

## Application Note

## レンズ カバー システムのシミュレーション ガイド: LCS-FL-RNG15



## 概要

本書では、LCS-FL-RNG15 と呼ばれるリング ピエゾベースのフラット レンズ カバー システム (LCS) のプロトタイプのシミュレーション ガイドラインと結果を示します。LCS は、ULC1001 電気システムと組み合わせて、超音波レンズ クリーニング (ULC) システムを構成します。

## 目次

1 略称.....	1
2 はじめに.....	1
3 シミュレーション環境.....	3
4 レンズのシミュレーション.....	5
5 ピエゾトランスデューサのシミュレーション.....	7
6 レンズ カバー システム (LCS) のシミュレーション.....	11
6.1 物理および境界条件.....	11
6.1.1 接着剤.....	11
6.1.2 薄膜フィルム.....	12
6.1.3 ハウジング.....	12
6.2 結果.....	14
7 リソース.....	16

## 商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 1 略称

- LCS — レンズ カバー システム
- ULC — 超音波レンズ クリーニング
- PZT — チタン酸ジルコン酸鉛
- FEA — 有限要素解析

## 2 はじめに

超音波レンズ クリーニング (ULC) システムは、車載用、セキュリティ、産業用カメラ システムのカバー レンズから、水、氷、その他の汚染物質を自動的に検出してクリーニングする電気機械設計です。この技術の機械的な部分は、レンズ カバー システム (LCS) と呼ばれています。図 2-1 は、ハウジング キャップ、フレキシブル シール、薄膜、レンズ、グルー、リング トランスデューサ、およびハウジング ベースで構成されるリング ピエゾ ベース LCS の部品を示しています。レンズ カバー は、レンズに接着したトランスデューサと薄膜で構成されています。レンズ カバーはハウジング (キャップ + シール + ベース) 内に取り付けられ、LCS を作成します。図 2-2 に、LCS の断面図を示します。

LCS-FL-RNG15 のシミュレーションは、さまざまな部品で構成されているため、非常に複雑になる可能性があります。最初に個々の部品をシミュレートしてから、最後にすべてをまとめてシステムをモデル化するほうが管理しやすくなります。

各部品の詳細な図面と寸法については、『[レンズ カバー システムの設計、製造、およびアセンブリ ガイド: LCS-FL-RNG15](#)』を参照してください。

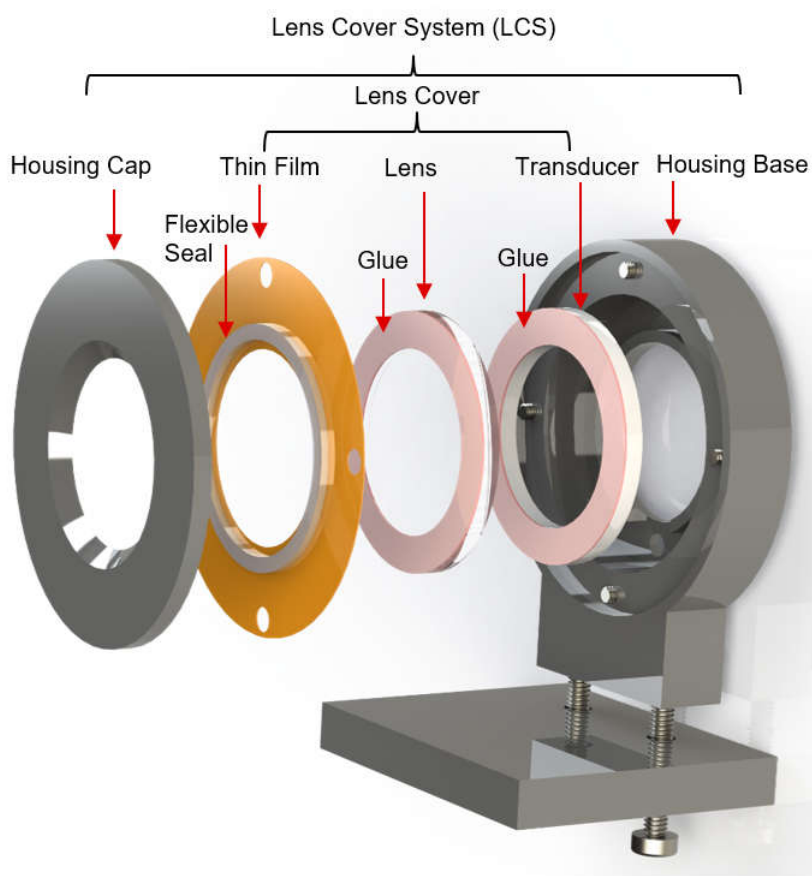


図 2-1. フラット レンズ カバー システム (LCS) の図

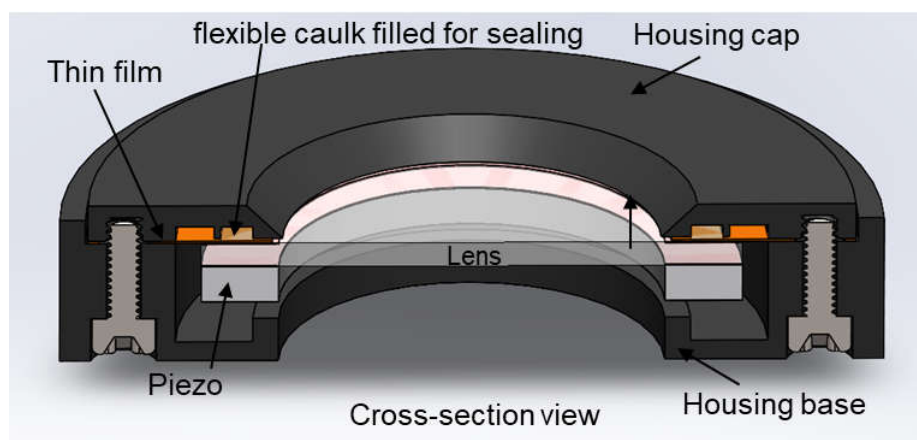


図 2-2. LCS の断面図

### 3 シミュレーション環境

TI では、シミュレーション プロセス用に COMSOL Multiphysics 6.0 を利用していますが、それに似た Ansys などのツールも実用的に使えます。さらに、TI では COMSOL Livelink for MATLAB を導入し、スイープと最適化の実施に MATLAB スクリプトを活用しています。

LCS のシミュレーションを実行するには、次のモジュールが必要です。

- COMSOL Multiphysics
- MEMS モジュール
- 音響モジュール

#### 2D 軸対称シミュレーション

COMSOL Multiphysics における 2D 軸対称シミュレーションでは、半径方向 ( $r$ ) と垂直方向 ( $z$ ) を利用することで、回転対称を持つ形状のモデリングが可能です。このアプローチでは、形状の断面をモデリングするだけで済むため、3D シミュレーションに比べて計算時間とリソースが大幅に削減されます。

