 0[V]以外の電位を指定した場合、駆動としては機能しません。インピーダンス計算のポートを判断するために利用しています。

Femtetヘルプより抜粋
 目次タブ

- ・ Femtetでできる解析
- ・ 解析機能の詳細
- ・ 圧電解析

※境界条件、機械タブの以下の種類には対応できていません。
 ジョイント荷重
 バネ接続



(3) 材料定数

圧電定数

- ・弾性定数
- ・圧電定数
- ・誘電率
- ・損失(1/Qm, tanδ)

材料定数の編集 [000_P-4]

密度

圧電定数

粘弾性

説明

圧電定数

材料の種類

圧電体
 誘電体 (非圧電)
 完全導体

異方性

等方
 異方

圧電定数の指定方法

e形式 h形式
 d形式 g形式

確認ツール

弾性定数(コンプライアンス)行列

xx	0.76					
yy	-0.16	0.76				
zz	-0.17	-0.17	0.82			
yz	0	0	0	1.85		
zx	0	0	0	0	1.85	
xy	0	0	0	0	0	1.85
	xx	yy	zz	yz	zx	xy

X10 [1/Pa]

1/Qm(機械的減衰)

-4

5 X10

tanδ(電氣的減衰)

-3

6 X10

圧電定数行列

x	0	0	0	0	7.1	0
y	0	0	0	7.1	0	0
z	-0.7	-0.7	5.8	0	0	0
	xx	yy	zz	yz	zx	xy

X10 [C/N]

比誘電率行列

x	247		
y	0	247	
z	0	0	200
	x	y	z

密度

材料定数の編集 [000_P-4 From 材料データベース]

密度

圧電定数

粘弾性

説明

密度

密度

3

7.7 X10 [kg/m3]



材料定数の編集 [000_P-4]

密度

圧電定数

粘弾性

説明

圧電定数

材料の種類

圧電体 誘電体 (非圧電) 完全導体

異方性

等方 異方

圧電定数の指定方法

e形式 h形式 d形式 g形式

確認ツール

弾性定数(コンプライアンス)行列

xx	0.76				
yy	-0.16	0.76			
zz	-0.17	-0.17	0.82		
yz	0	0	0	1.85	
zx	0	0	0	0	1.85
xy	0	0	0	0	1.85
	xx	yy	zz	yz	zx

X10 [1/Pa]

圧電定数行列

x	0	0	0	0	7.1	0
y	0	0	0	7.1	0	0
z	-0.7	-0.7	5.8	0	0	0
	xx	yy	zz	yz	zx	xy

X10 [C/N]

比誘電率行列

x	247		
y	0	247	
z	0	0	200
	x	y	z

1/Qm(機械的減衰)

5 X10

tanδ(電氣的減衰)

6 X10

e形式(単結晶によく使用される)

$$[T] = [c^E][S] - [e][E]$$

$$[D] = [e_r][S] + [\epsilon^E][E]$$

d形式(セラミックスによく使用される)

$$[S] = [s^E][T] + [d][E]$$

$$[D] = [d_r][T] + [\epsilon^T][E]$$

h形式

$$[T] = [c^D][S] - [h][D]$$

$$[E] = -[h_r][S] + [\beta^D][D]$$

g形式

$$[S] = [s^D][T] + [g][D]$$

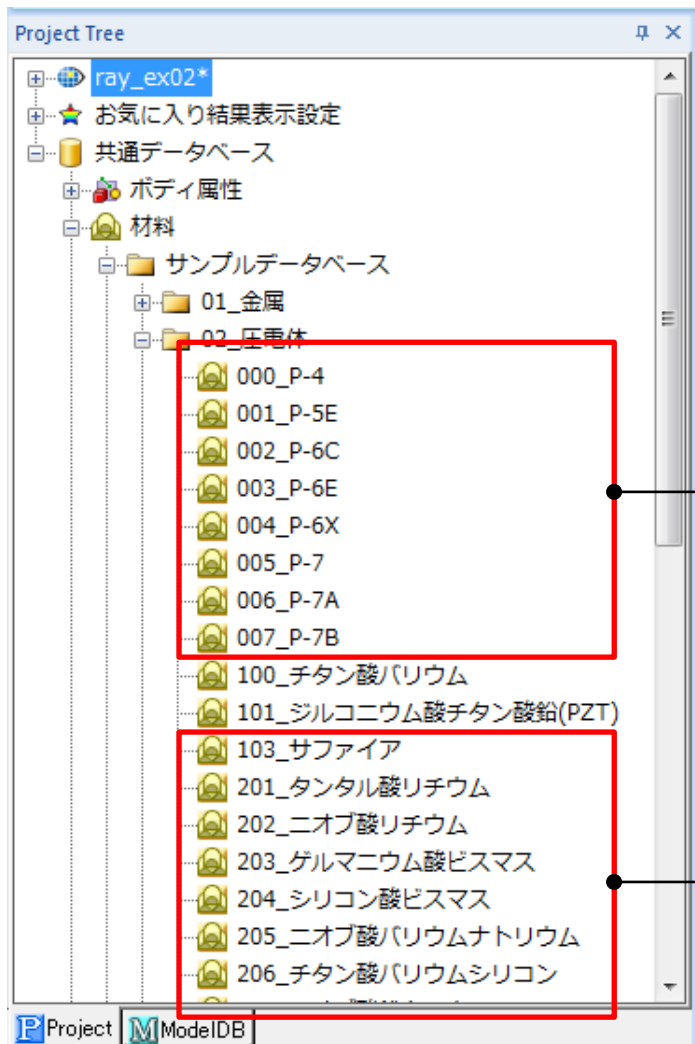
$$[E] = -[g_r][T] + [\beta^T][D]$$

T: 応力、S: ひずみ、D: 電束密度、E: 電界

- 振動モードにより異なる
- 共振時の振幅はQmに比例する
- 共振抵抗はQmに反比例する



登録されている圧電材料



村田製作所の
圧電セラミックス
(現在は非売品)

単結晶



“+”をクリックすると“-”に変わって、
図のように圧電材料のリストが
表示される



(4) ボディ属性

厚み／幅

シートボディの厚み
3次元解析時のシートボディの厚み

方向

分極軸、結晶軸の方向を設定

ボディ属性の編集 [ボディ属性_001]

厚み/幅

方向

解析領域

説明

シートボディの厚み

1.0 X10 [mm]

0

ボディ属性の編集 [ボディ属性_001]

厚み/幅

方向

解析領域

説明

方向タイプ

ベクトル 円中心方向 (ラジアル) 極異方

オイラー角 円周方向 ハルバツハ

分布取込

分布データ

ベクトル

X 0.0

Y 0.0 X10

Z 1.0

0

初期設定

方向タイプ

- ベクトル 円中心方向 極異方
 オイラー角 回転方向

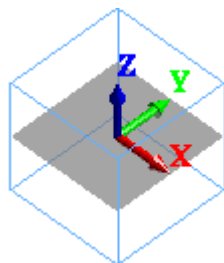
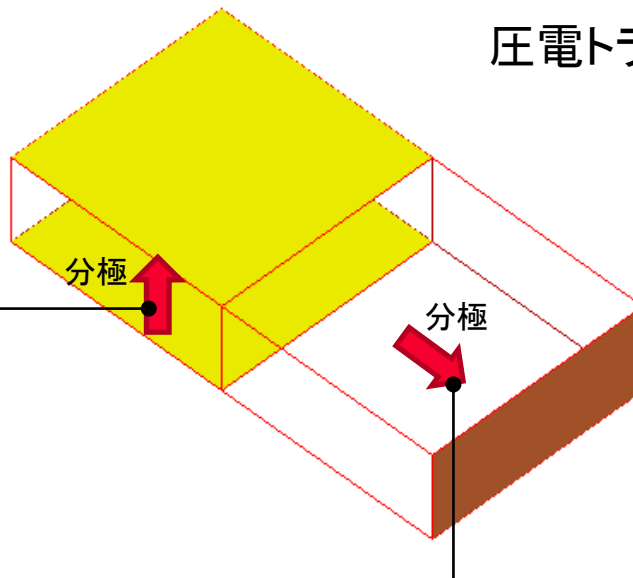
ベクトル

X

Y X10

Z

圧電トランス



方向タイプ

- ベクトル 円中心方向 極異方
 オイラー角 回転方向

ベクトル

X

Y X10

Z



オイラー角で結晶軸の設定

方向タイプ

ベクトル 円中心方向 極異方
 オイラー角 回転方向

オイラー角

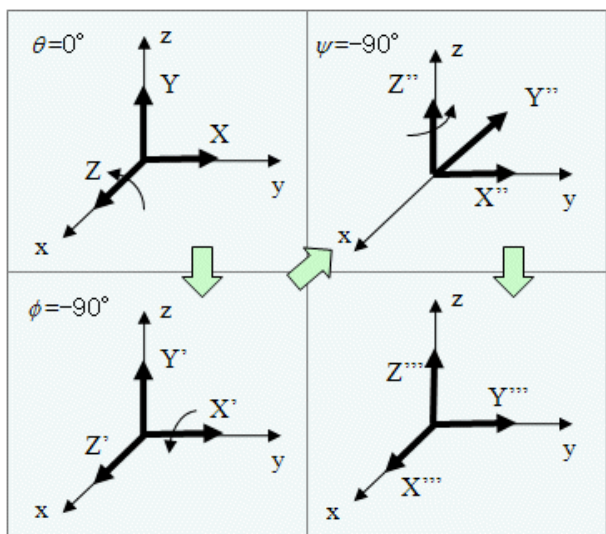
Z: X10 [deg]

X: X10 [deg]

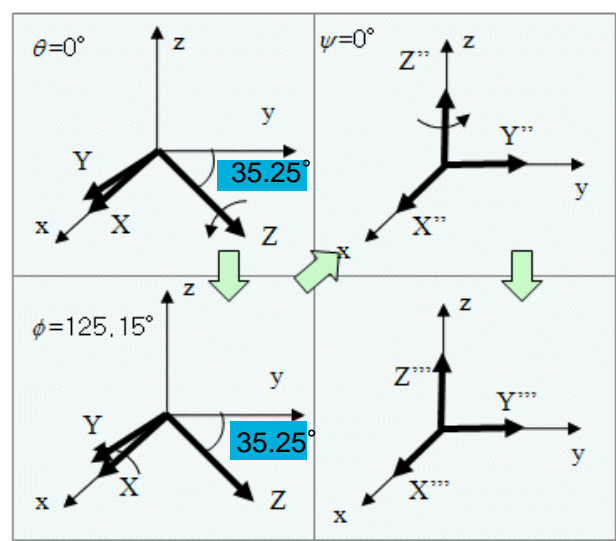
Z:

オイラー角(θ, ϕ, ψ)とは、Z軸周りに角度 θ
 X' 軸周りに角度 ϕ 、 Z'' 軸周りに角度 ψ 回転
 させた角度

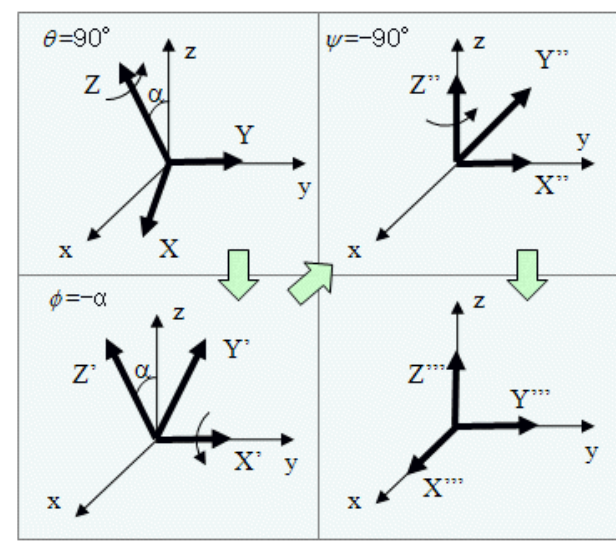
x軸に分極した圧電セラミックス (0,-90,-90)



水晶のATカット (0,125.25,0)



y軸まわり α 回転 (90,- α ,-90)

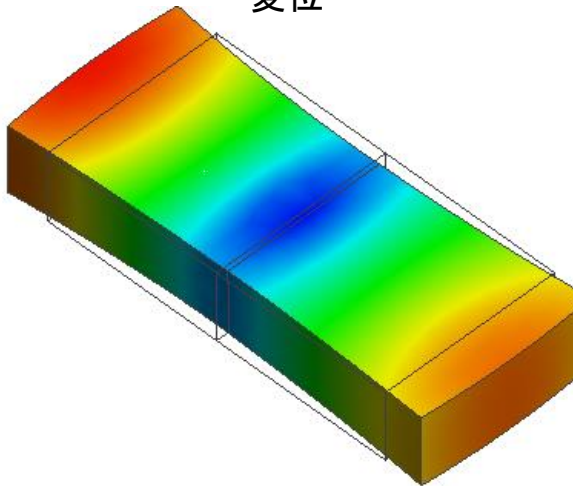


(5) 結果表示_フィールド

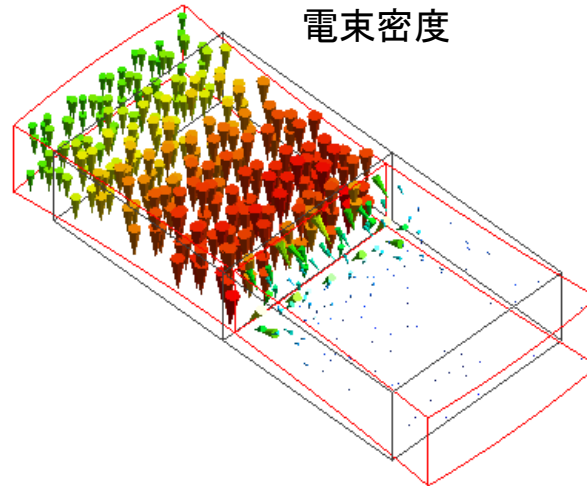
フィールド

- ・変位[m]
- ・ひずみ
- ・応力[Pa]
- ・電位[V]
- ・電界[V/m]
- ・電束密度[C/m²]

