

He ベッセルを含んだ超伝導空洞の振動解析

山本昌志*

2007 年 8 月 29 日

概 要

ILC の ichro 空洞の機械振動のモード解析を ANSYS を使って行った．空洞のみならず，その He ベッセルを含んだモデルで，40 個のモードの計算を行った．

1 はじめに

ILC の超伝導空洞の開発では Lorentz detuning の対策が重要な課題の一つである．超伝導空洞内に RF が入射されると，マクスウェルの応力により空洞が変形し，共振周波数が変化してしまう．もし，CW 運転であればチューナーにより共振周波数の制御は容易である．変形が時間的に一定なので，応答の遅いチューナーで周波数の補償ができる．しかし，ILC ではパルス運転が予定されており，空洞の変形の制御は格段に難しくなる．パルス運転だと，RF が入射される都度，空洞内に応力がかかる．それが引き金となって，空洞が機械振動することになる．

パルス運転を行う ILC の超伝導空洞では機械振動による周波数の変化を補償する必要がある．ILC では，Lorentz detuning の周波数変化をキャンセルさせるように，空洞をピエゾにより機械振動させることを考えている．すなわち，ピエゾ駆動の機械振動が引き起こす RF の共振数端数の変化で，パルス RF による空洞の形状変化が引き起こす RF 共振周波数の変化—Lorentz detuning—をキャンセルするのである．

ピエゾ駆動の機械振動で Lorentz detuning をキャンセルさせるためには，それぞれの周波数変動の振幅が同一で，位相が 180 度異なる必要がある．幸いなことに，実験で確かめられた 173 [Hz] の空洞の機械振動が，ちょうど Lorentz detuning をキャンセルできそうである [1]．

実験では，173 [Hz] と 245 [Hz] の機械振動が大きな RR の共振周波数変化を引き起こすことが分かっている [1]．実験をきちんと解釈するためには，空洞の機械振動のシミュレーションが重要になる．また，いろいろな問題点を議論するためにも，空洞の機械振動のシミュレーションは行わなくてはならない．このような理由で，ANSYS により空洞の機械振動のシミュレーションを行った．

これまで，ILC の超伝導空洞の機械的特性のシミュレーションは KEK の山岡 [2] が中心になって行ってきた．山岡もまた空洞の機械振動を計算を行ってきたが，He ベッセルの無いモデルであった [3]．ここでは，より現実に近い He ベッセルを含んだシミュレーションを行った．

*国立秋田工業高等専門学校 電気情報工学科

2 計算方法

2.1 計算モデル

図1が汎用有限要素法プログラム ANSYS により、振動解析を行ったモデルである。He ベッセルの外側に取り付けられるチューナーは、計算に考慮していない。問題となる空洞の形状変化を引き起こす共振モードには大きく影響しないと考えたためである。そのほかの部分については、実際の空洞に近い形状にしている。

計算を行う際のメッシュ数を減らすために、図1の Nb の空洞 ($t=2.8\text{mm}$) と He ベッセルの ($t=3\text{mm}$) の部分はシェルモデルとした。この部分は、他に比べ薄いためシェルモデルを採用しても良い近似であろう。

SUS316L の真空フランジと He ベッセルフランジの形状は、実際のモデルと少し形状が異なる。これもまた、メッシュ数を減らすためである。真空フランジの方は、振動モードに影響するのは質量のみで、形状が変わっても問題ない。He ベッセルフランジは、質量と強度—ヤング率と形状からなるバネ定数—が振動に影響する。この部分の形状は大きく変えていないので、質量の変化は小さく問題とならない。一方、材質はすべて SUS316L とした。実際の空洞では一部、銅が使われている。この部分を無視したわけであるが、その体積は小さいので影響は少ないと考えている。

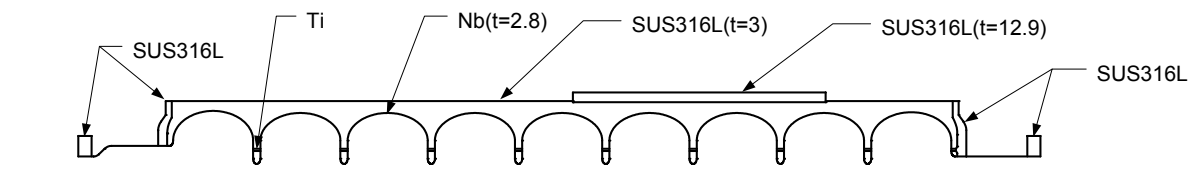


図1: 振動解析を行った超伝導空洞の形状。

図1のモデルを計算するための材料の物性値 (ヤング率とポアソン比、密度) は、表1 [2] の通りである。

表1: 計算モデルの物性値。

	Nb	SUS316L	Ti
ヤング率 [Pa]	1.05×10^{11}	2.1×10^{11}	1.23×10^{11}
ポアソン比	0.38	0.3	0.34
密度 [kg/m^3]	8570	7800	4500

2.2 計算の条件

図1のモデルを固定をしないでシミュレーションを行った。実際の空洞では、どこかが固定されているところが異なる。固定した場合と、そうで無い場合では共振周波数が異なる。しかし、ここでもっとも重要なモードは Nb の薄板の超伝導空洞本体である。ここが振動するモードの振幅が空洞を固定する部分—He ベッセルの外側—で小さければ、大きな誤差にならない。