LCS が軸対称性を持つことを考慮し、2D 軸対称シミュレーションを利用して計算リソースを最適化できます。LIDAR アプリケーション用の長方形レンズ システムをシミュレーションするには、軸対称ではない性質のため、3D シミュレーションを使用する必要があります。図 3-1 に、可能なすべての空間次元を示します。2D 軸対称は、各構成要素と最終 LCS に対して選択されます。

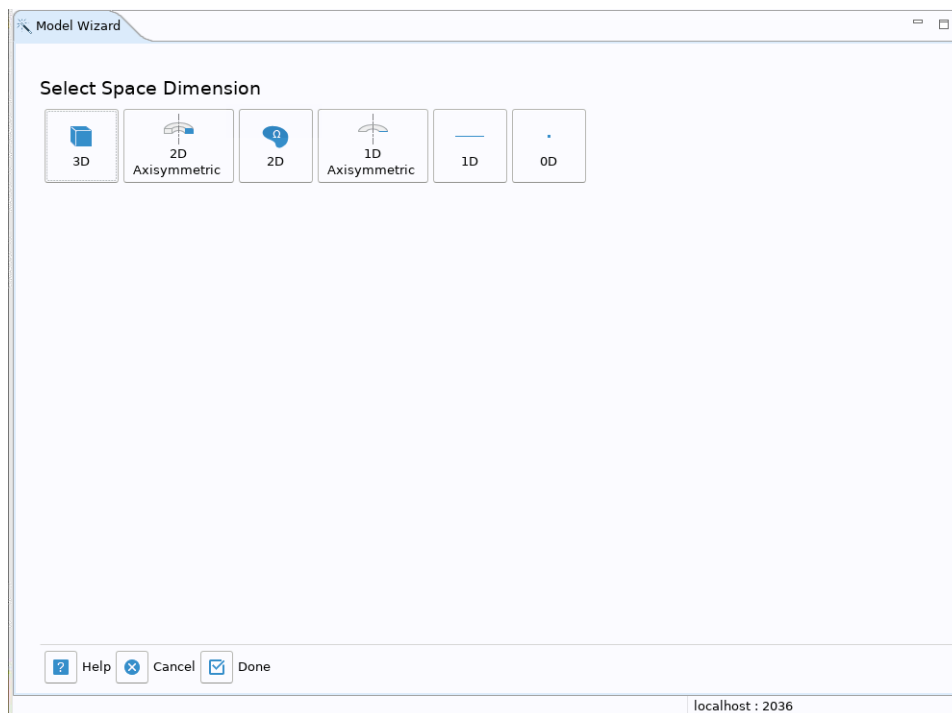


図 3-1. COMSOL におけるすべての空間次元

シミュレーション用に選択できる物理モデルを図 3-2 に示します。固体力学モデルは、レンズ、ピエゾ、レンズ カバーなどのすべての部品に必要です。ピエゾ材料を含む場合は、圧電モデルが必要になります。LC フィルタをシミュレートする際、電気回路はオプションです。