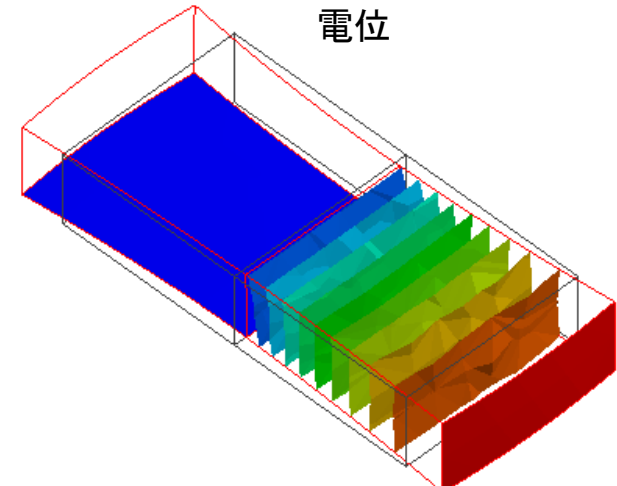
変位



電束密度



電位



電極上の電荷は一様ではない



調和解析での計算値

- ・電圧を指定した電極の電荷[C]
- ・電圧を指定した電極の電流[A]
- ・浮き電極の電圧[V]

“グラウンドとの間に抵抗を挿入する”
がOFFの場合



浮き電極の電荷の総和はゼロ。
電流値もゼロ。



計算値テーブルから、csvファイル
へのエクスポートやコピーでExcel
へのデータ移動が可能です。

“アドミタンス”タブ

計算値テーブル				
アドミタンス	電荷[C]	浮き電極電位[V]	電流値[A]	有限要素法情報
		ポート1	Y(1,1) / 実部	Y(1,1) / 虚部
0: 2.000000e+005Hz		in	6.52220816e-007	3.15937898e-005
1: 2.150000e+005Hz		in	1.59686153e-006	3.15809799e-005
2: 2.300000e+005Hz		in	2.28800649e-007	3.57333877e-005

“電荷[C]”タブ

計算値テーブル				
アドミタンス	電荷[C]	浮き電極電位[V]	電流値[A]	有限要素法情報
		in / 実部	in / 虚部	
0: 2.000000e+005Hz		2.51415391e-011	-5.19020834e-013	
1: 2.150000e+005Hz		2.33779956e-011	-1.18208561e-012	
2: 2.300000e+005Hz		2.47267186e-011	-1.58325019e-013	

“浮電極電位[V]”タブ

計算値テーブル				
アドミタンス	電荷[C]	浮き電極電位[V]	電流値[A]	有限要素法情報
		out / 実部	out / 虚部	
0: 2.000000e+005Hz		7.06095633e-001	5.15861953e-002	
1: 2.150000e+005Hz		-2.89906606e-001	-1.12055129e+000	
2: 2.300000e+005Hz		2.22132378e-001	7.42097770e-002	

“電流値[A]”タブ

計算値テーブル						
アドミタンス	電荷[C]	浮き電極電位[V]	電流値[A]	有限要素法情報		
		in / 実部	in / 虚部	out / 実部	out / 虚部	
0: 2.000000e+005Hz		6.52220816e-007	3.15937898e-005	7.06095633e-007	5.15861953e-008	
1: 2.150000e+005Hz		1.59686153e-006	3.15809799e-005	-2.89906606e-007	-1.12055129e-006	
2: 2.300000e+005Hz		2.28800649e-007	3.57333877e-005	2.22132378e-007	7.42097770e-008	

Rayleigh | 全結果まとめ表示 | エクスポート | 閉じる



共振解析での計算値

制動容量 C_d [pF]

自由容量 C_f [pF]

共振周波数 F_r [Hz]

共振周波数と

反共振周波数の差 DF [Hz]

結合係数 k [%]

共振抵抗 R_n [ohm]

等価容量 C_n [pF]

等価インダクタンス L_n [H]

“制動容量[F]”タブ

共振周波数 [Hz]	制動容量 [F]	自由容量 [F]	共振周波数と反共振周波数の差 [Hz]	結合係数 [%]
0: 7.460199e+004Hz	1.91331264e-011			
1: 8.547883e+004Hz	1.91331264e-011			
2: 1.341053e+005Hz	1.91331264e-011			

“共振周波数[Hz]”タブ

共振周波数 [Hz]	共振周波数 [Hz] / 実部	共振周波数 [Hz] / 虚部
0: 7.460199e+004Hz	7.46019877e+004	1.98324347e+001
1: 8.547883e+004Hz	8.54788314e+004	2.18173812e+001
2: 1.341053e+005Hz	1.34105276e+005	3.70382348e+001

“結合係数[%]”タブ

共振周波数 [Hz]	結合係数 [%]
0: 7.460199e+004Hz	5.32077653e+000
1: 8.547883e+004Hz	1.96012463e-003
2: 1.341053e+005Hz	5.46091526e-003

“等価容量[F]”タブ

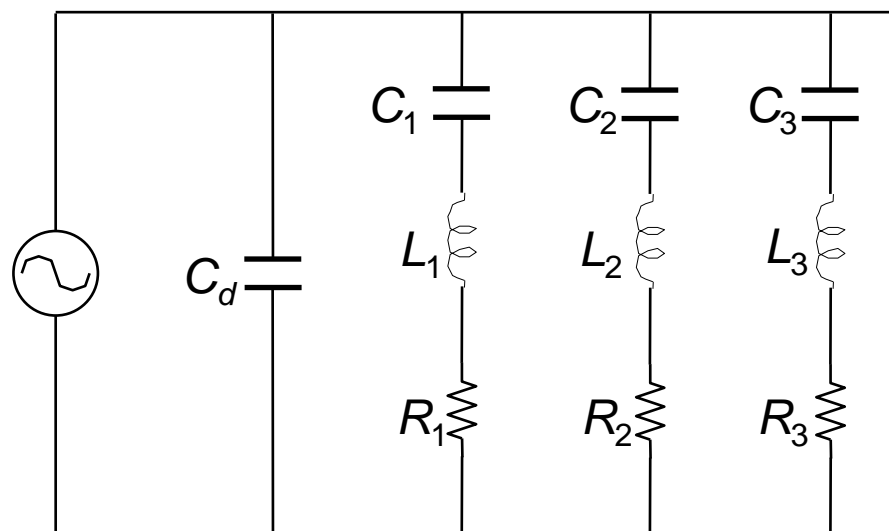
共振周波数 [Hz]	等価容量 [F]
0: 7.460199e+004Hz	6.99666652e-014
1: 8.547883e+004Hz	9.49529605e-021
2: 1.341053e+005Hz	7.37007678e-020

Rayleigh | 全結果まとの表示 | エクスポート | 閉じる | ヘルプ

全結果まとの表示
 0: 7.460199e+004Hz
 1: 8.547883e+004Hz
 2: 1.341053e+005Hz

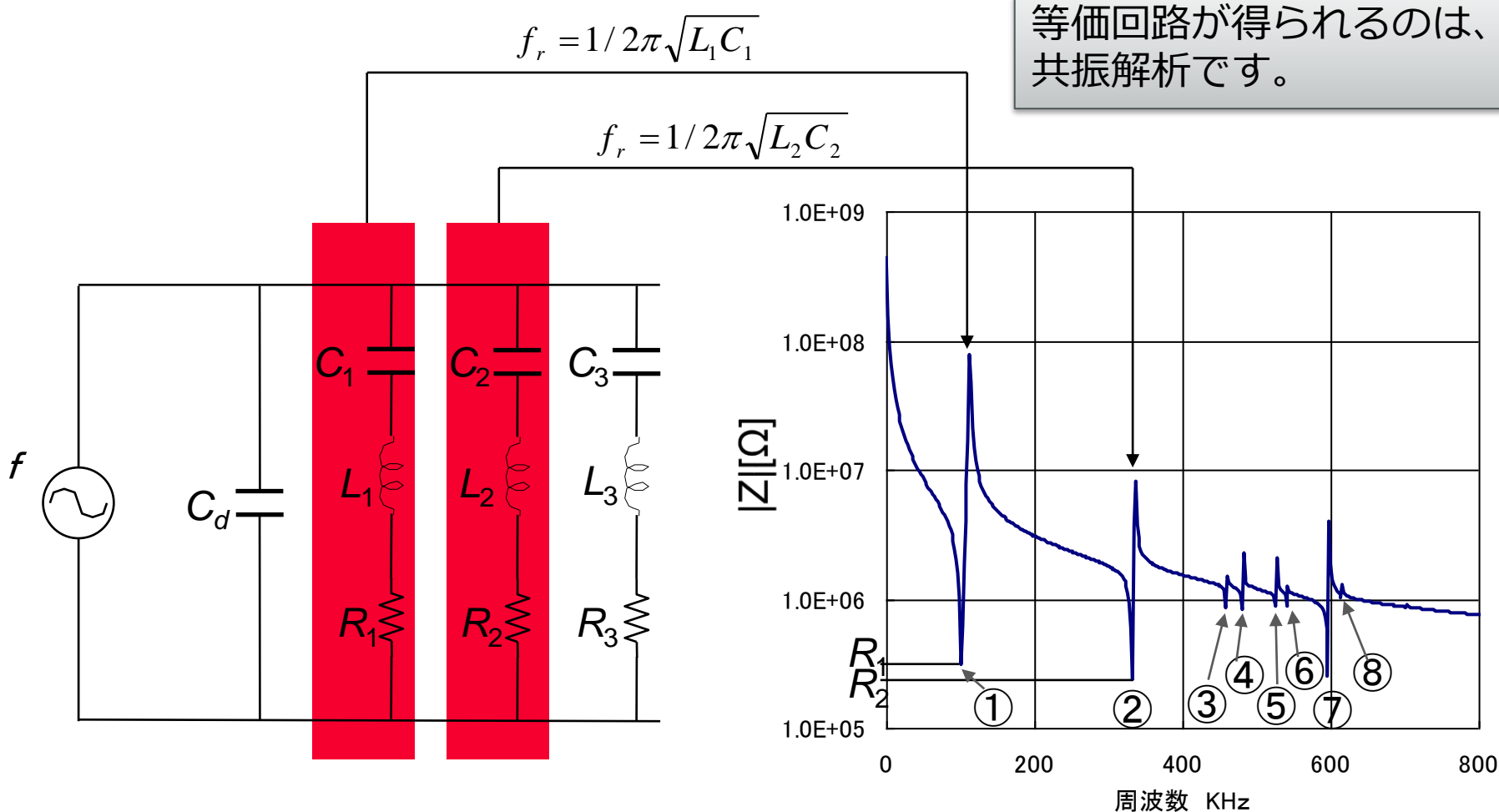


等価回路が得られるのは、共振解析です。



C_k : 等価直列容量
 L_k : 等価直列インダクタンス
 R_k : 等価直列抵抗
 C_d : 制動容量
 C_f : 自由容量





等価回路が得られるのは、共振解析です。

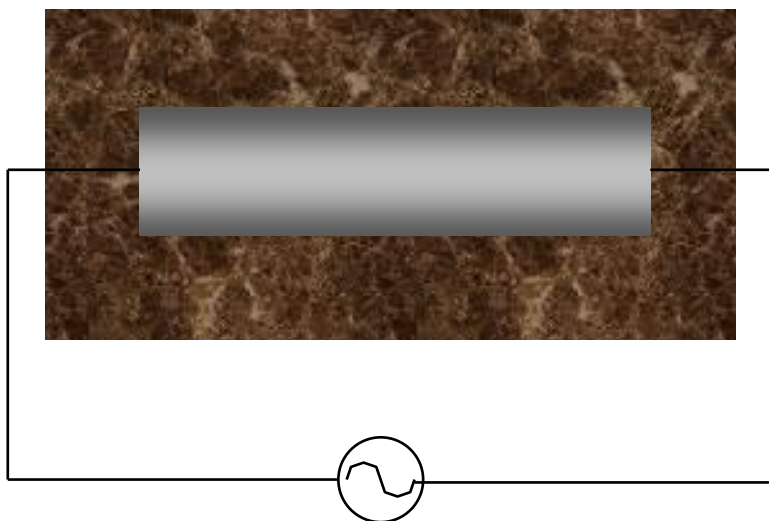
等価回路は複数の共振器を持っていて、共振器の数は解析条件、共振解析タブで入力したモード数に対応している。右図には明らかに8個の共振点を確認できるので、少なくともモード数8以上で計算した結果と考えられる。