束縛点が無いと、0 [Hz] 付近に剛体モードと呼ばれるモデル全体が振動するモードが現れる。ここではこれを取り除くために、5 [Hz] 以上のモードを計算することにした。

このモデルを計算するためのメッシュの様子を図2と図3に示す。メッシュの接点数は31611個、要素数は11563個であり、ほぼ私が使っているANSYSのライセンス-要素数、接点数とも32000-の限界である。

メッシュサイズを小さくすれば、誤差は小さくなるが、ライセンスの限界でこれ以上は無理である。ここでのメッシュサイズが起因する共振周波数の誤差は、2 [%] 程度と考えている。表の計算結果を見ると縮退モードの共振周波数差がその2 [%] 程度であることから、そのように判断した。

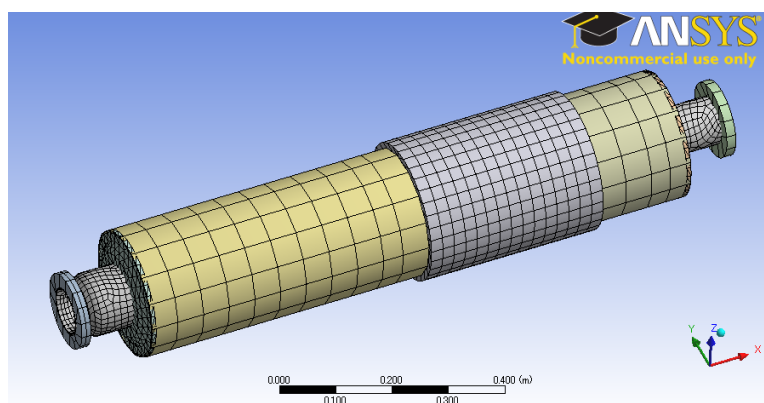


図 2: 解析を行ったときの He ベッセル部分のメッシュの様子。

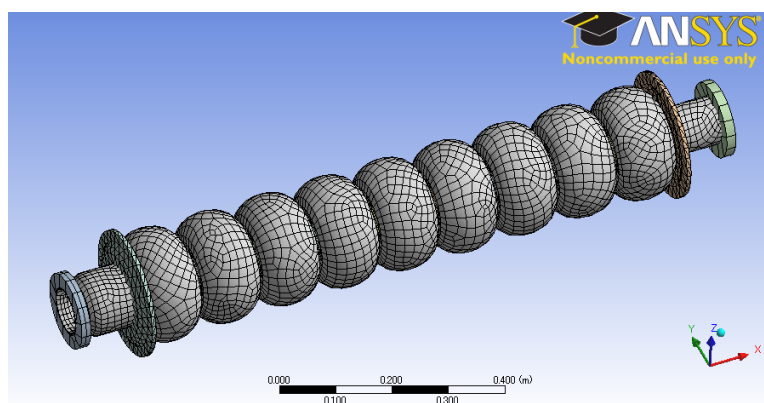


図 3: 解析を行ったとき Nb 空洞のメッシュの様子。

3 計算結果

表 2 に計算された 40 個の機械振動のモードを示す．また，変形の様子を付録 A 示す．さらに，振動のアニメーションを

<http://www.akita-nct.jp/yamamoto/study/collaboration/KEK/vib1/index.php>

に示す．

表 2: ANSYS により計算された超伝導空洞の機械的な共振モード

No.	周波数 [Hz]	Nb 空洞	He ベッセル	フランジ	縮退	備考
1	12.9					ゴースト?
2	73.8	横			No.3	
3	74.8	横			No.2	
4	177.8	横			No.5	
5	180.2	横			No.4	
6	241.4	たて				
7	303.1	横			No.8	
8	305.7	横			No.7	
9	401.9	たて				
10	425.9	横			No.11	
11	431.0	横			No.10	
12	537.9		径		No.13	
13	544.5		径		No.12	
14	549.3	横			No.15	
15	558.5	横			No.14	
16	577.8	横	横		No.17	
17	580.0	横	横		No.16	
18	605.1	径				
19	617.9	たて				
20	687.9	横			No.21	
21	697.6	横			No.20	
22	706.4	たて				
23	743.2		径		No.24	
24	743.8		径		No.23	
25	807.1	横			No.26	
26	822.8	横			No.25	
27	828.3		径		No.28	
28	831.8		径		No.27	
29	871.4	たて				
30	877.6	横			No.31	
31	893.5	横			No.30	
32	927.3	横			No.33	
33	937.3	横			No.32	
34	999.6	径				
35	1002.8	たて				
36	1090.9			横?	No.37	
37	1097.2			横?	No.37	
38	1199.2	たて				
39	1257.0			径	No.40	
40	1258.4			径	No.39	

4 まとめ

ANSYS を用いて，He ベッセルを含んだ超伝導空洞の 40 個の機械振動のモードを計算した．その結果，以下のことが分かった．

- 下の 40 個のモードは，Nb 空洞のモードと He ベッセル，フランジの振動モードに分けることができる．ほとんどのモードは，これらの振動に分離できる．No.16 と No.17—580 [Hz] 付近—が唯一，Nb 空洞と He ベッセルの両方が振動するモードである．
- ピエゾを用いた空洞のチューナーに重要なモードは，Nb 空洞が縦方向に振動する次の 7 個のモードである．