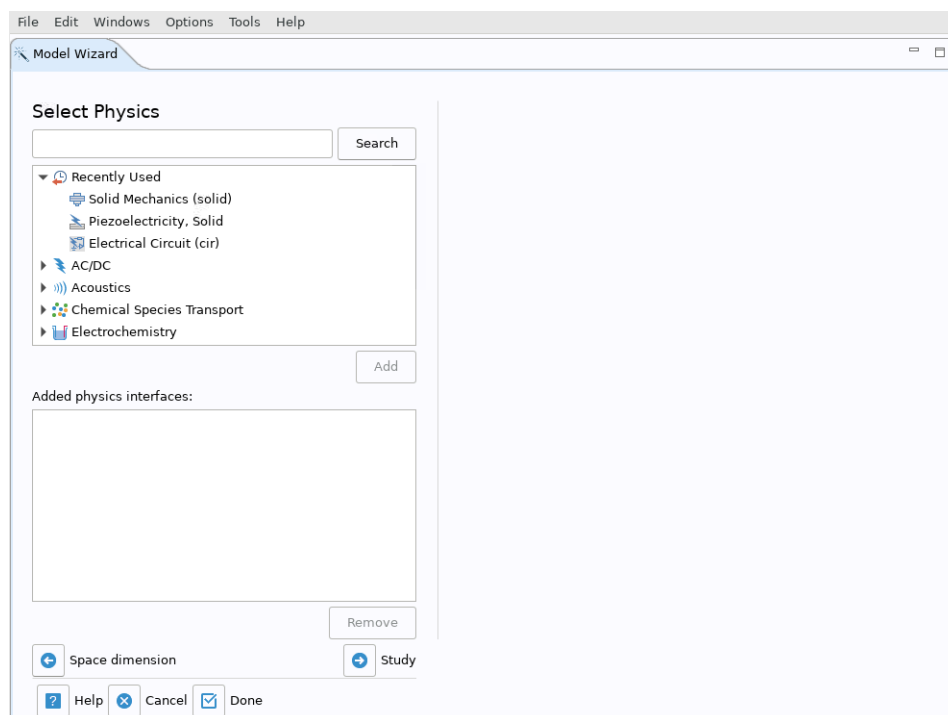


図 3-2. 物理モデルの選択

## 4 レンズのシミュレーション

表 4-1 にレンズの寸法を示します。

表 4-1. レンズの寸法

パラメータ	単位	値
直径	mm	21
厚さ	mm	1

TI では、LCS-FL-RNG15 のレンズの材料に CDGM HK9LGT® を使用しています。材料特性を 表 4-2 に示します。

表 4-2. レンズの機械的特性

パラメータ	単位	値
ヤング率	GPa	79.2
密度	kg/m <sup>3</sup>	2520
ポアソン比	1	0.211

図 4-1 に、2D 軸対称ビューでのレンズ ジオメトリを示します。

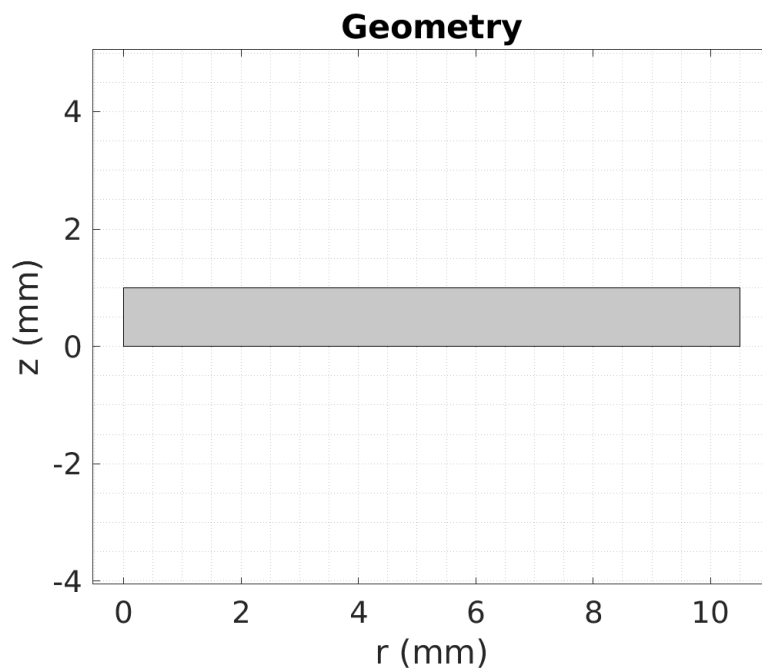


図 4-1. レンズ ジオメトリ

レンズをシミュレートするには、境界条件を **Free** に設定します。固有振動数は固有振動数解析を実行することによって得られます。その結果を 表 4-3 に示します。

表 4-3. レンズの固有振動数

モード	(0 1)	(0 2)	(0 3)	(0 4)	(0 5)
周波数 (kHz)	20.7	86.7	187.7	312.2	453.9

図 4-2 はレンズのモード形状を示しています。赤は加速度が高い状態を、青は低い状態を示します。この設計では節円やデッドスポットが少ないため、効果的なクリーニングにはモード (0, 1) とモード (0, 2) が使用されます。また、これらのモードでは共振周波数が低いため、臨界加速度が小さくて済みます。

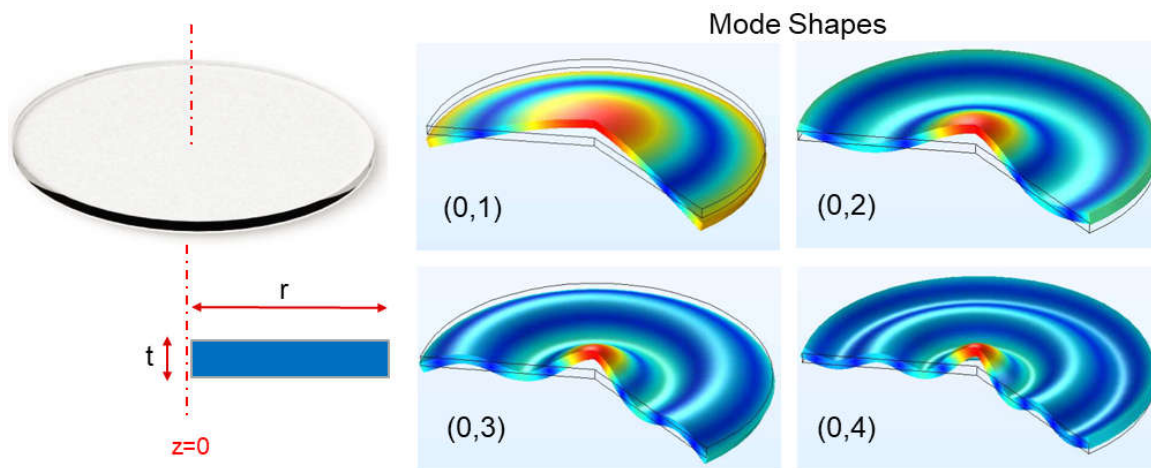


図 4-2. レンズのモード形状

## 5 ピエゾトランスデューサのシミュレーション

LCS で使用されるピエゾの寸法を [表 5-1](#) に示します。

**表 5-1. ピエゾの寸法**

パラメータ	単位	値
内径	mm	15
外径	mm	21
厚さ	mm	1.5

PZT8 は LCS で使用されています。その材料特性を [表 5-2](#) に示します。他の一般的なピエゾ材料とその材料特性も、表に示します。

**表 5-2. シミュレーションにおける PZT8 の材料特性**

記号	説明	単位	Navy Type VI (PZT 5H)	Navy type I (PZT 4)	Navy Type II (PZT 5A)	Navy Type III (PZT 8)
$e_1, r^x$	相対誘電率	1	3244.97	1193.04	1795.99	1219.69
$e_3, r^x$	相対誘電率	1	3984.62	1325.63	1802.77	989.52
$\tan d (3^\circ)$	誘電損失係数	1	0.016	0.003	0.017	0.004
$d_{31}$	圧電電荷定数	C/N	-2.59e-10	-1.28e-10	-1.70e-10	-1.14e-10
$d_{33}$	圧電電荷定数	C/N	6.4e-10	3.28e-10	4.25e-10	2.75e-10
$d_{15}$	圧電電荷定数	C/N	6.16e-10	3.27e-10	5.06e-10	4.03e-10
$Q_{m,t}$	機械的品質係数	1	59	373	74	1088
$\rho$	密度	kg/m3	7780	7700	7700	7700
$s_{11}^e$	適合マトリクス	m <sup>2</sup> /N	1.82e-11	1.30e-11	1.7e-11	1.26e-11
$s_{12}^e$	適合マトリクス	m <sup>2</sup> /N	-7.76e-12	-4.35e-12	-6.6e-12	-3.71e-12
$s_{13}^e$	適合マトリクス	m <sup>2</sup> /N	-6.85e-12	-7.05e-12	-8.61e-12	-6.6e-12
$s_{33}^e$	適合マトリクス	m <sup>2</sup> /N	1.8e-11	1.96e-11	2.32e-11	1.83e-11
$s_{44}^e, s_{55}^e$	適合マトリクス	m <sup>2</sup> /N	3.8e-11	3.32e-11	4.35e-11	3.77e-11
$s_{66}^e$	適合マトリクス	m <sup>2</sup> /N	5.2e-11	3.47e-11	4.71e-11	3.26e-11