ただし、調和解析の結果は、解析周波数範囲に含まれるすべてのモードを考慮しています。



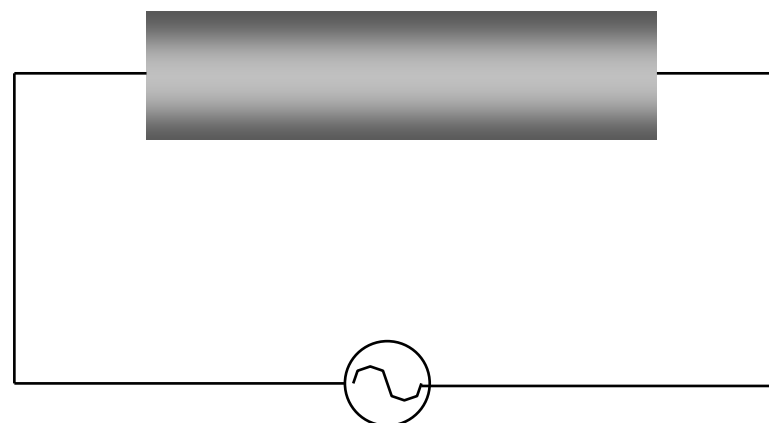
等価回路が得られるのは、
共振解析です。

制動容量 C_d
動けない状態の容量



自由容量 C_f
自由に動ける状態の容量

$$C_f = C_d + \sum_k C_k$$



- 共振周波数: 抵抗が最も小さな周波数

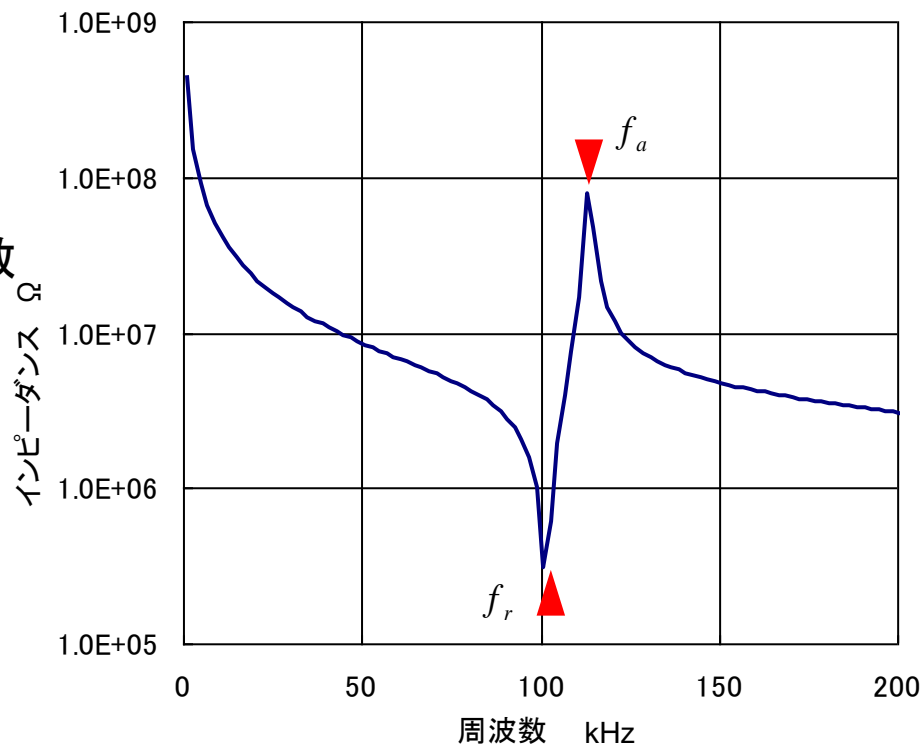
$$f_r$$

- 反共振周波数: 抵抗が最も大きな周波数

$$f_a = f_r \sqrt{1 + C_k / C_d}$$

- 結合係数: 電気⇔機械の変換効率

$$k = \sqrt{C_k / C_f}$$



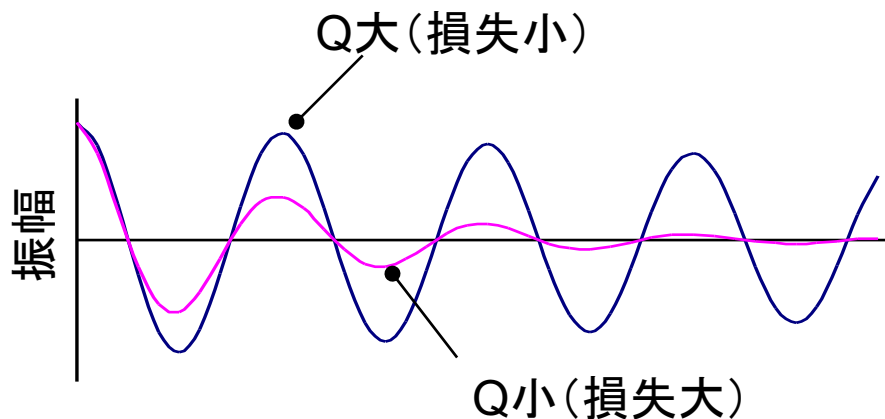
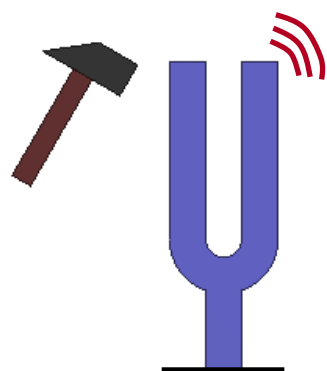
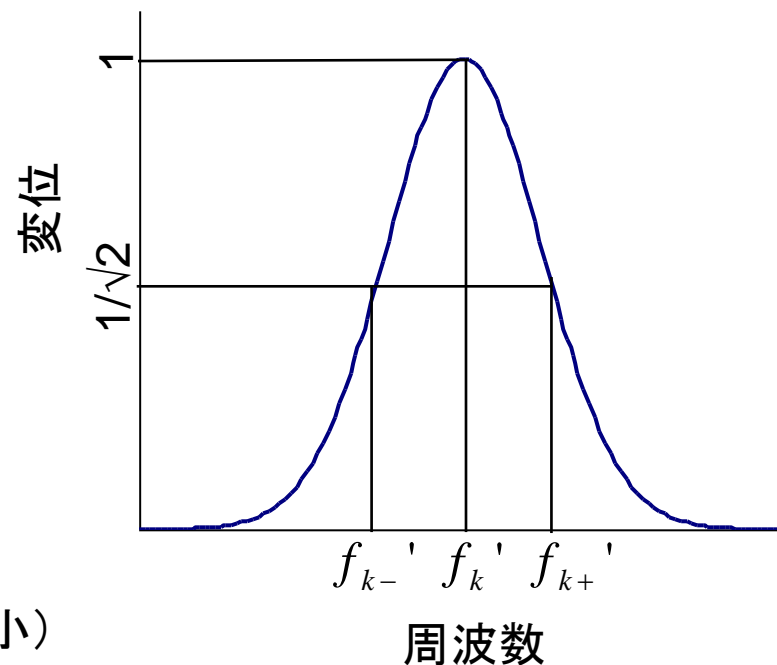
共振解析の結果として、共振周波数、共振周波数と反共振周波数の差、結合係数などが出力されます。



実部と虚部の比がQ

$$f_k = f_k' + jf_k''$$

$$Q = \frac{f_k'}{f_{k+}' - f_{k-}'} = \frac{1}{R_k} \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} = \frac{f_k'}{2f_k''}$$



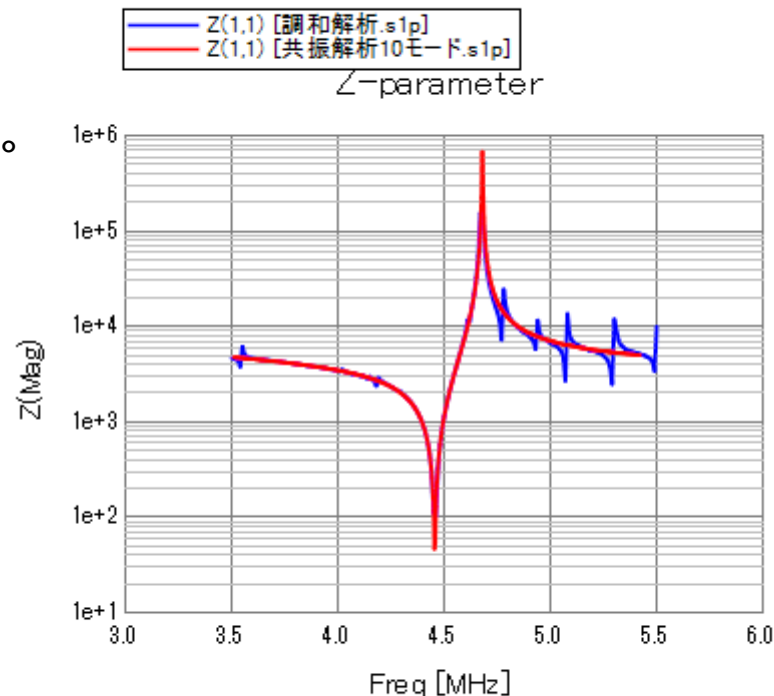
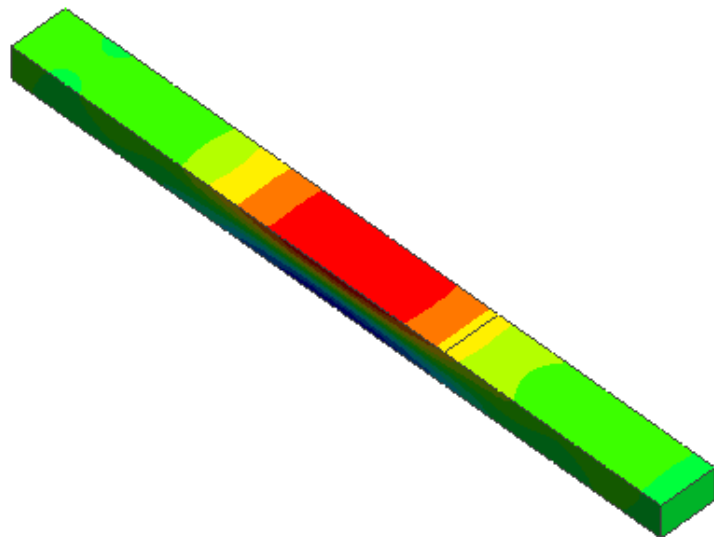
共振解析では、材料のQ値、 $\tan\delta$ 、音響インピーダンスを入力して、複素共振周波数を得ることができます。変位の周波数特性は、調和解析で得られます。



圧電解析例題 1 0

厚み滑り_SheetBodyモデルを使って、共振解析と調和解析を比較した。

ただし、共振解析で求めるモード数は、共振解析タブで、10モードに設定した。



計算時間の比較

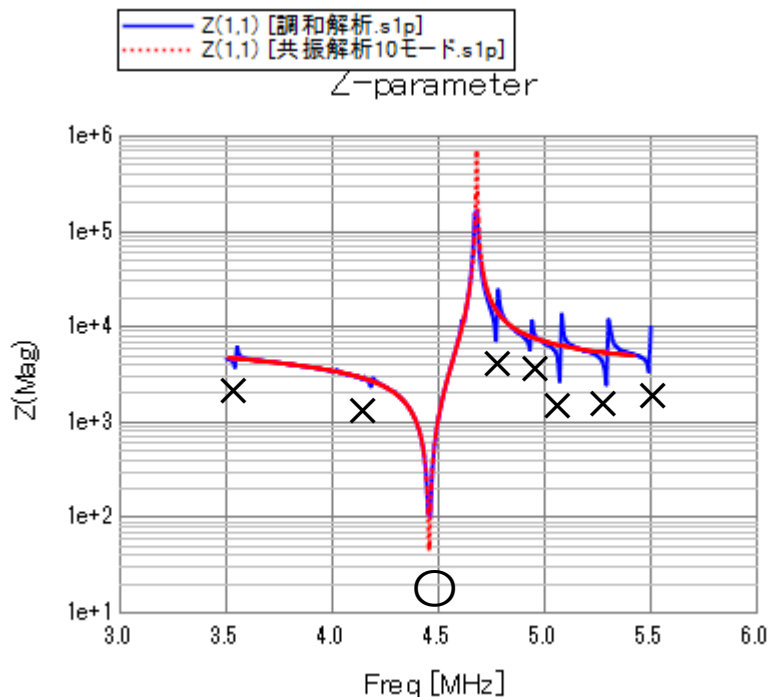
調和解析 200ポイント 3m49 s ■ 精度はこちらが上

共振解析 10モード 18 s ■ 断然早い。共振周波数の精度はこちらが上だが、スプリアスモードは計算できていない。

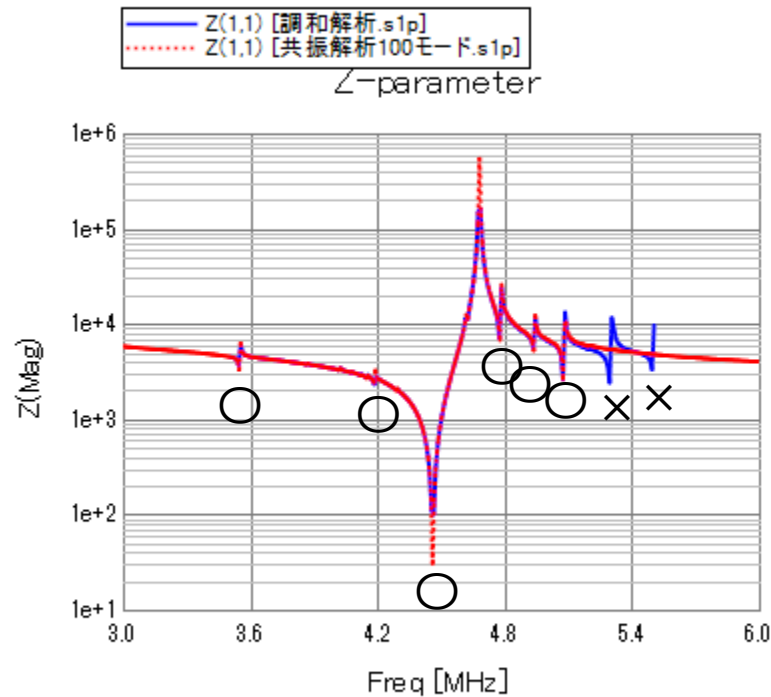


調和解析と共振解析の比較(計算時間)

共振解析のモード数を10と100で計算。調和解析の結果と比較した。
調和解析のピークを共振解析が見つけていれば○、見つけないければ×とした。



共振解析 (10モード)
+ 調和解析の結果



共振解析 (100モード)
+ 調和解析の結果

計算時間の比較

調和解析	200ポイント	3m49 s	■ 精度はこちらが上
共振解析	100モード	33 s	■ 断然早い。
共振解析	10モード	18 s	■ 断然早い。

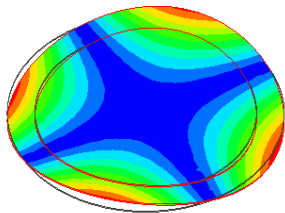
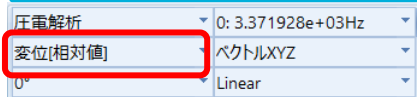


共振解析で得られた結果フィールド（変位、応力など）は一般的には絶対値が決まらないので、「相対値」の表示が付きまます。

ただし、以下の条件がそろった場合には、近似的に絶対値を求めています。

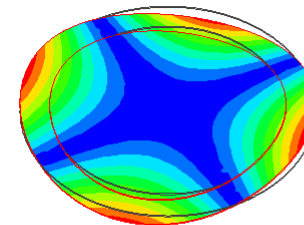
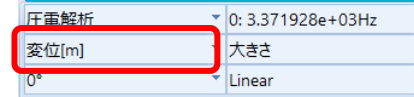
- ・ 0 [V]以外の電位の指定がある。
- ・ 損失（材料のQm等）の指定がある。

相対値の表示がある。



ソルバ : 圧電解析
モード : 0: 3.371928e+03Hz
フィールド: 変位[相対値]
成分 : 大きさ
位相 : 0
スケール : Linear

相対値の表示がない



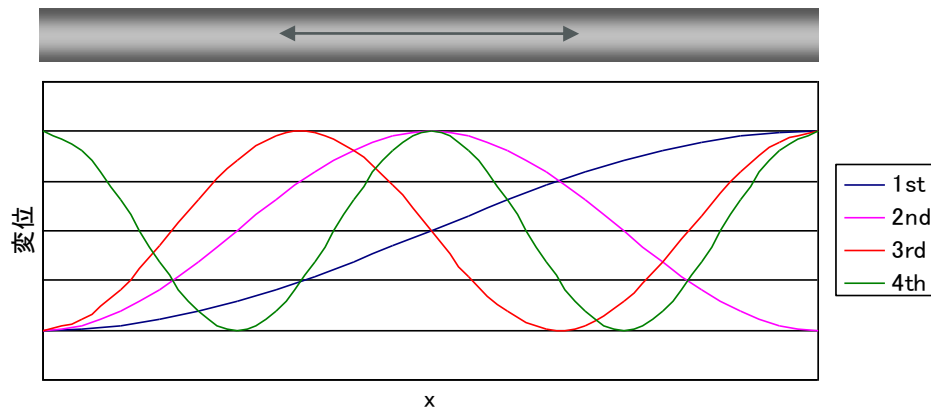
ソルバ : 圧電解析
モード : 0: 3.371928e+03Hz
フィールド: 変位[m]
成分 : ベクトルXYZ
位相 : 0
スケール : Linear