241 [Hz] 401 [Hz] 617 [Hz] 706 [Hz] 871 [Hz] 1002 [Hz] 1199 [Hz]

計算モデルから，Nb 空洞モードの方が計算誤差は小さい．なぜならば，He ベッセルの方はチューナーやボールスクリー部が考慮されていないからである．それに対して，Nb 空洞はほぼ実際に近い形状で計算を行っている．Nb 空洞の振動のモードへの He ベッセルの形状誤差の影響は小さい．なぜならば，Nb 空洞と He ベッセルの振動が分離しているからである．

KEK の森田らの実験 [1] によると，チューナーで振動をエキサイトさせた場合，173 [Hz] と 245 [Hz] が大きく RF の共振周波数を大きく変動させることが分かっている．この実験では，機械振動の縦方向のモードしかエキサイトできないことから，ここで計算した縦方向のモードと周波数が一致する必要がある．ここで計算した No.6(241Hz) がその一つと考えられる．もうひとつ，173 [Hz] のモードが見つかっていない．これについては，次の解析で述べる．

付録 A すべてのモードの変形の様子

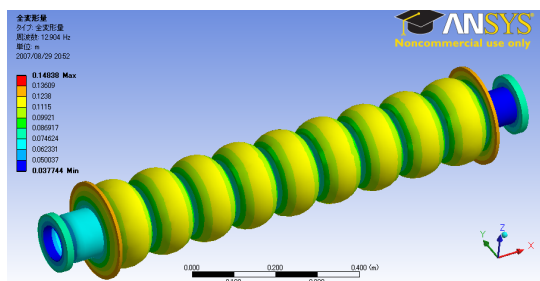


図 4: モード 1(12.904Hz) の空洞の変形

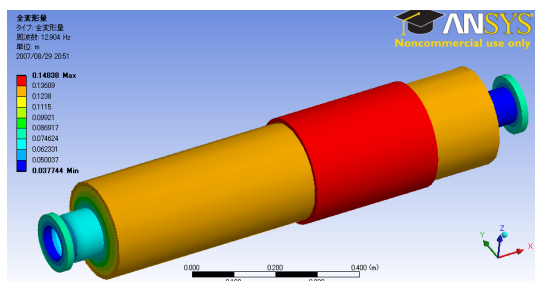


図 5: モード 1(12.904Hz) のジャケットの変形

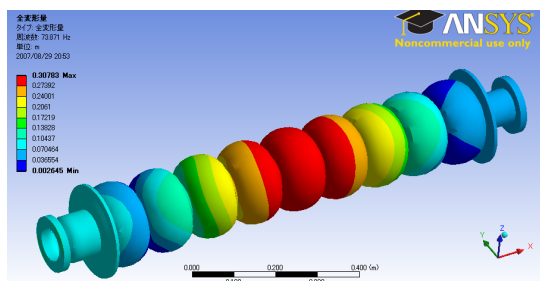