トランスデューサはリング形状で、上下方向にボールされています。図 5-1 に、COMSOL のジオメトリ図を示します。

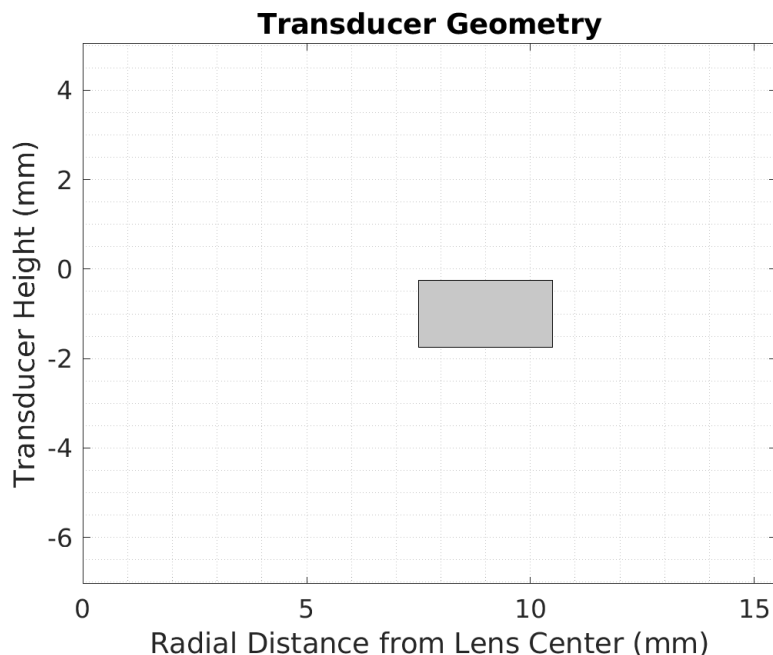


図 5-1. COMSOL におけるトランスデューサのジオメトリ

図 5-2 に座標系の選択を示します。ここでは、材料 XZ 平面座標系が選択されています。

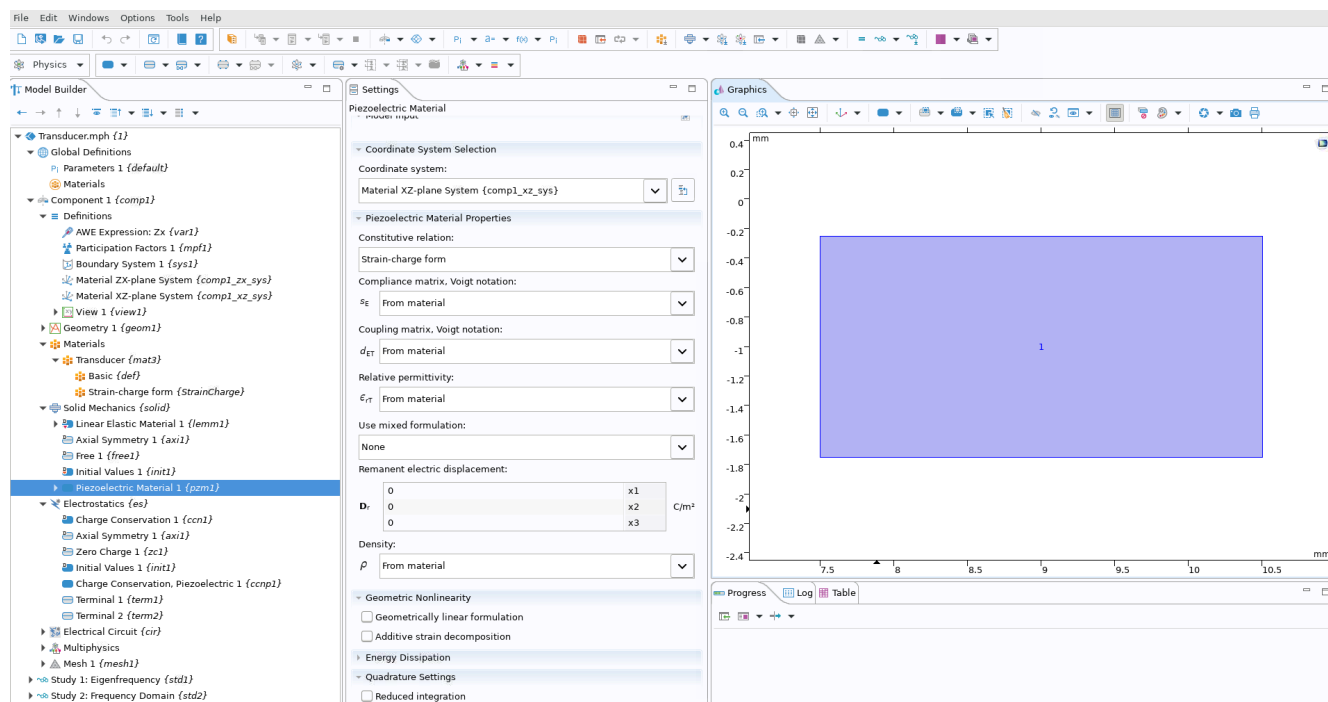


図 5-2. ピエゾ:座標系の選択

機械モデリングにおいては、減衰を適切に設定することが重要です。減衰には、機械的減衰と誘電損失の 2 種類があります。減衰係数は、材料特性に基づいて自動的に計算されます。図 5-3 および 図 5-4 に、COMSOL におけるピエゾの減衰設定を示します。