- (1) メッシュサイズ
- (2) 対称モデル



(1) メッシュサイズ

棒の伸び振動



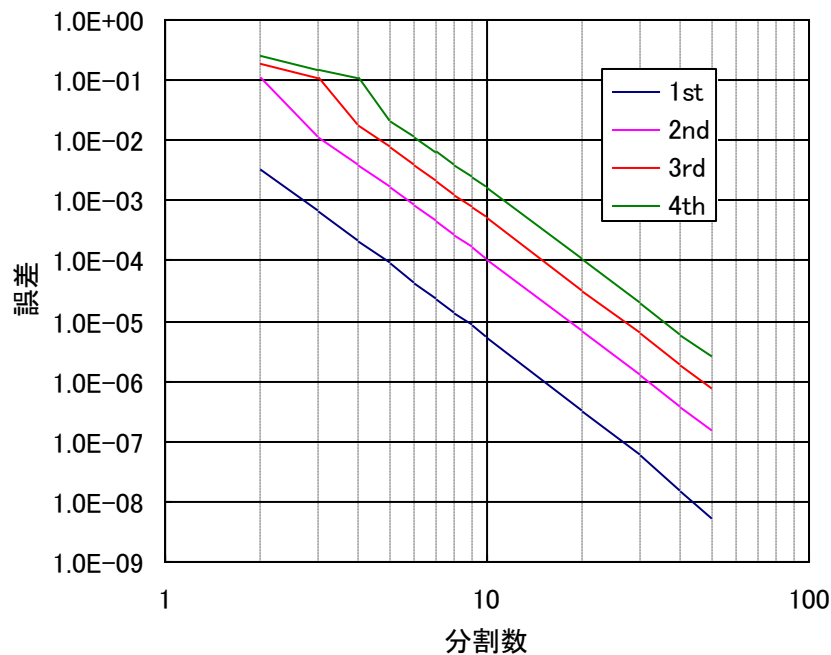
公式：棒の縦振動の周波数

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (n = 1, 2, 3, 4)$$

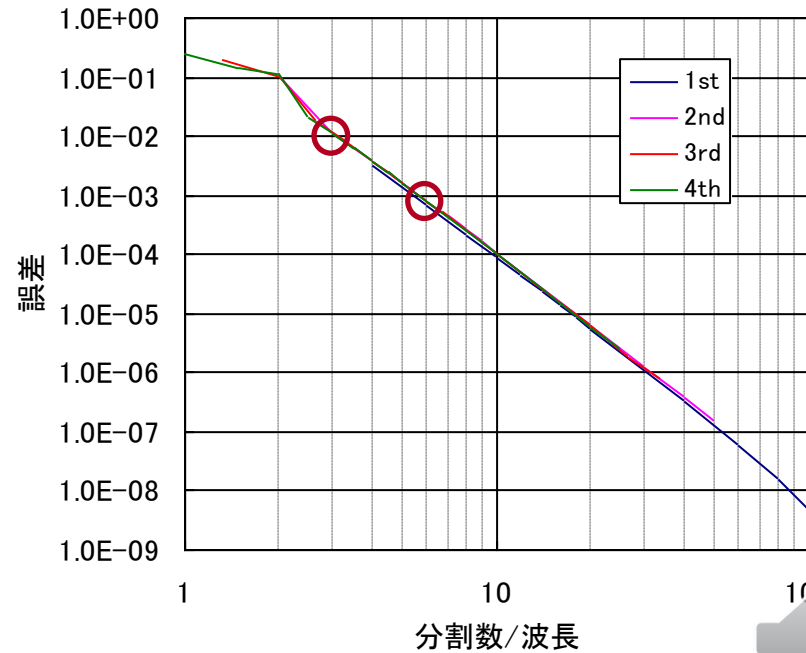


1波長3分割で1%、6分割で0.1%

2次要素の周波数の誤差

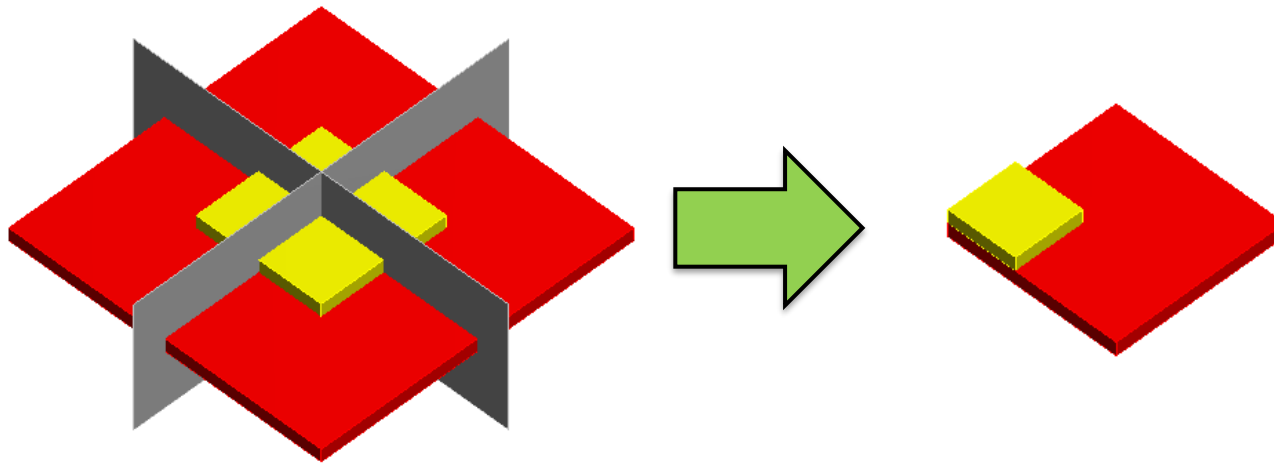


1波長あたりの分割数と誤差



(2) 対称モデル

1部の領域のみ解析することで、省メモリとスピードアップ



フルモデル

対称モデル

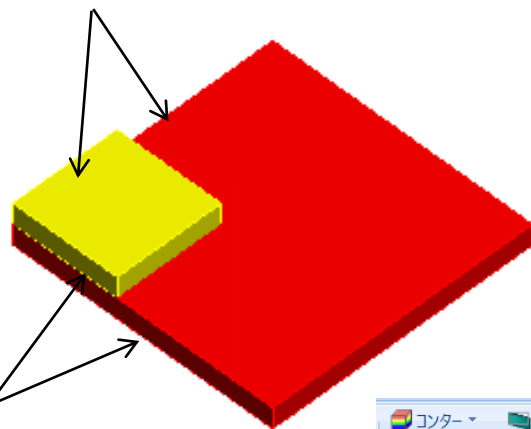
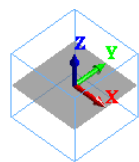
領域	メモリ	時間
1/2	1/2	1/4 (25.0%)
1/4	1/4	1/16 (6.3%)
1/8	1/8	1/64 (1.6%)



(2) 対称モデル

対称面に対称境界条件を設定

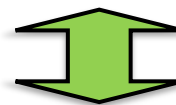
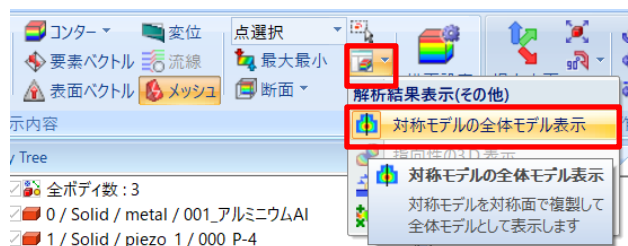
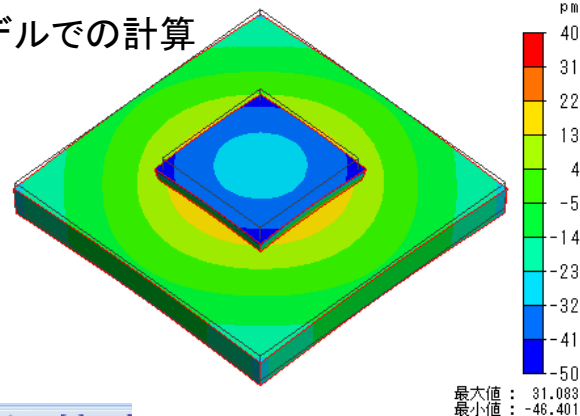
対称境界



対称境界

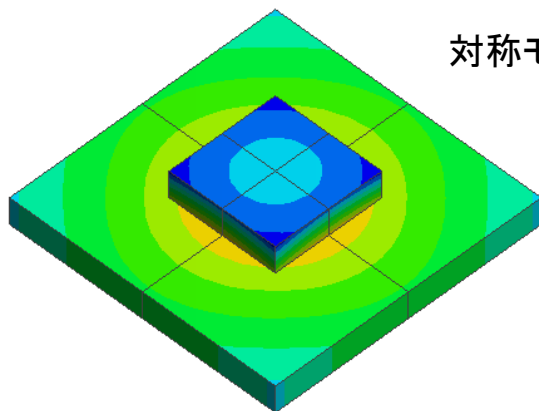
YZ面上の対称境界と
XZ面上の対称境界では
異なる名前を指定してください。
同じ境界条件名だと、エラー。

全体モデルでの計算

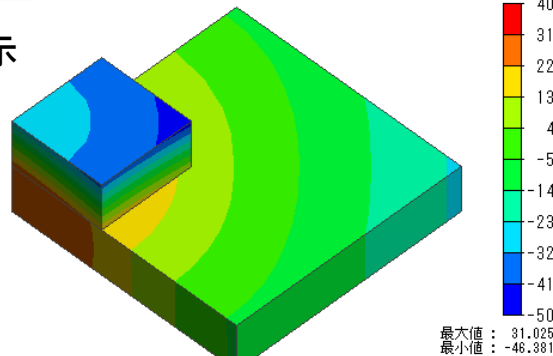


Z変位が一致

対称モデルを全体モデル表示



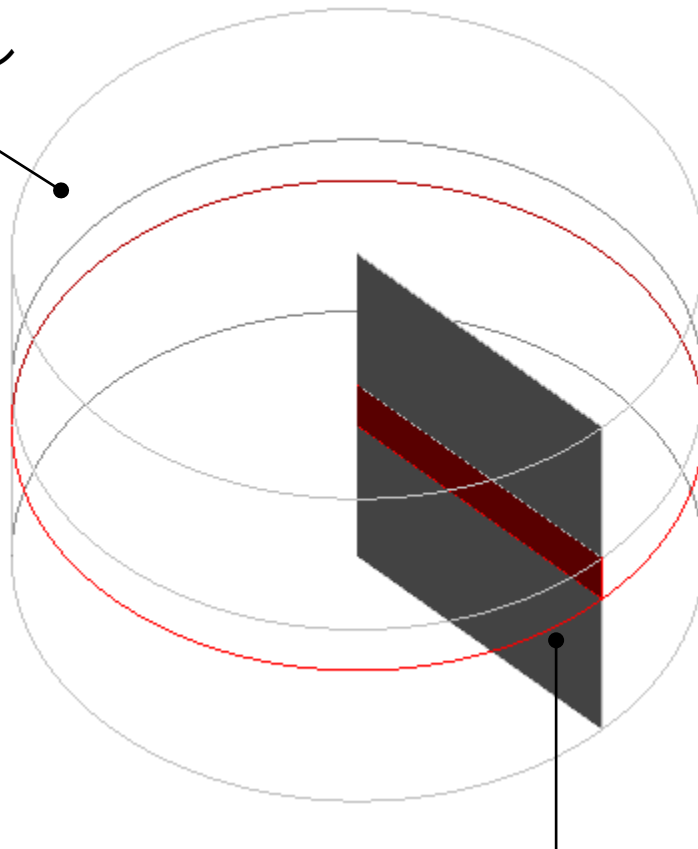
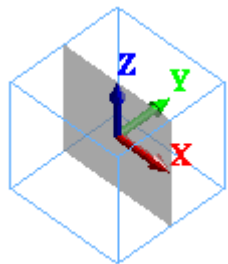
対称モデルでの計算