図 6: モード 2(73.871Hz) の空洞の変形

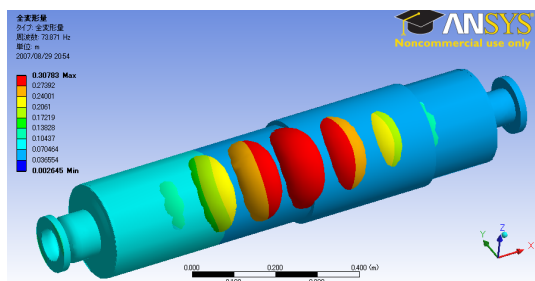


図 7: モード 2(73.871Hz) のジャケットの変形

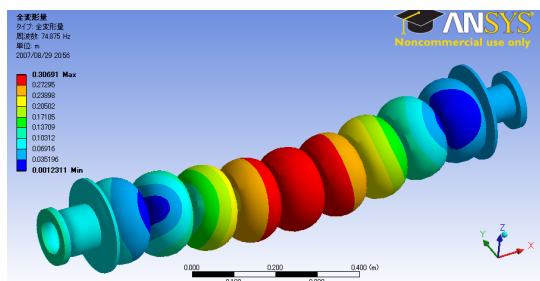


図 8: モード 3(74.875Hz) の空洞の変形

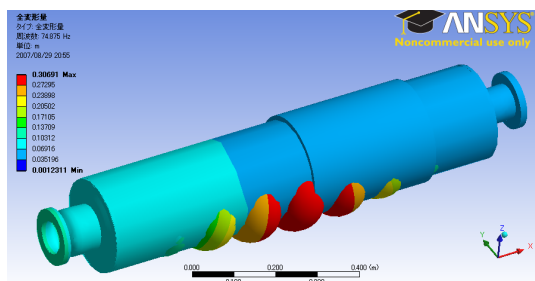


図 9: モード 3(74.875Hz) のジャケットの変形

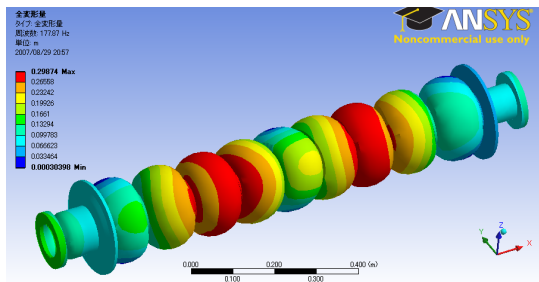


図 10: モード 4(177.87Hz) の空洞の変形

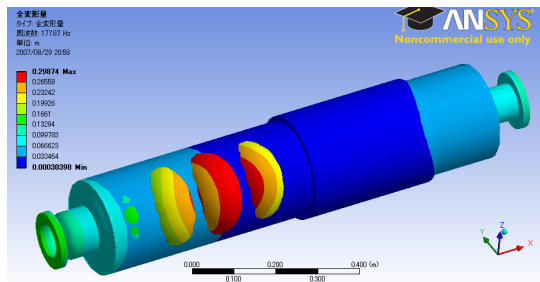


図 11: モード 4(177.87Hz) のジャケットの変形

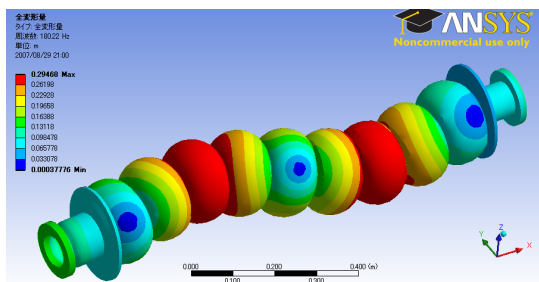


図 12: モード 5(180.22Hz) の空洞の変形

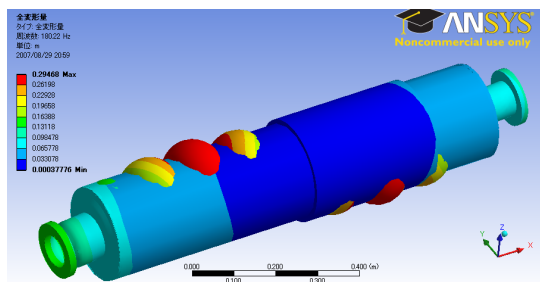


図 13: モード 5(180.22Hz) のジャケットの変形

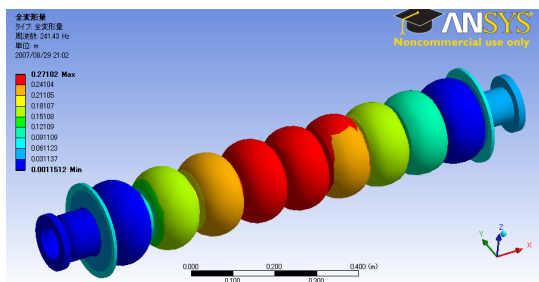


図 14: モード 6(241.43Hz) の空洞の変形

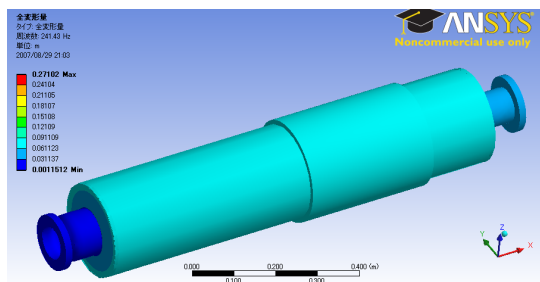


図 15: モード 6(241.43Hz) のジャケットの変形