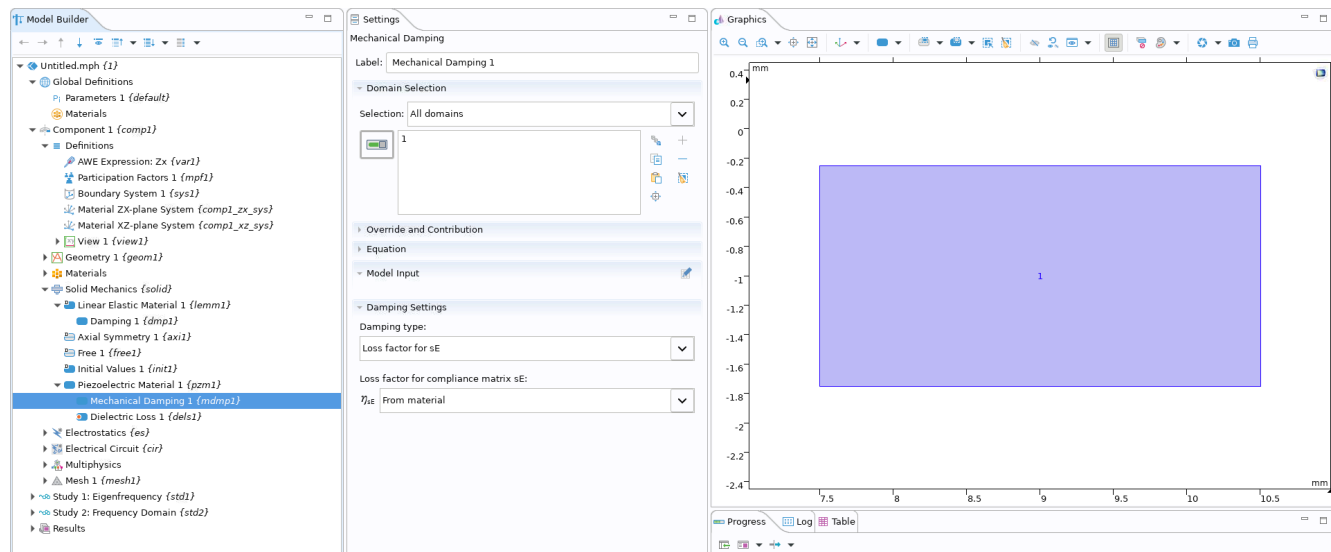


図 5-3. ピエゾ: 機械的減衰

電気誘電率に関連する損失係数は、ピエゾの材料特性に基づいて自動的に計算されます。

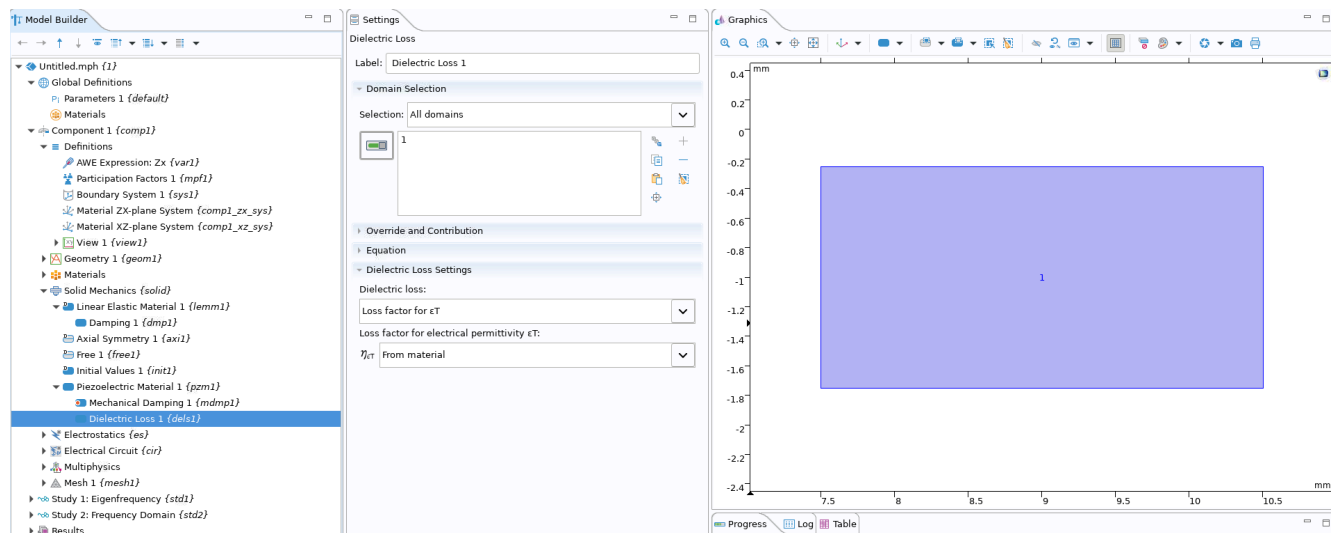


図 5-4. ピエゾ: 誘電損失

ピエゾ電極はピエゾ素子の上面と底面の両方に配置されているため、電極の 2 つの端子として端子 2 と端子 3 が指定されています。図 5-5 に、端子の選択のスクリーンショットを示します。

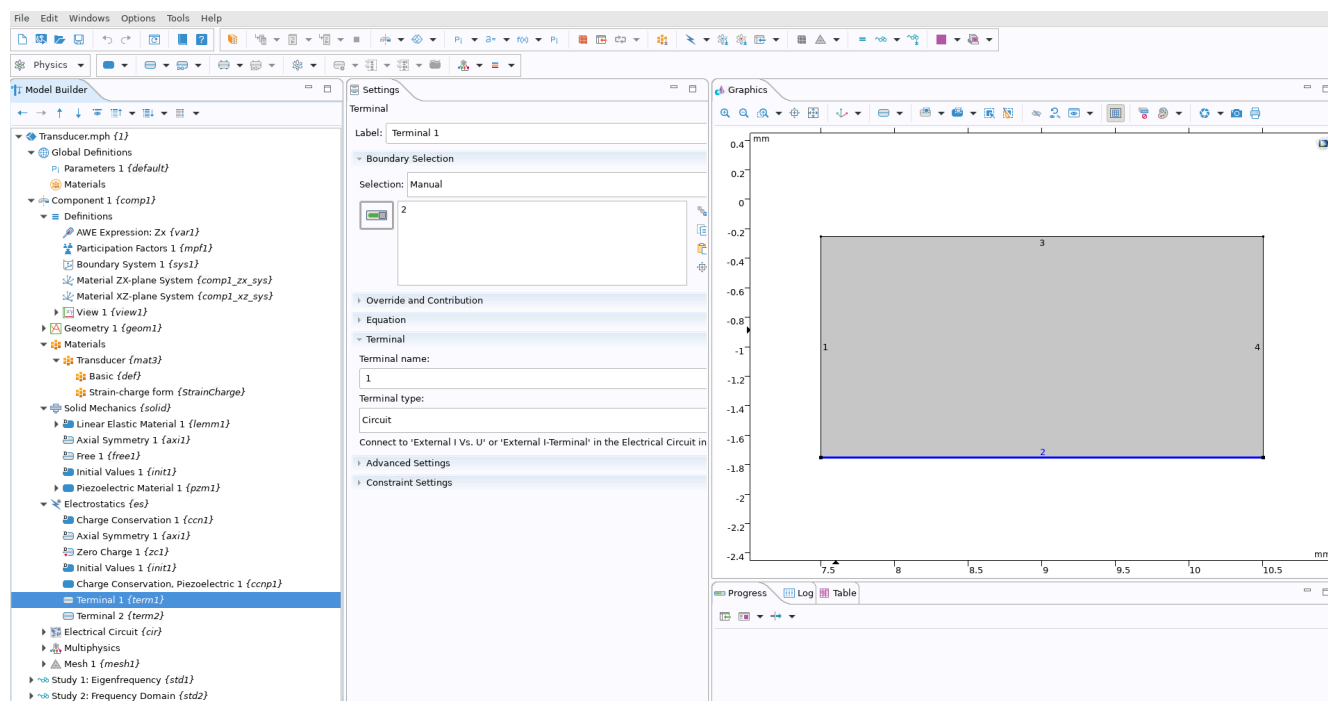


図 5-5. ピエゾ: 端子の選択

周波数ドメイン解析を実施することで、下の 図 5-6 に示すように、20kHz ~ 700kHz の範囲のインピーダンス応答を観測できます。第 1 のモードは 59kHz であり、一定の幅を維持しながらピエゾの内径と外径の両方が一様に変化する放射モードです。それとは対照的に、525kHz での 2 番目のモードは厚みモードです。厚みと幅の両方が変動する特徴を持ちます。