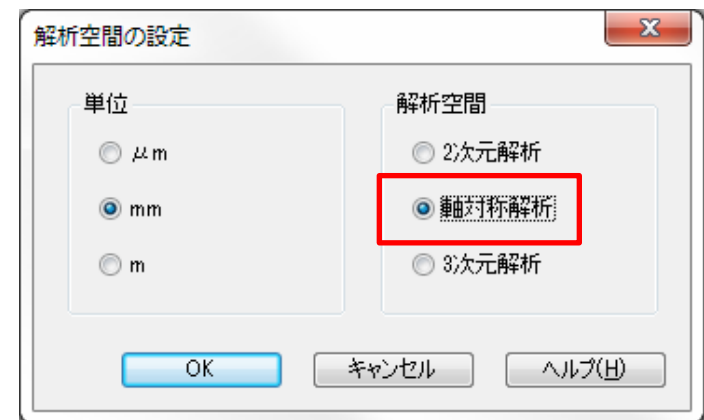
(2) 対称モデル

軸対称モデルは、xz面の軸対称解析で著しく解析時間が短縮

3次元モデル



軸対称モデル



☆圧電解析

1. 事例

2. 機能

3. ポイント

☆音波解析

4. 事例

5. 機能

6. ポイント

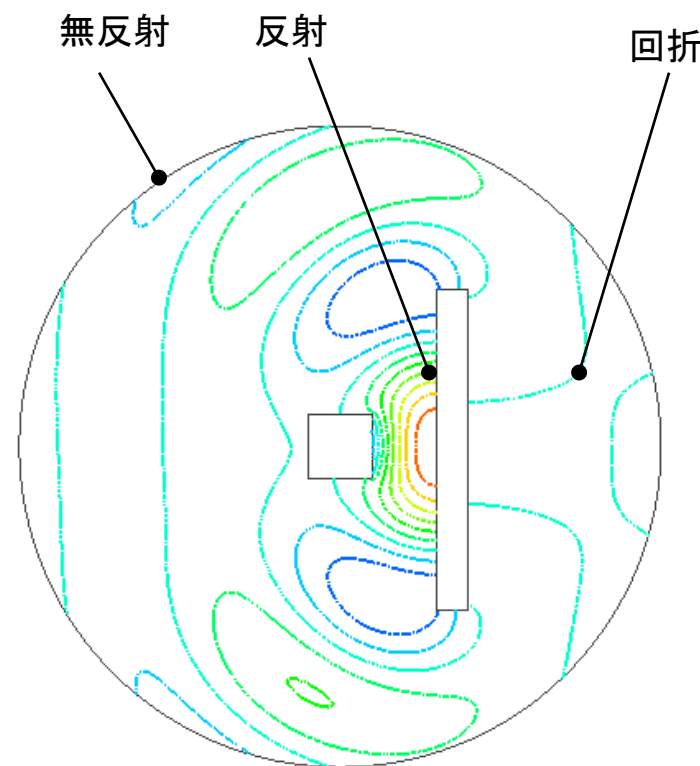
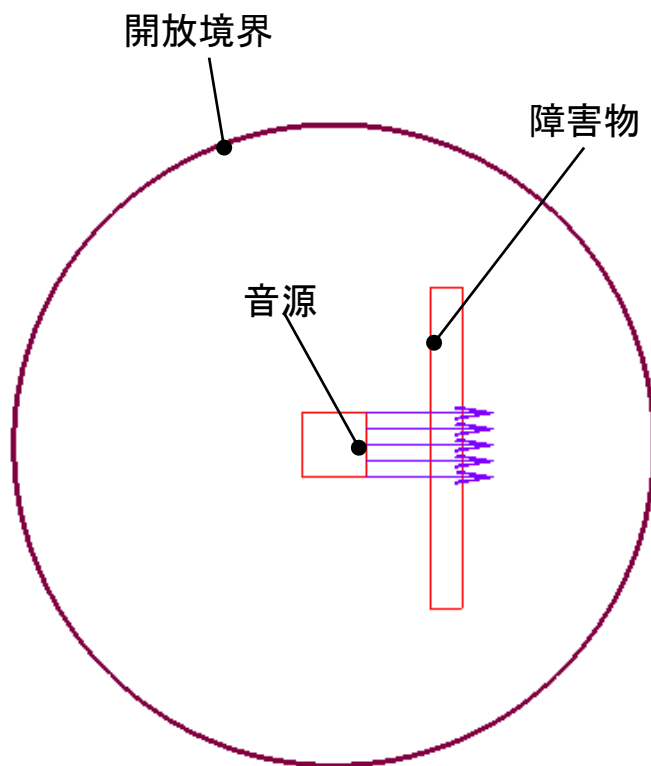
☆圧電・音波連成解析

7. 事例

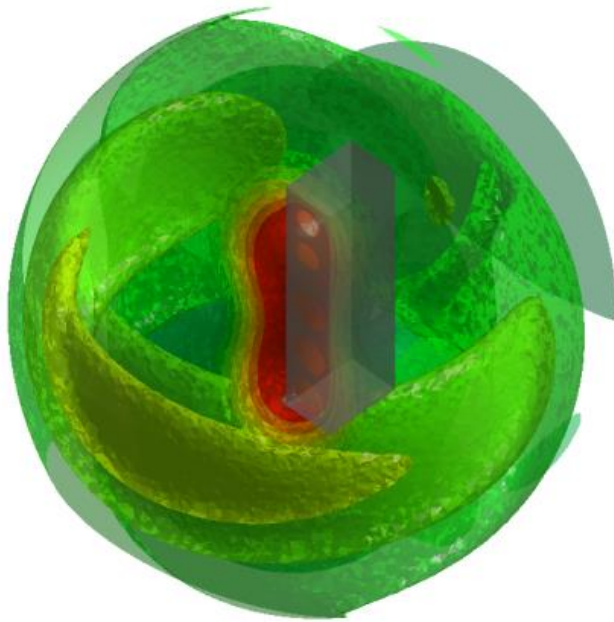
8. ポイント



反射と回折の例

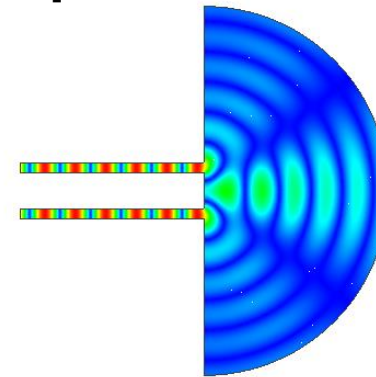


スピーカの音圧

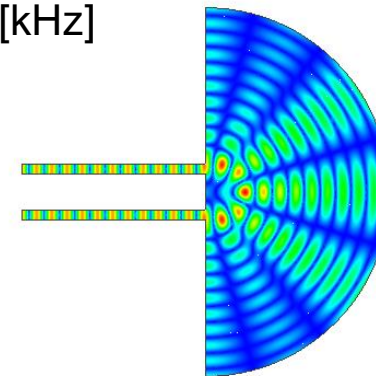


干渉縞の事例

1[kHz]



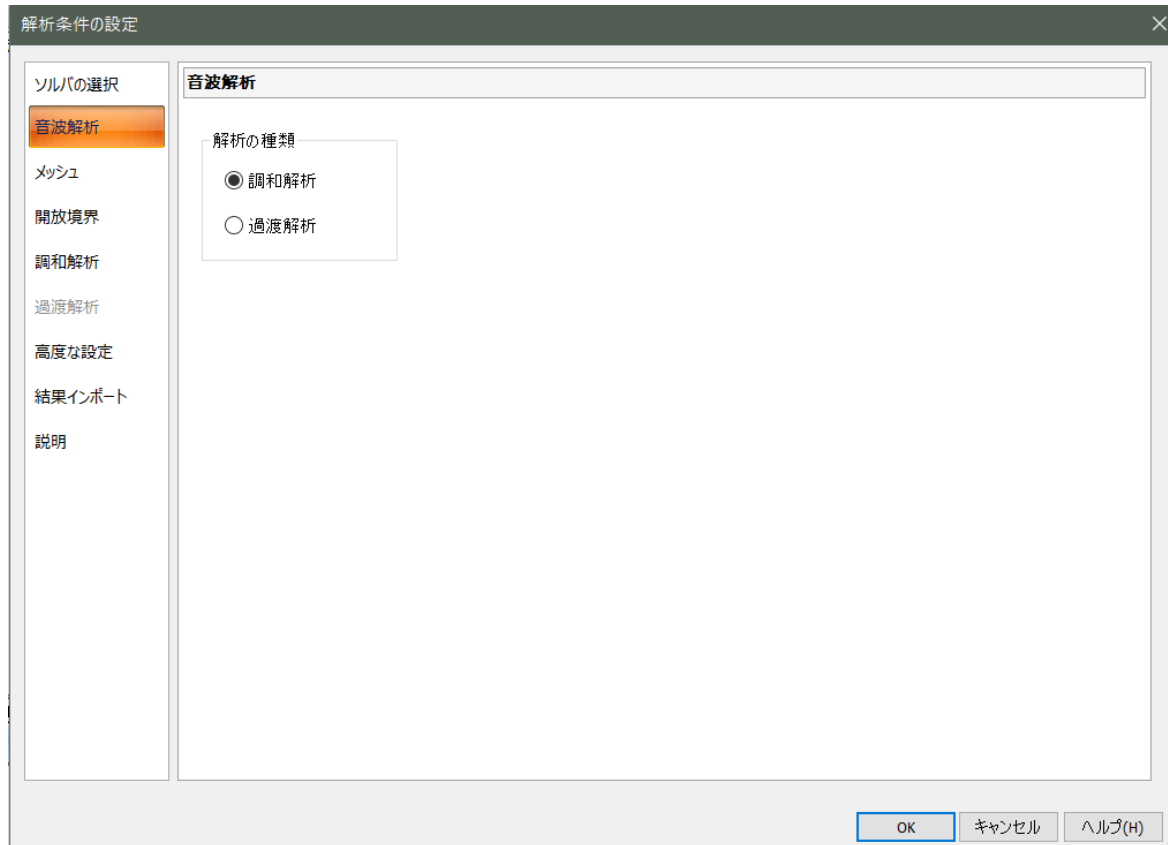
2[kHz]



- (1) 解析条件
- (2) 境界条件
- (3) 材料定数
- (4) ボディ属性
- (5) 結果表示



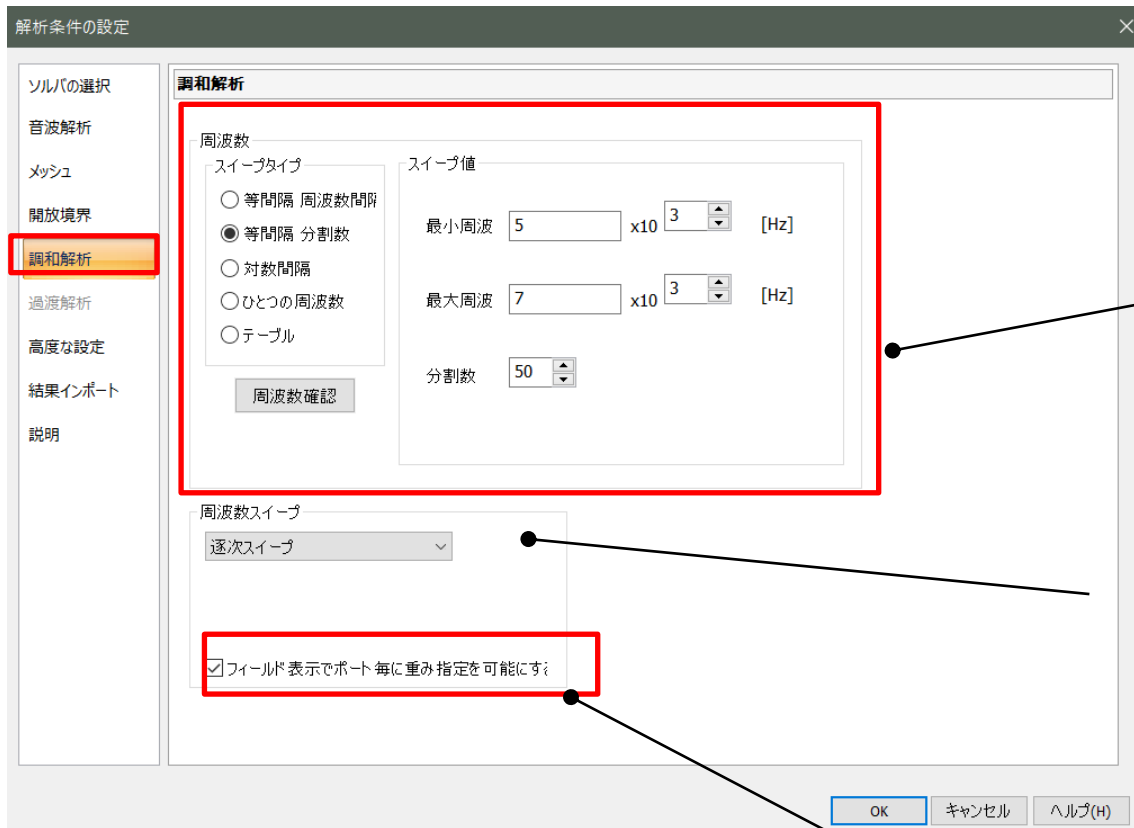
(1) 解析条件



解析の種類

- ・調和解析
- ・過渡解析





計算する周波数の設定

「逐次スイープ」、「高速スイープ」、
PC性能(特にメモリ)が高い場合は
「並列逐次スイープ」(*)が利用できます。

ONにすると、計算後に波源の位相を変更できる

※ 別途「高速化オプション」が必要です。



解析条件の設定

ソルバの選択

音波解析

メッシュ

開放境界

調和解析

過度解析

高度な設定

結果インポート

説明

過度解析

時間ステップ

指定 自動

リスタート

前回の続き

No.	ステップ数	出力間隔
1	10	1

指数

行の挿入(I)

行の削除(D)

テーブル表示(T)

求解法の指定

...