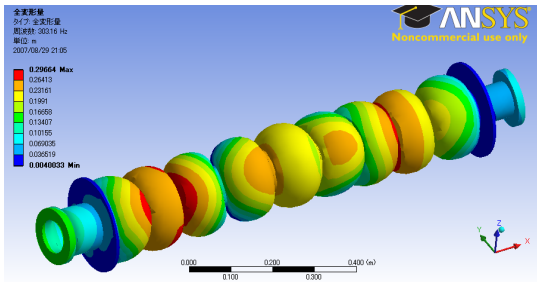


図 16: モード 7(303.16Hz) の空洞の変形

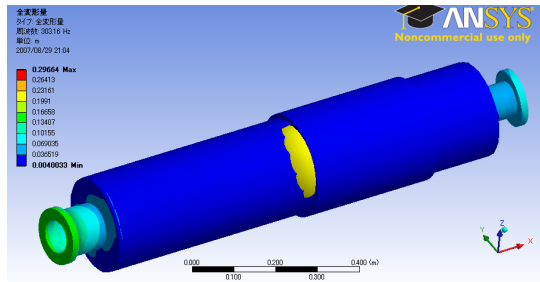


図 17: モード 7(303.16Hz) のジャケットの変形

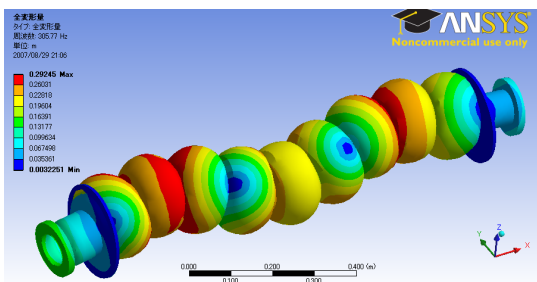


図 18: モード 8(305.77Hz) の空洞の変形

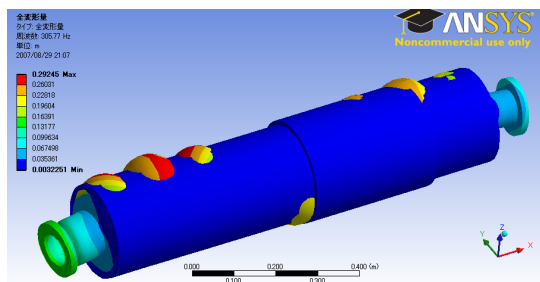


図 19: モード 8(305.77Hz) のジャケットの変形

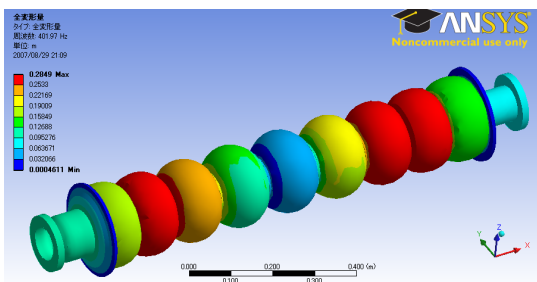


図 20: モード 9(401.97Hz) の空洞の変形

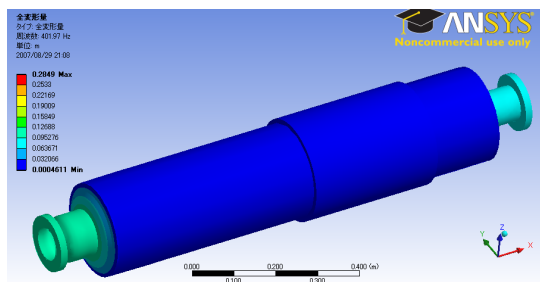


図 21: モード 9(401.97Hz) のジャケットの変形

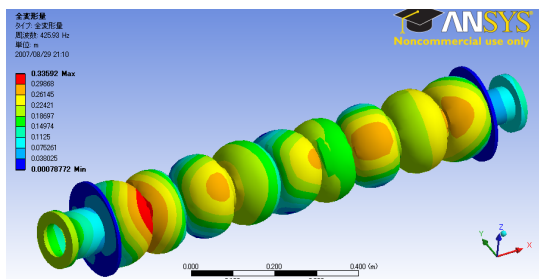


図 22: モード 10(425.93Hz) の空洞の変形

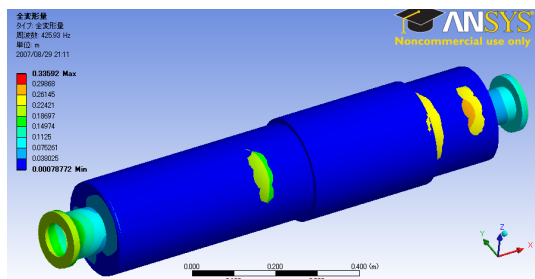


図 23: モード 10(425.93Hz) のジャケットの変形

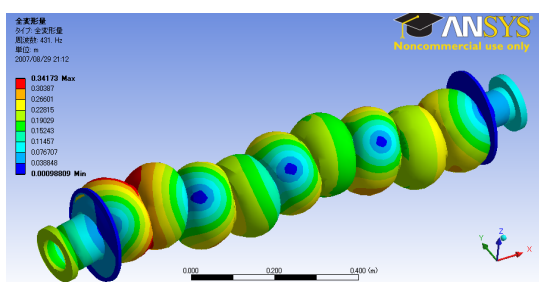


図 24: モード 11(431Hz) の空洞の変形

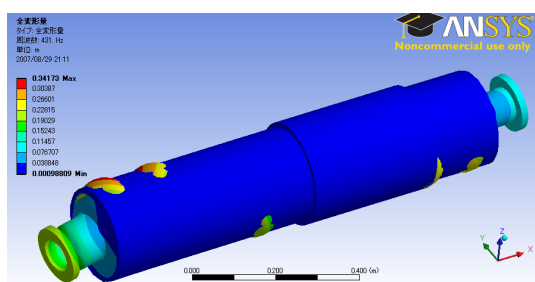