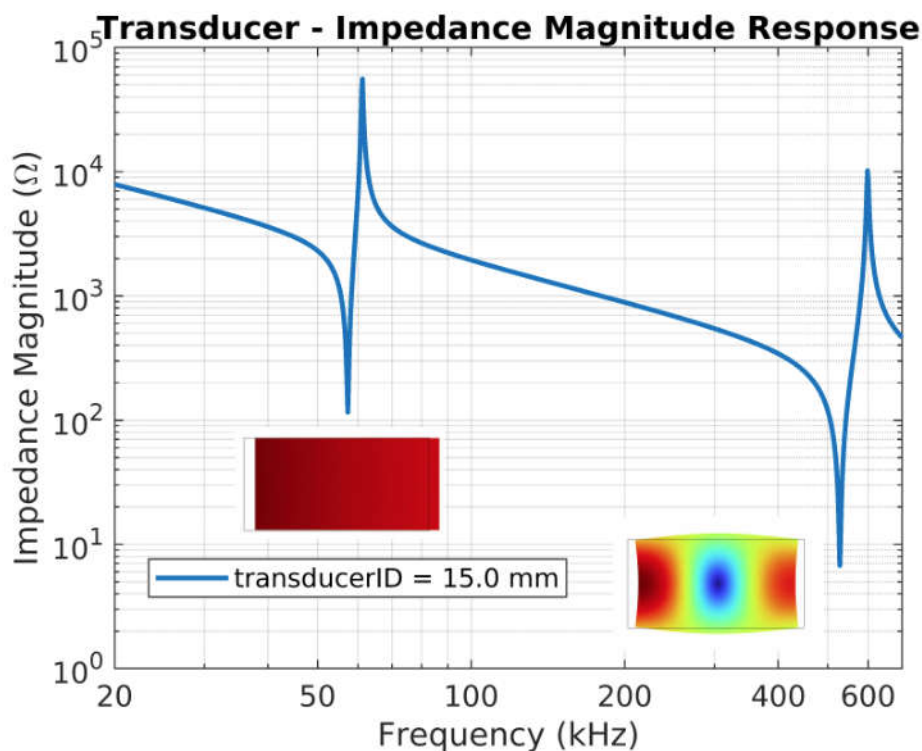


図 5-6. ピエゾトランスデューサのインピーダンス応答

## 6 レンズ カバー システム (LCS) のシミュレーション

図 6-1 に、LCS ジオメトリの概略図を示します。ハウジングは固定ブロックとして簡素化されています。キャップは示されておらず、代わりに減衰係数で表されています。

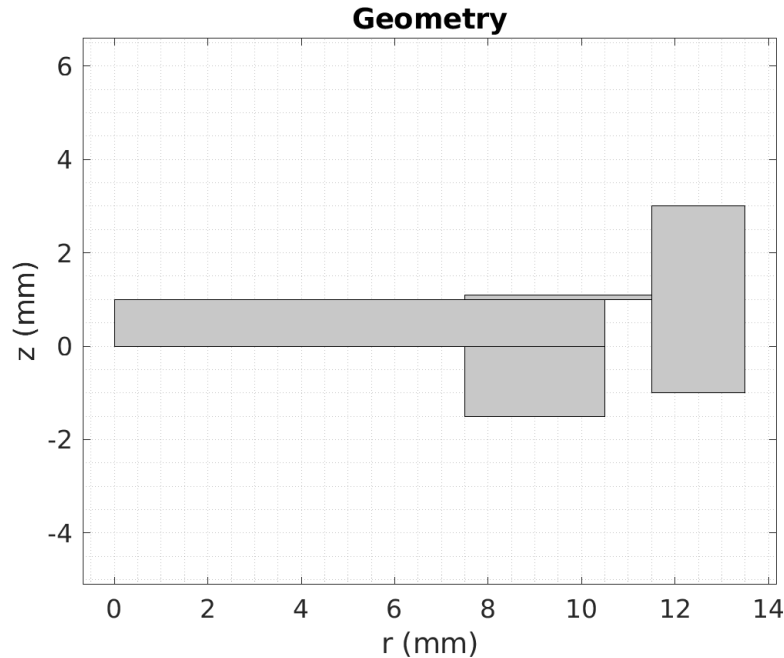


図 6-1. LCS:ジオメトリ

### 6.1 物理および境界条件

#### 6.1.1 接着剤

TI では、LCS-FL-RNG15 の硬質接着剤材料として EPO-TEK 323LP-LH を使用しています。接着剤の材料特性を 表 6-1 に示します。

表 6-1. 接着剤の材料特性

パラメータ	単位	値
ヤング率	GPa	2.67
密度	Kg/m <sup>3</sup>	1190
ポアソン比	1	0.30

接着層は 2 つのインターフェイスに適用されます。1 つはレンズとピエゾの間にあるインターフェイスで、もう 1 つはレンズと薄膜の間にあります。接着剤は、薄い接着剤の特性を正確にシミュレートするために COMSOL が推奨するモデルである薄板弾性層で表されます。このシミュレーションには、0.02 の減衰損失係数が組み込まれています。設定のスクリーンショットを 図 6-2 に示します。