求解法の指定

陽解法(精度重視)

陰解法(時間重視)

高速モードを使用する

誤差 2

×10

-3

OK

キャンセル

OK

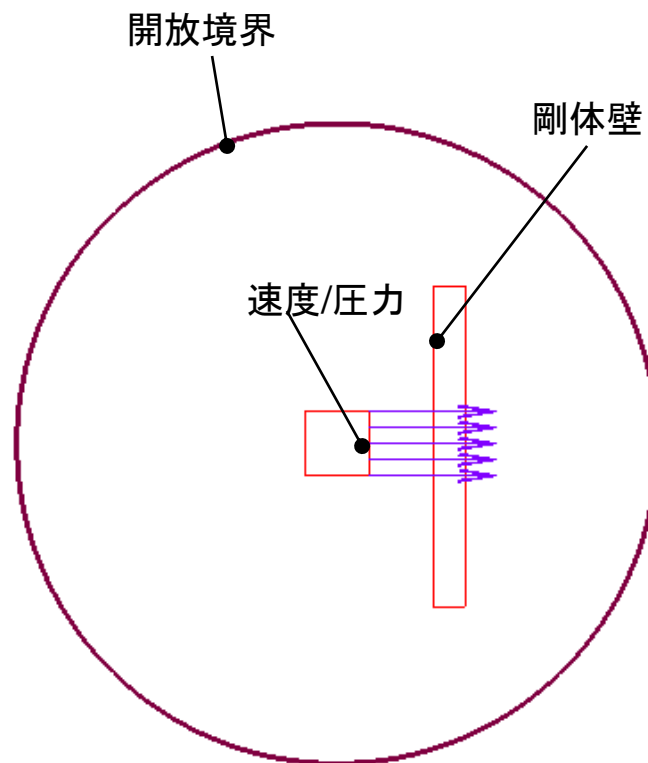
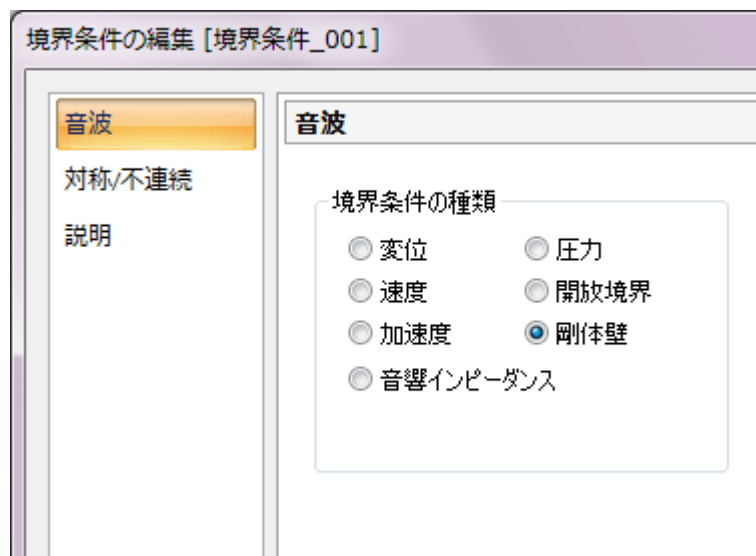
キャンセル

ヘルプ(H)

音波過度解析で時間ステップを自動にした場合、数値不安定性を起こさない時刻ステップ幅が算出されます。



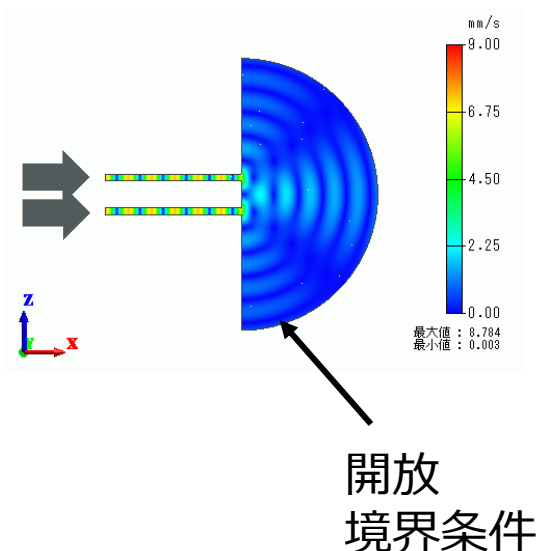
(2) 境界条件



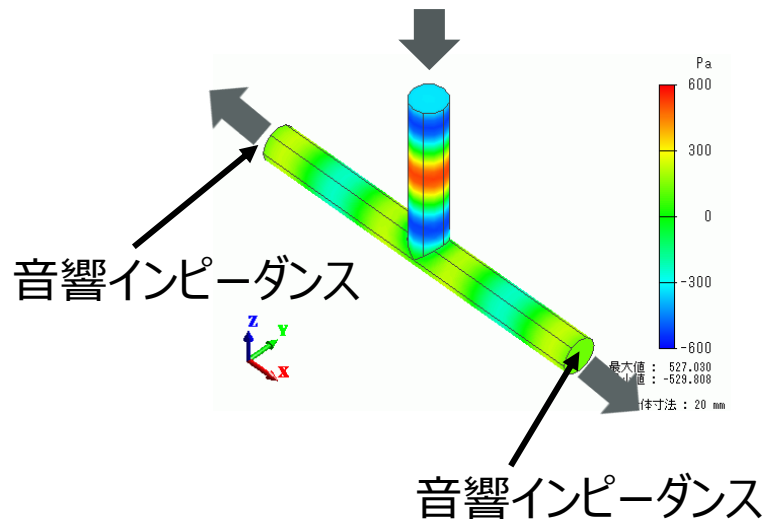
モデルの外に向かう音波を境界で通過させる目的で、開放境界条件や音響インピーダンスを使うことができます。

ヘルプ掲載されている音波例題3のように無限遠に向かって広がっていく解析では開放境界、音波例題のように1方向に進む平面波の場合は音響インピーダンスの利用が有効です。

音波例題3



音波例題7



音響インピーダンスを固有音響インピーダンスに設定することで、反射を抑えられる。

固有音響インピーダンス = 密度 × 音速



(3) 材料定数

密度

材料定数の編集 [000_空気 From 材料データベース]

密度

実数部 1.144 kg/m3

虚数部 0 kg/m3

周波数依存

なし

あり

OK キャンセル ヘルプ(H)

調和解析の時の
密度、音速の入力画面

音速

材料定数の編集 [000_空気 From 材料データベース]

音速

実数部 340 X10 [m/s]

虚数部 0 X10 [m/s]

周波数依存

なし

あり

OK キャンセル ヘルプ(H)

過渡解析の場合
虚部および周波数依存の入力
がなくなります。
減衰を考慮するため、音速タブ
に減衰係数 [kg/m3・s]
を入力できます。



音速の虚数部は減衰を表し、超音波では無視できない場合があります。

音波の減衰を表す「キルヒホッフの理論式」をもとに、音速の虚部に展開すると次式が得られます。減衰が周波数に比例して大きくなります。

$$c_{image} = \frac{\omega}{2c} \left(\frac{4\mu}{3\rho} + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{\kappa}{\rho C_v} \right)$$

ω :角周波数、 c :音速、 μ :粘性係数、 ρ :密度、 γ :比熱比、 κ :熱伝導率、 C_v :定積比熱

計算例： $c_{image}(\text{空気}) = 2.7f \times 10^{-7}$ 、 $c_{image}(\text{水}) = 2.8f \times 10^{-9}$

単位[m/s] f は周波数.

音速

音速

実数部 X10 [m/s]

虚数部 X10 [m/s]

周波数依存

なし

あり

非線形テーブルの編集

[周波数-音速]曲線

No.	周波数	実部	虚部
1	1	340	2.7e-7
2	1e5	340	2.7e-2
3			
4			

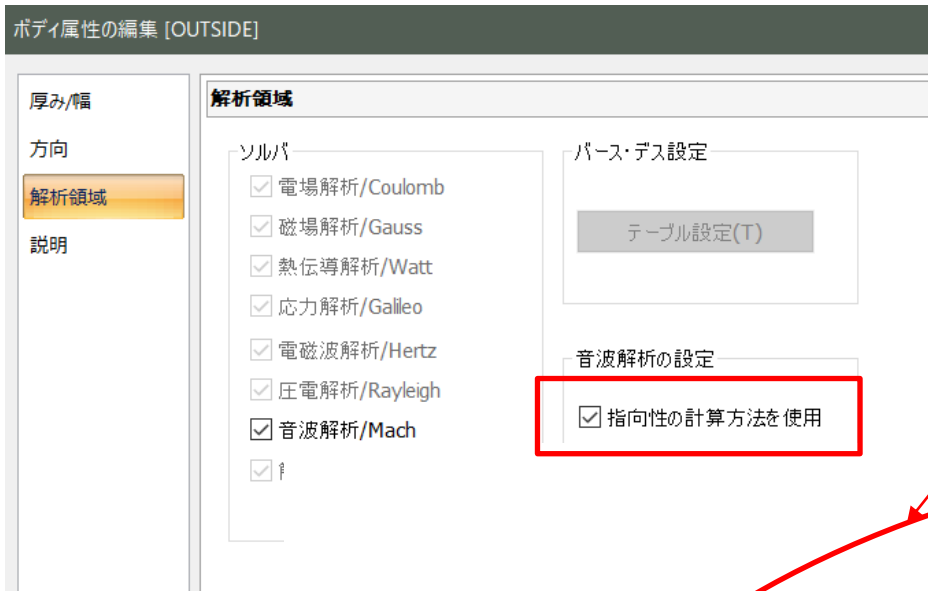
単位 Hz m/s m/s



(4) ボディ属性

解析領域

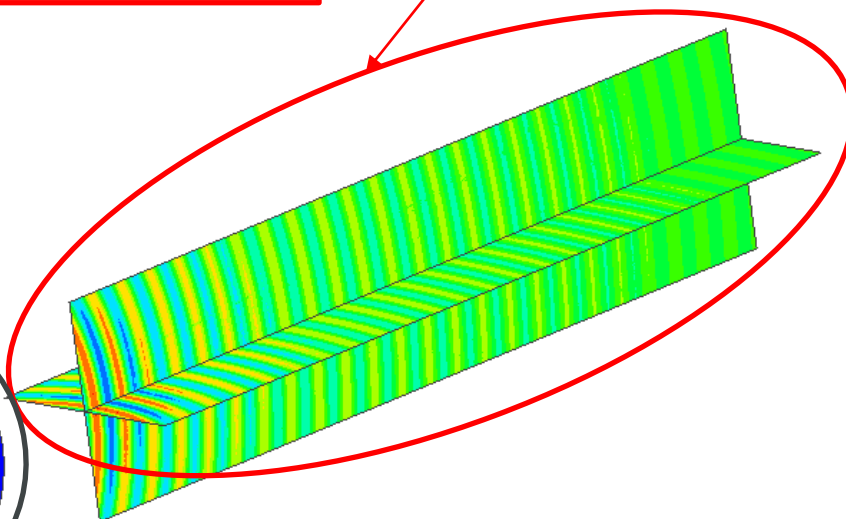
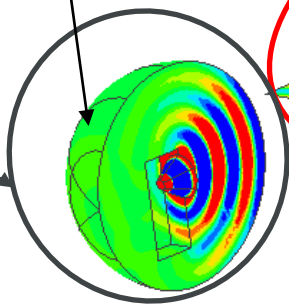
「例題8 指向性の計算方法を使った結果フィールド表示」



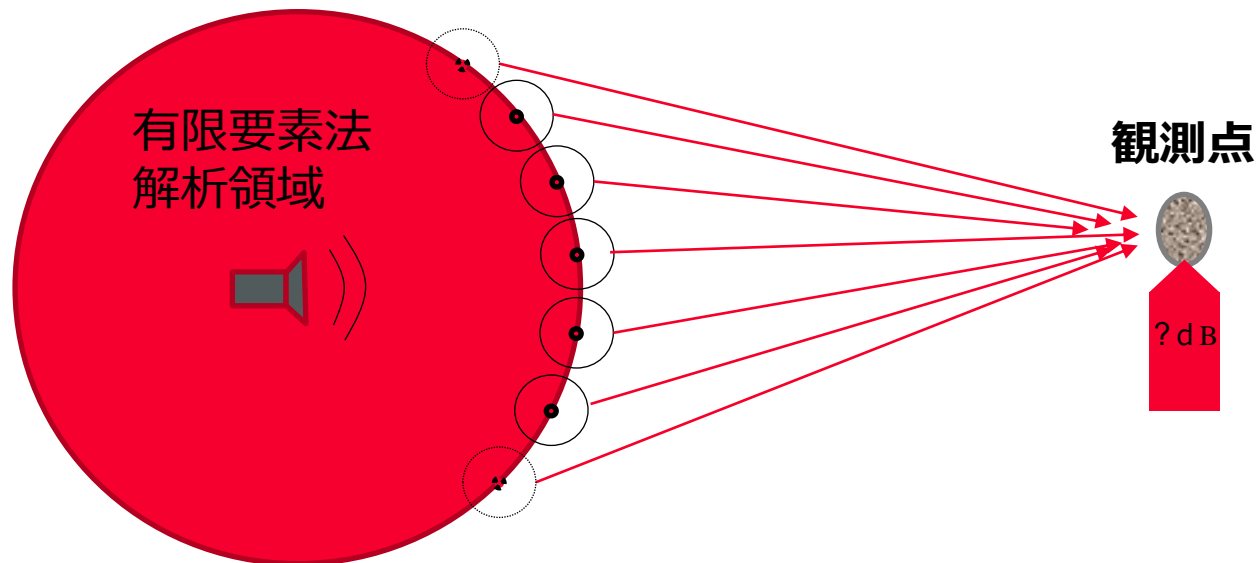
「指向性の計算方法」(*)
を使用して計算した領域

有限要素法
計算領域

球面上に
開放境界条件



ホイヘンスの原理



開放境界

ホイヘンスの原理により、開放境界上の分布から有限要素法解析領域の外の分布を計算

重要：指向性の観測点は解析領域の外に設定してください。



(5) 結果表示_フィールド

- 音圧[Pa]
- 音圧レベル[dB]
- 粒子速度[m/sec]
- 音響インテンシティ（平均）[W/m²]
- 音響インテンシティ[W/m²]
- A特性音圧レベル[dB]

【参考】

音圧レベル=20 log₁₀(P / P₀)

P : 音圧(実効値)

P₀ : 基準音圧 20[μPa]

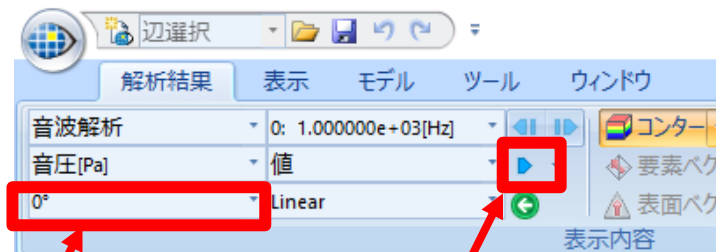
$$I(\mathbf{r}, t) = p(\mathbf{r}, t)\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$$