図 25: モード 11(431Hz) のジャケットの変形

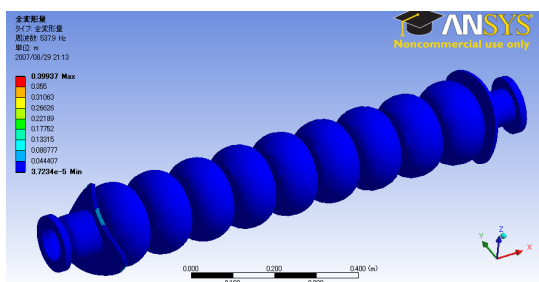


図 26: モード 12(537.9Hz) の空洞の変形

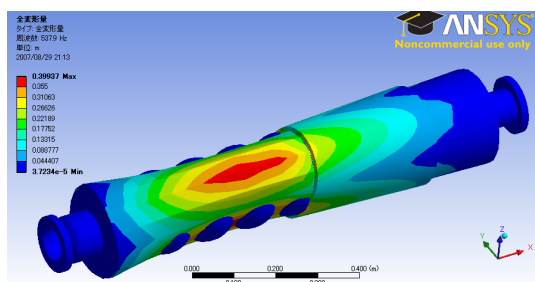


図 27: モード 12(537.9Hz) のジャケットの変形

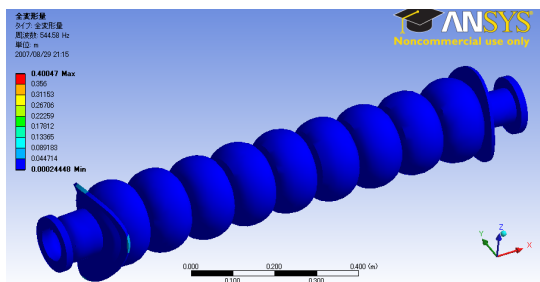


図 28: モード 13(544.58Hz) の空洞の変形

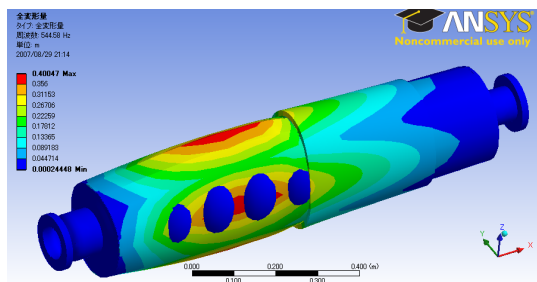


図 29: モード 13(544.58Hz) のジャケットの変形

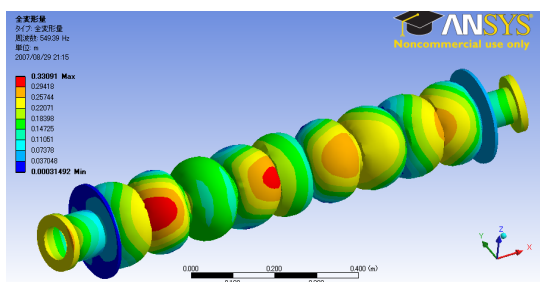


図 30: モード 14(549.39Hz) の空洞の変形

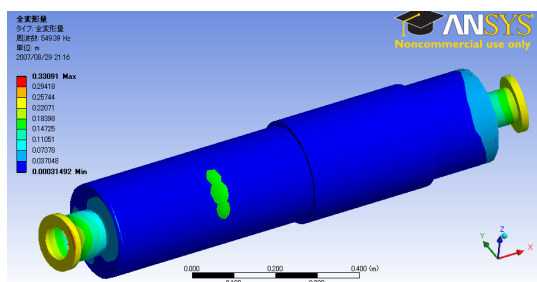


図 31: モード 14(549.39Hz) のジャケットの変形

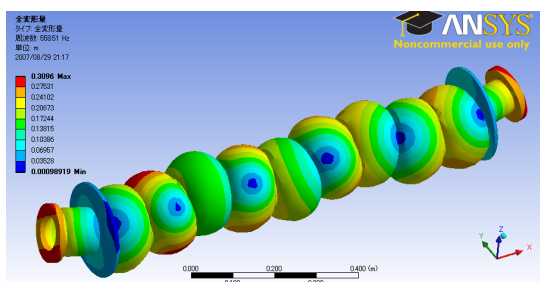


図 32: モード 15(558.51Hz) の空洞の変形

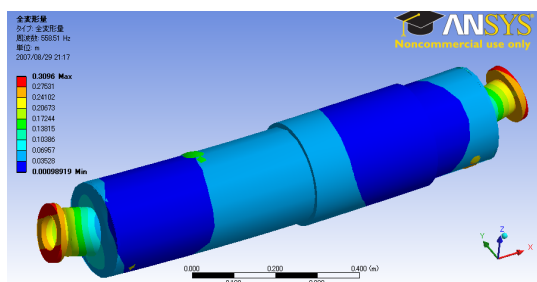


図 33: モード 15(558.51Hz) のジャケットの変形

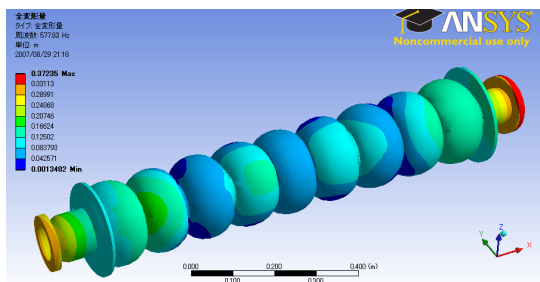