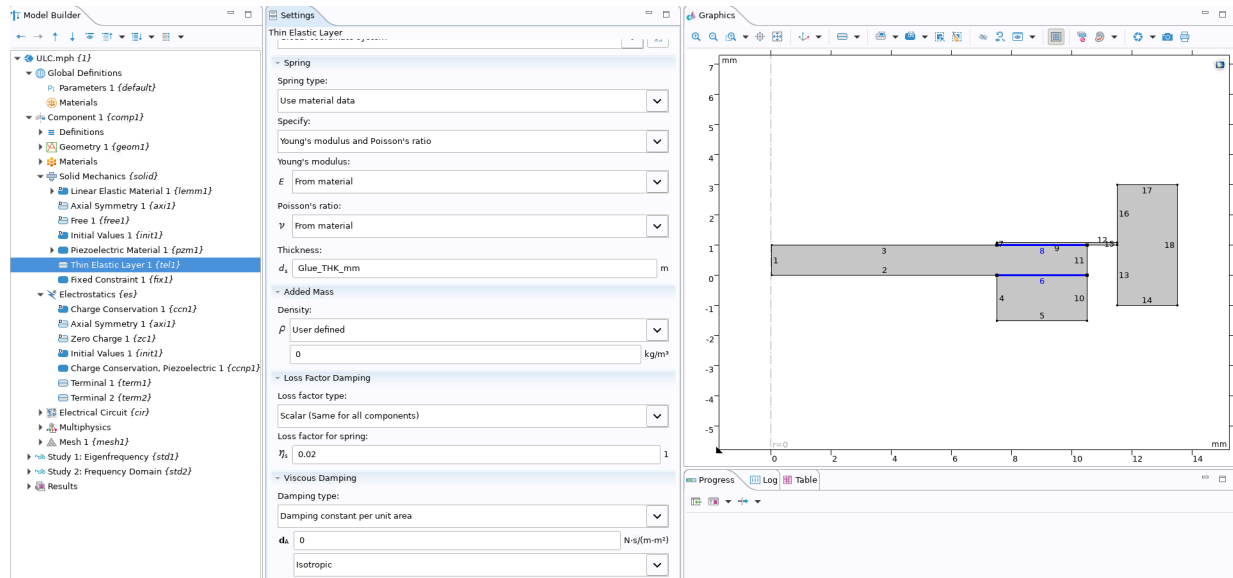


図 6-2. 接着剤用の薄い弾性層

### 6.1.2 薄膜フィルム

TI では、LCS-FL-RNG15 の薄膜にポリアミドを使用しています。薄膜の材料特性を 表 6-2 に示します。

表 6-2. 薄膜の材料特性

パラメータ	単位	値
ヤング率	GPa	2.5
密度	Kg/m <sup>3</sup>	1420
ポアソン比	1	0.34

薄膜はハウジング、レンズと共に等方減衰係数 0.005 の線形弾性材料でモデル化されています。この設定を 図 6-3 に示します。

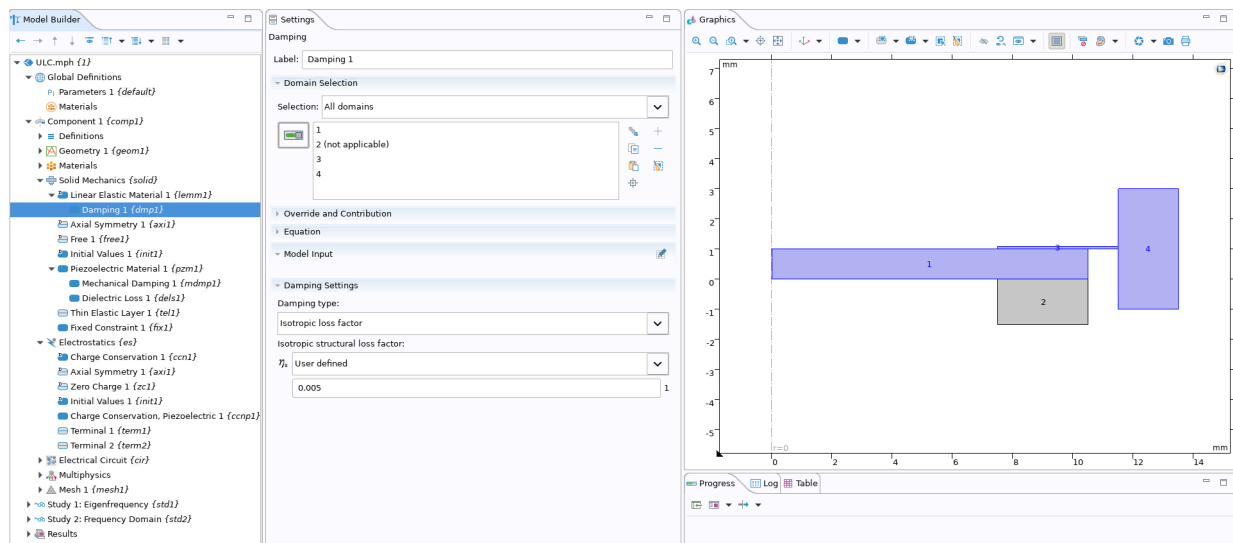


図 6-3. 薄膜の線形弾性モデル

### 6.1.3 ハウジング

TI では、LCS-FL-RNG15 のハウジング材料として Delrin Black を使用しています。材料特性を 図 6-4 に示します。

表 6-3. ハウジングの材料特性

パラメータ	単位	値
ヤング率	GPa	2.0
密度	Kg/m <sup>3</sup>	1420
ポアソン比	1	0.35

このモデルにおけるハウジングは、図 6-4 に示すように、固定境界条件を持つ長方形ブロックでモデル化されています。その他のドメインはすべて **Free** に設定されています。

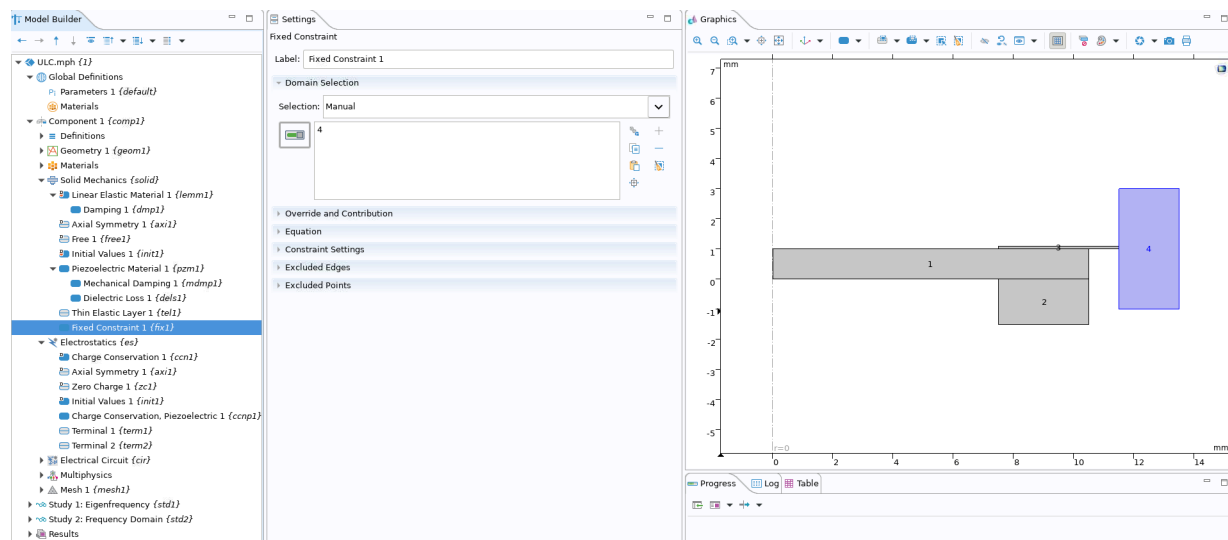


図 6-4. ハウジングの固定境界条件

## 6.2 結果

図 6-5 は、周波数解析を実行したときにおけるレンズ中心の加速度応答と、20kHz から 100kHz までのインピーダンス応答を示しています。この範囲内で、シミュレートされた共振周波数は 29.2kHz と 64.3kHz です。注目すべきは、両方のピークにおける加速度が霧化スレッシュホルドを超えている点です。表 6-4 に、この 2 つのモードの主な特性を示します。