I(\mathbf{r}, t) : 音響インテンシティ

p(\mathbf{r}, t) : 音圧

$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$: 粒子速度

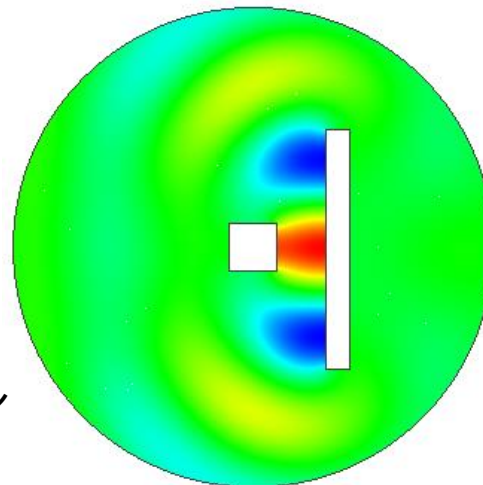
結果フィールド表示のメニュー



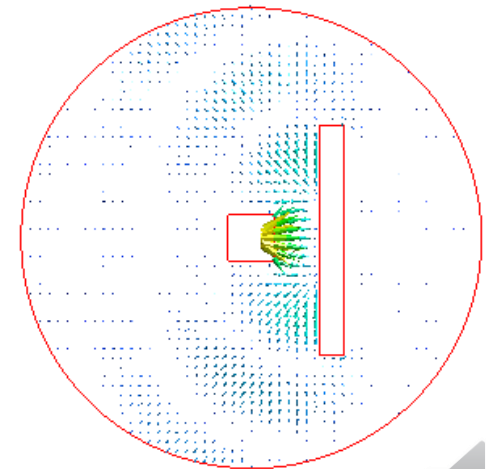
位相

アニメーション

音圧



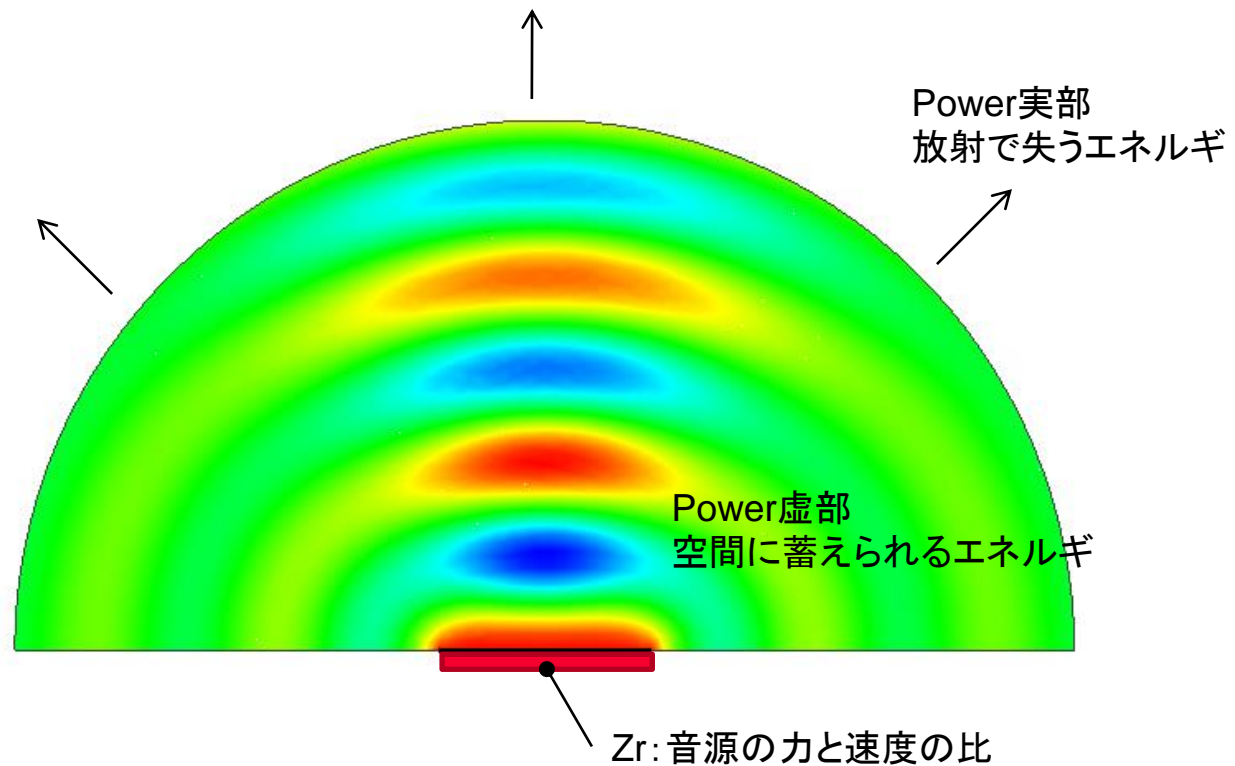
粒子速度

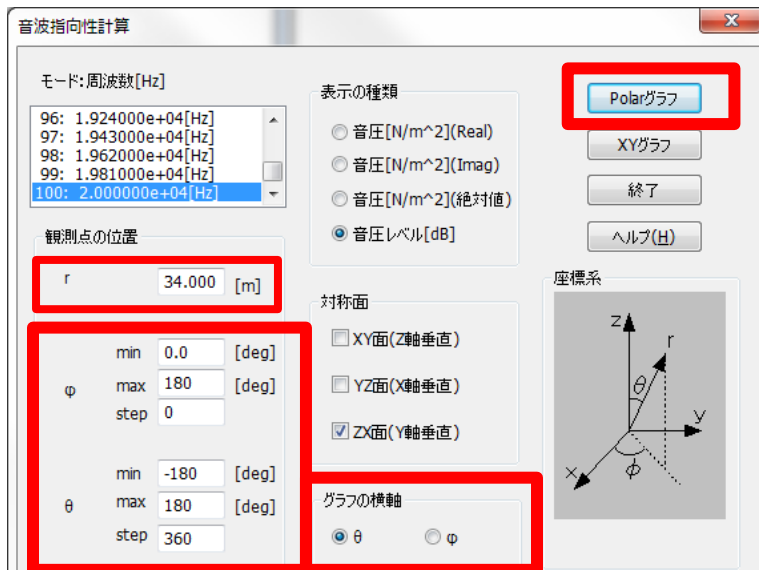


放射エネルギー: Power[W]
放射インピーダンス: Zr[Ns/m]

出力例

Power [W] = 2.60245624e-005 7.47853134e-005j
Zr [Ns/m] = 4.33208345e+000 1.24488632e+001j



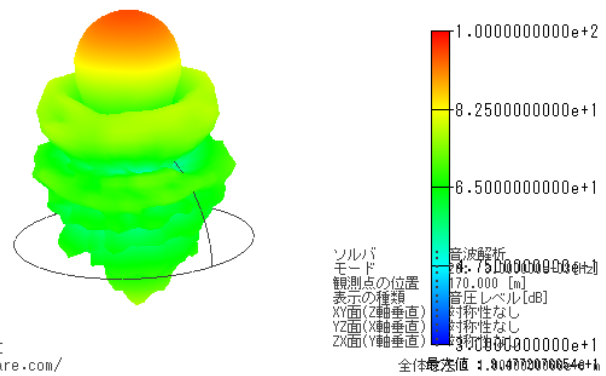


- [XY面]指向性
 - Φ : min 0/max 360/step 100
 - θ : min 0/max 0/step 0
 - グラフの横軸: Φ
- [XZ面]指向性
 - Φ : min 0/max 0/step 0
 - Θ : min -180/max 180/step 100
 - グラフの横軸: θ
- [YZ面]指向性
 - Φ : min 90/max 90/step 0
 - Θ : min -180/max 180/step 100
 - グラフの横軸: θ

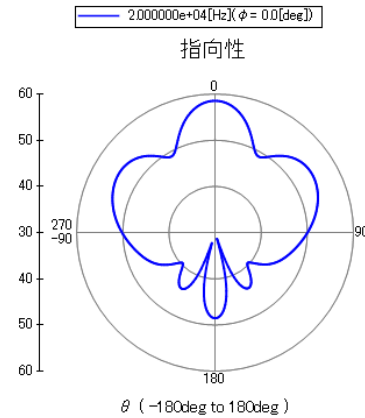
ホイヘンスの原理を使用して
有限要素法の計算領域外の音圧を計算

[XZ面]指向性の例

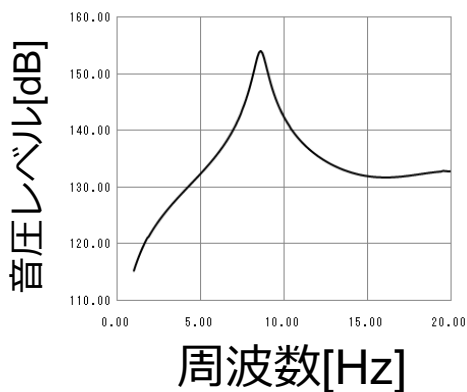
指向性 (3D表示)



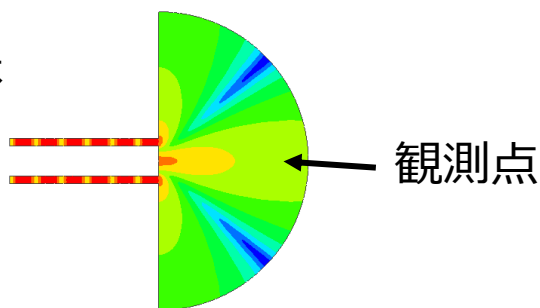
Powered by Femtet
<https://www.muratsoftware.com/>



【目標】
音圧レベル[dB]
の周波数特性
グラフ



①音圧レベルの
コンター図を表示



Powered by Femtet
<https://www.muratasoftware.com/>

②[解析結果] タブ
結果表示
グラフ表示



③グラフ設定ダイアログ

グラフ設定

種類

始点・終点間で距離が横軸のグラフ

A **モード(周波数、時刻、ステップなど)が横軸のグラフ**

横軸が位相のグラフ

評価場所

直線上

辺上

円弧上

座標設定

モデルから入力

モデル上で点まが辺を選択します

B

始点座標	終点座標
X: 0	X: 0
Y: 0	Y: 500
Z: 0	Z: 0

複数座標 始点・終点入替

分割設定

自動(要素境界点)

分割数: 100

間隔: 0.15

C **モード範囲**

開始: 0: 2.000000e+02[Hz]

終了: 20: 3.000000e+03[Hz]

複数モード

D

グラフデータの
ファイル出力

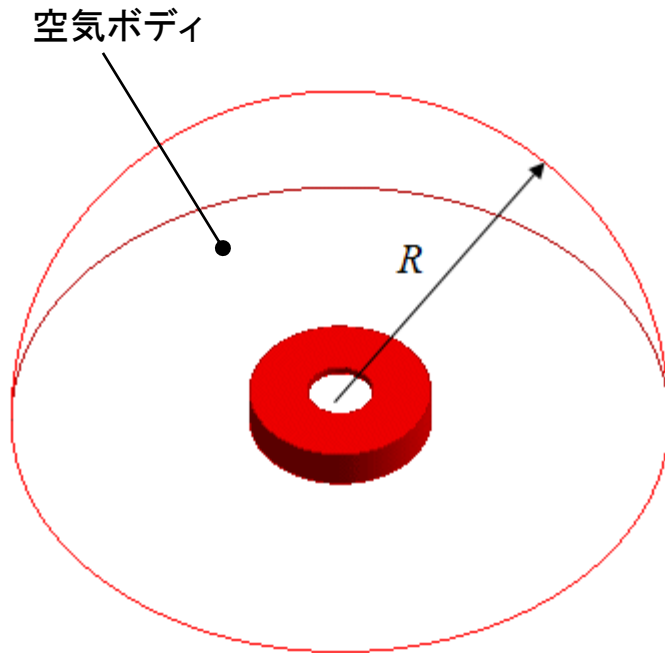
閉じる(C)

ヘルプ



- (1) 解析領域
- (2) メッシュサイズ
- (3) 複数の音源の取り扱い
- (4) 周波数依存の音速





音源の周りに空気領域を作成

音源を中心に半径Rの空気ボディを作成

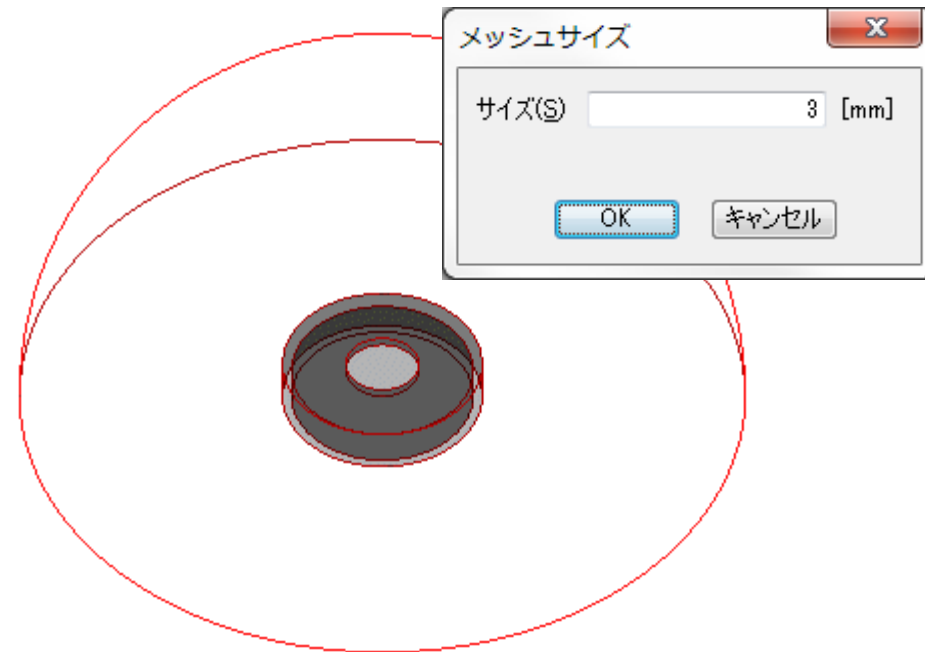
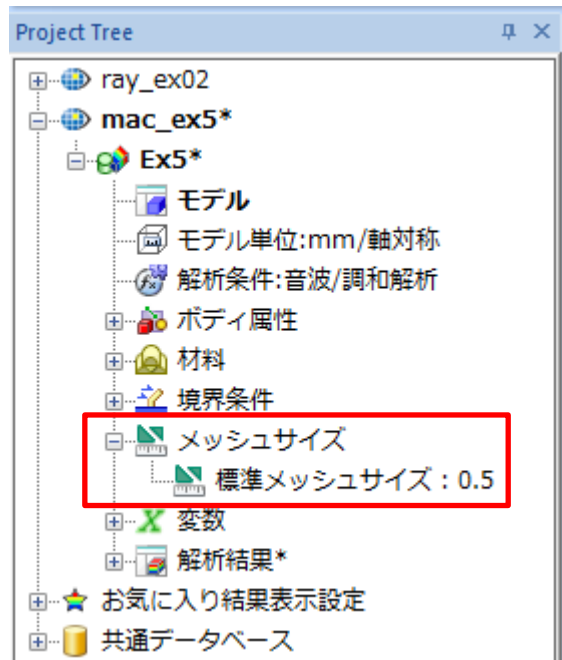
Rは注目する周波数の0.2波長設定。
短いと次の警告が表示される