図 34: モード 16(577.83Hz) の空洞の変形

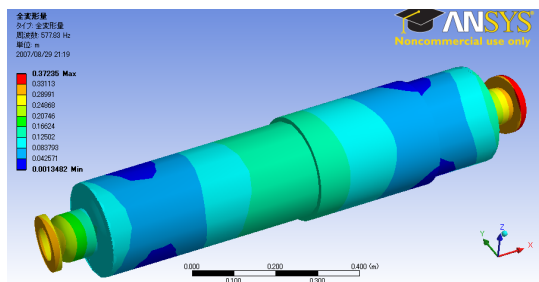


図 35: モード 16(577.83Hz) のジャケットの変形

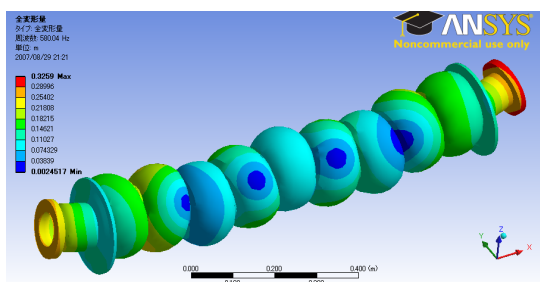


図 36: モード 17(580.04Hz) の空洞の変形

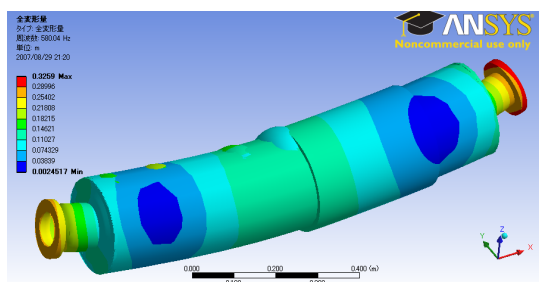


図 37: モード 17(580.04Hz) のジャケットの変形

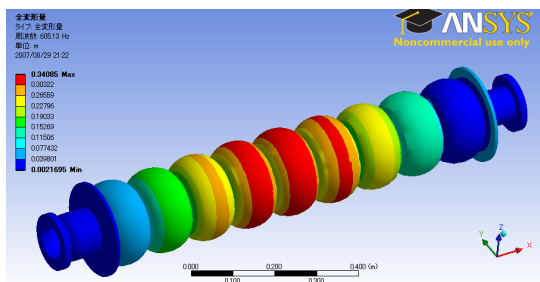


図 38: モード 18(605.13Hz) の空洞の変形

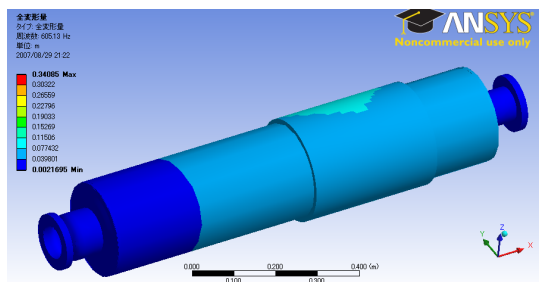


図 39: モード 18(605.13Hz) のジャケットの変形

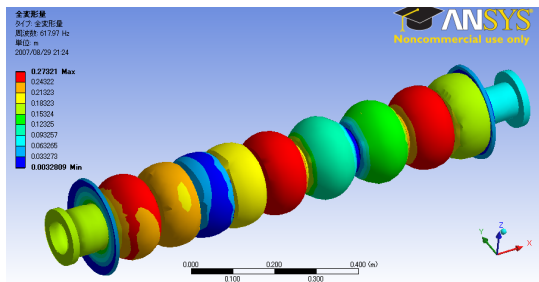


図 40: モード 19(617.97Hz) の空洞の変形

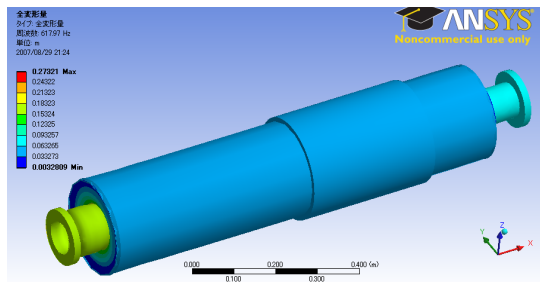


図 41: モード 19(617.97Hz) のジャケットの変形

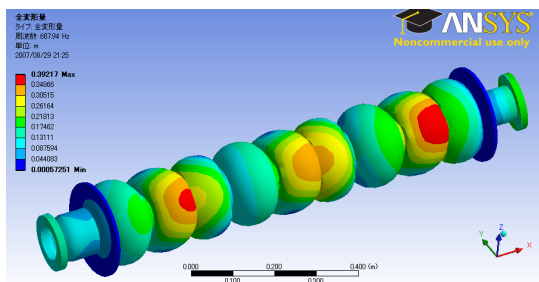


図 42: モード 20(687.94Hz) の空洞の変形

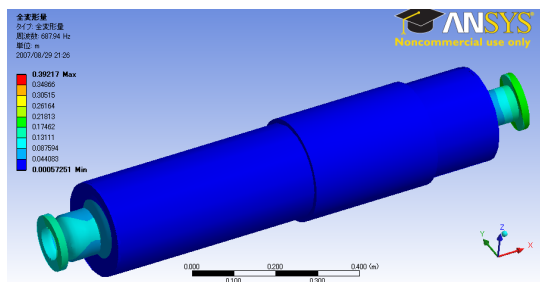


図 43: モード 20(687.94Hz) のジャケットの変形