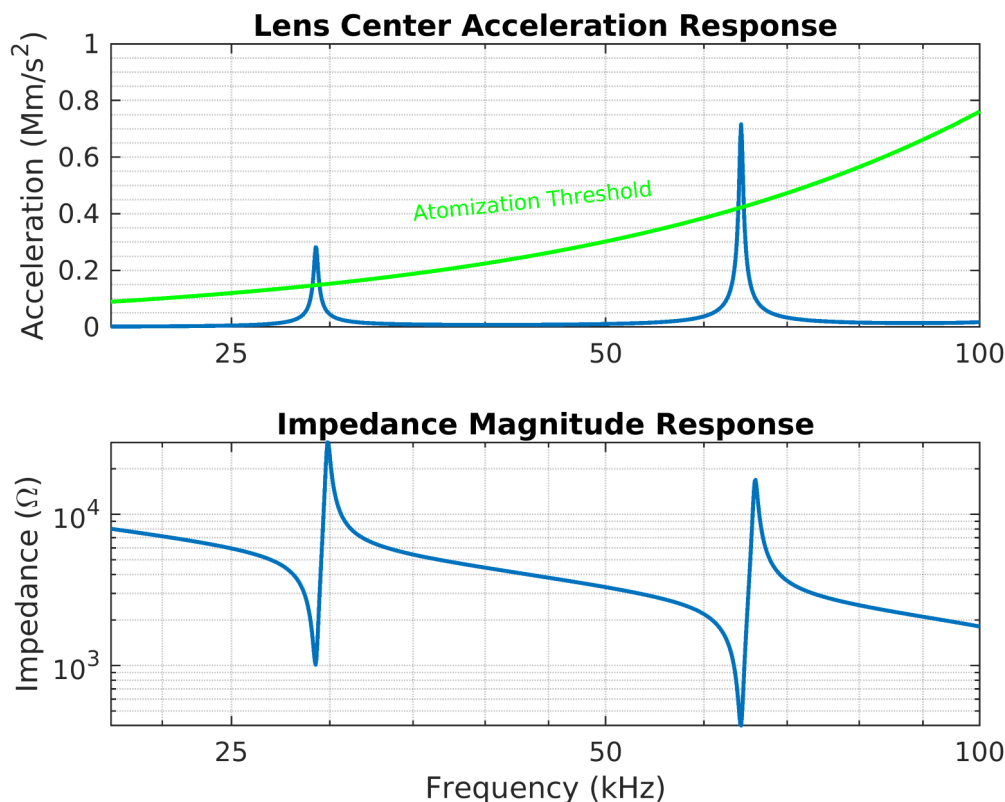


図 6-5. LCS: レンズ中心の加速度とインピーダンス応答

表 6-4. モード (0 1) および (0 2) の主な特性。

モード	共振周波数 (kHz)	インピーダンス ( $\Omega$ )	加速度 ( $10^6\text{m/s}^2$ )
(0 1)	29.2	1018	0.28
(0 2)	64.3	403	0.72

図 6-6 に、2 つの特定のモードにおける LCS のモード形状を示します。モード (0 1) では、中心からエッジに向かって移動して赤から青に遷移すると加速度が減少することがわかります。モード (0 2) では、同様に加速度は中心から中央エリアに向けて減少してから、中央エリアからエッジに向かって再び増加します。

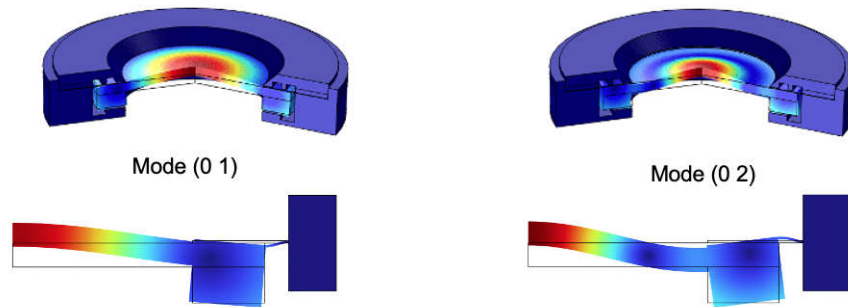


図 6-6. LCS:モード (0 1) およびモード (0 2) でのモード形状

図 6-7 に、LCS のレンズ表面加速度を示します。中心からエッジまでの変化が強調されています。中央部のみが霧化スレシヨルドを超えているため、効果的に水を排出することができますが、エッジ部にはこの機能がないことに注意してください。

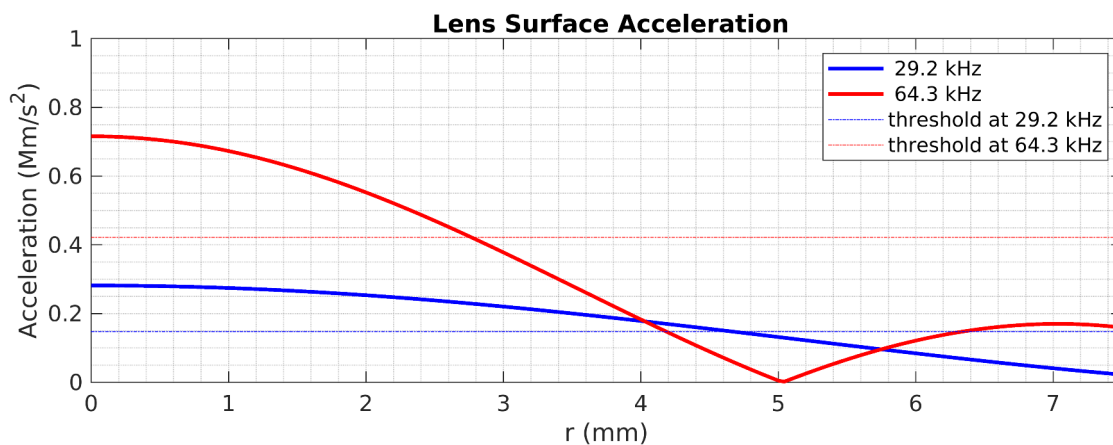


図 6-7. LCS:レンズ表面の加速度

## 7 リソース

1. テキサス インスツルメンツ、[「超音波レンズ クリーニング技術の概要」](#)
2. テキサス インスツルメンツ、[「超音波レンズ クリーニング: 必要性が認識されていなかった半導体技術」](#)
3. テキサス インスツルメンツ、[『レンズ カバー システムの設計、製造、およびアセンブリ ガイド:LCS-FL-RNG15』](#)。



## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含みいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、TI は一切の責任を拒否します。

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](https://www.ti.com) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月