**** Warning **** 波源と開放境界の距離が近すぎます。
距離を0.2波長以上離してください



(2) メッシュサイズ

メッシュサイズは波長を4~6等分を目安にする。音源近辺の複雑な形状に対してはさらに細かいメッシュにする。



超音波の解析

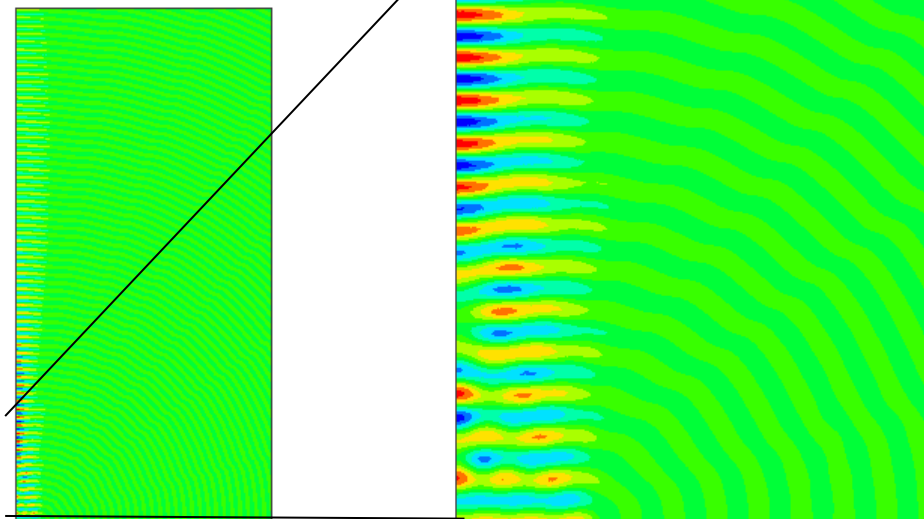
- 波長当たり6等分のメッシュを用意しようとする解析領域が広い場合はメッシュ数が増えすぎて解析規模が大きくなりすぎる。⇒ 1/4 モデルや軸対称モデルを活用する。

(解析例)

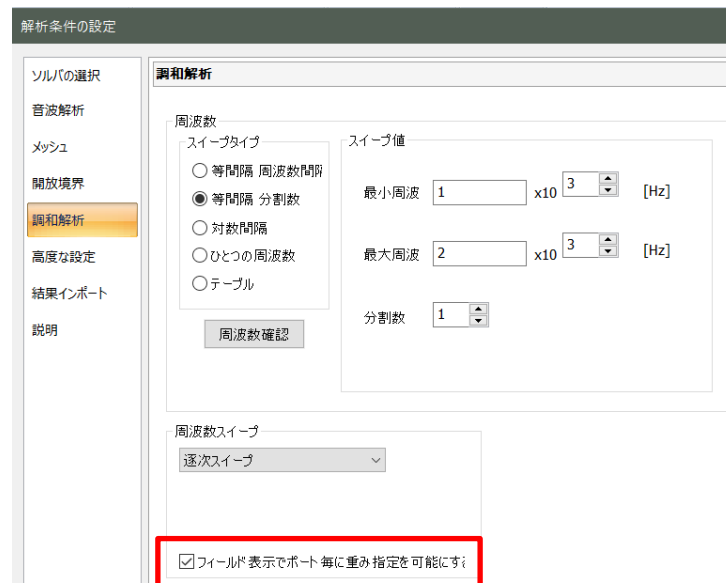
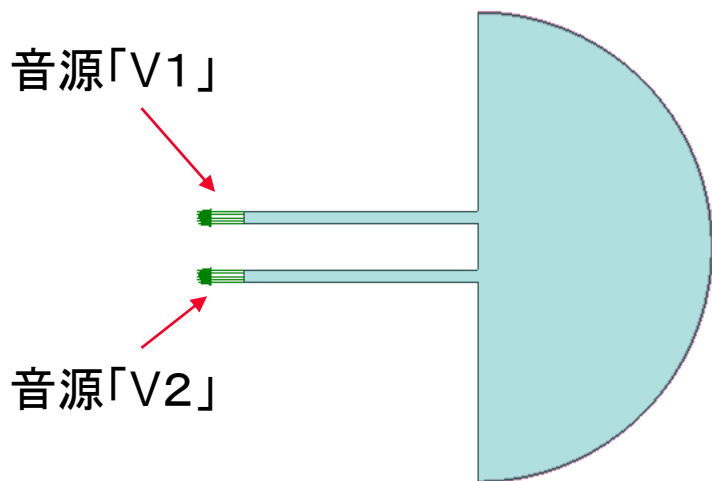
- 軸対称モデル (1MHz)
- 超音波は強い直進性があるのが分かる



波源



(3) 複数の音源がある場合

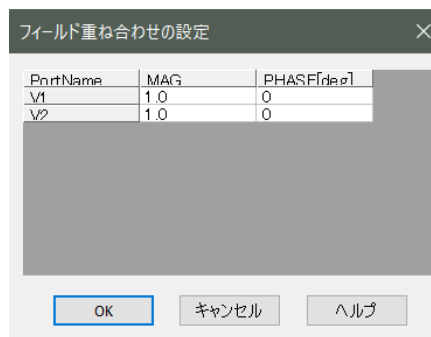
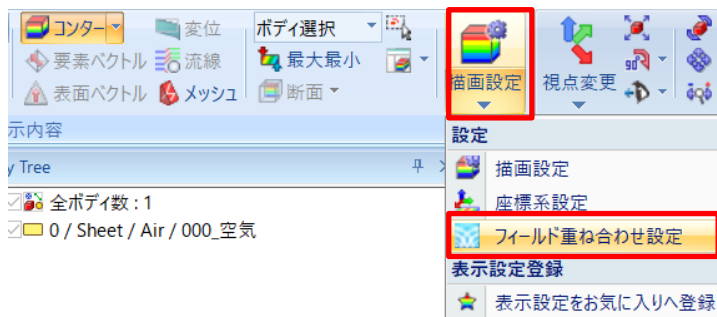


「フィールド表示でポート毎に重み指定を可能にする」にチェック

「音波解析例題3」を使用



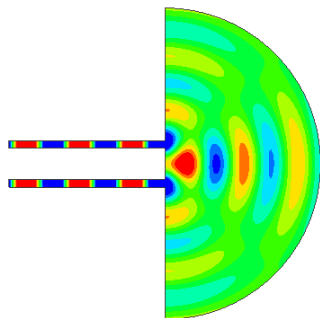
(3) 複数の音源がある場合



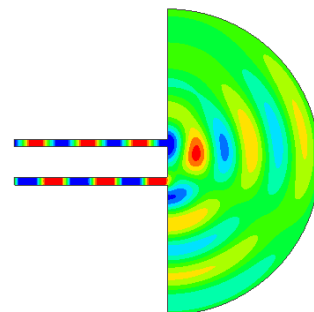
計算結果の境界条件
毎に「倍率」、「位相」
をずらすことができる。

位相差0

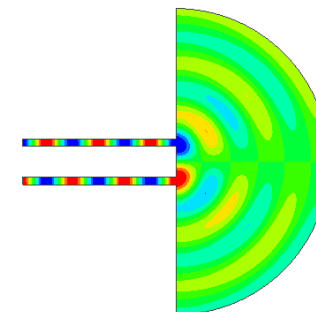
音圧



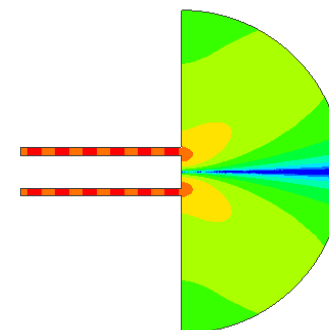
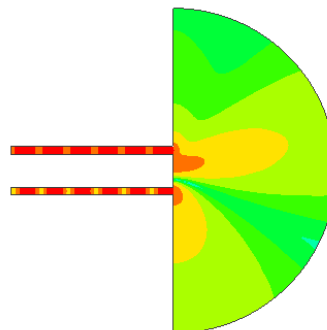
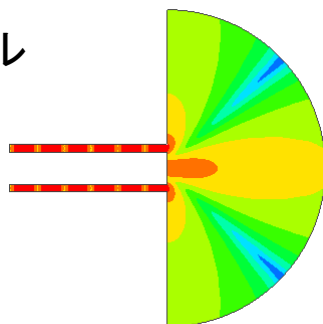
位相差90



位相差180



音圧レベル



☆圧電解析

1. 事例
2. 機能
3. ポイント

☆音波解析

4. 事例
5. 機能
6. ポイント

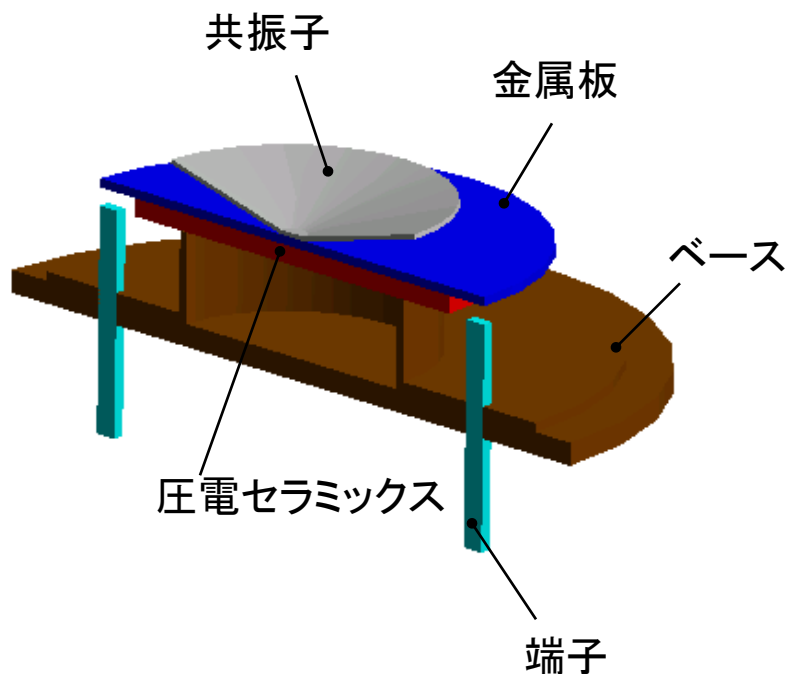
☆圧電・音波連成解析

7. 事例
8. ポイント

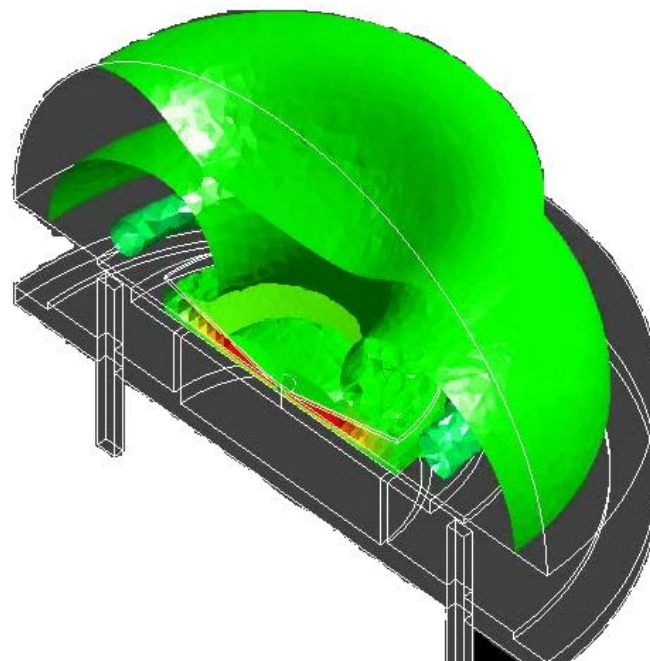


超音波センサー

圧電解析



音波解析



8. 圧電・音波解析のポイント

解析条件



「圧電解析」「音波解析」の2つを選択



デフォルトは「強連成」チェックなし。



8. 圧電・音波解析のポイント

ボディ属性



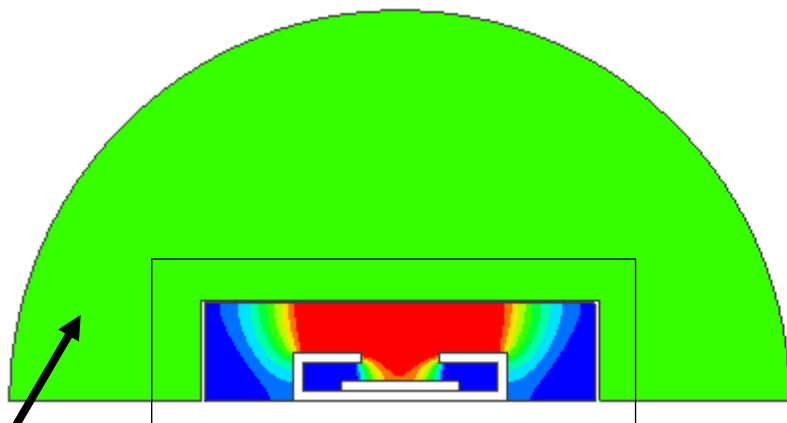
固体は「圧電解析/Rayleigh」をチェック
媒質は「音波解析/Mach」をチェック
両方にチェックが入ることはない



圧電音波弱連成解析

(圧電→音波 一方向連成解析)

音波が構造体を震わせる効果は計算できない。
遮蔽板の外の音波は計算できない。



空気 (音波解析領域)

ケース

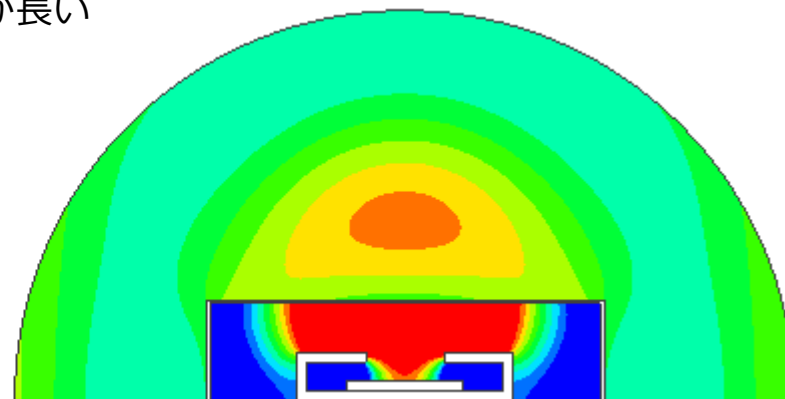
キャビティ

圧電体

圧電音波強連成解析

(圧電↔音波 双方向連成解析)

音波が構造体を震わせる効果も計算できる。遮蔽板の外の音波も計算できる。ただし計算時間が長い



(*)強連成:圧電体の振動に、音波領域の振動を考慮す



これで「圧電音波入門セミナー」の講義は終了です。

お疲れさまでした。