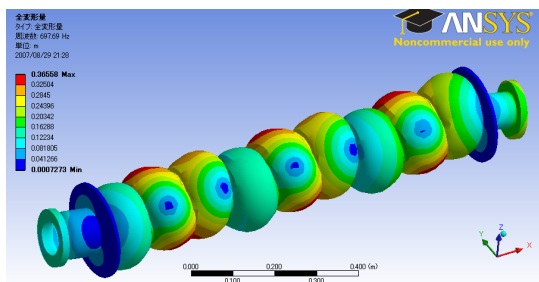


図 44: モード 21(697.69Hz) の空洞の変形

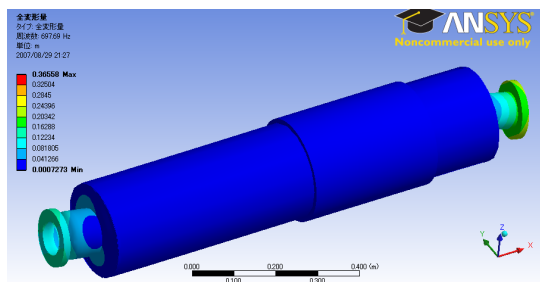


図 45: モード 21(697.69Hz) のジャケットの変形

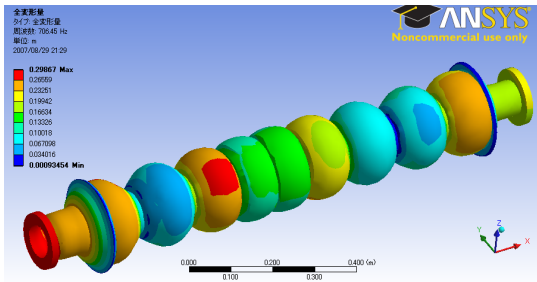


図 46: モード 22(706.45Hz) の空洞の変形

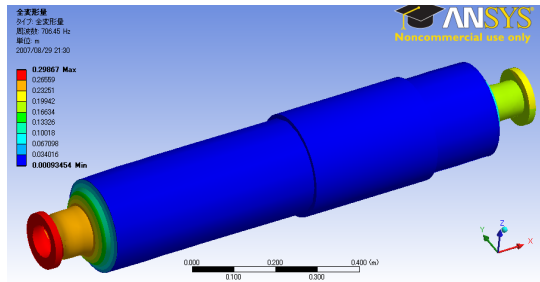


図 47: モード 22(706.45Hz) のジャケットの変形

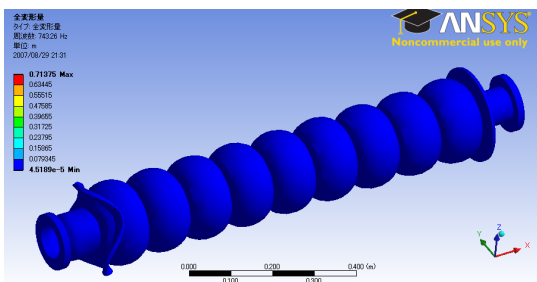


図 48: モード 23(743.26Hz) の空洞の変形

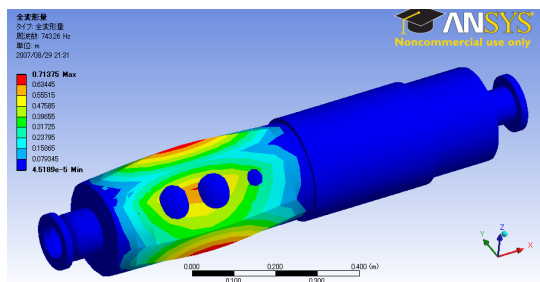


図 49: モード 23(743.26Hz) のジャケットの変形

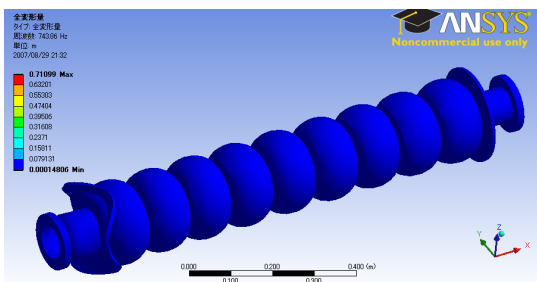


図 50: モード 24(743.86Hz) の空洞の変形

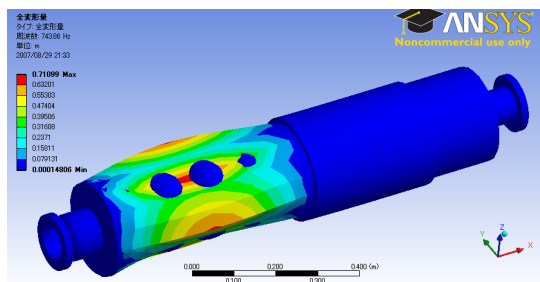


図 51: モード 24(743.86Hz) のジャケットの変形

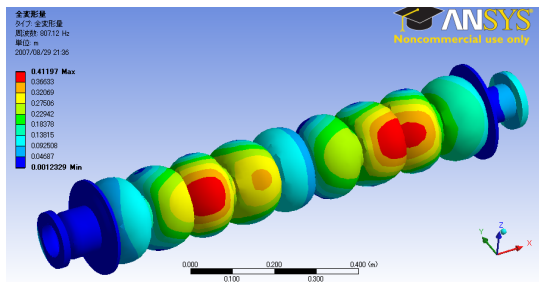


図 52: モード 25(807.12Hz) の空洞の変形

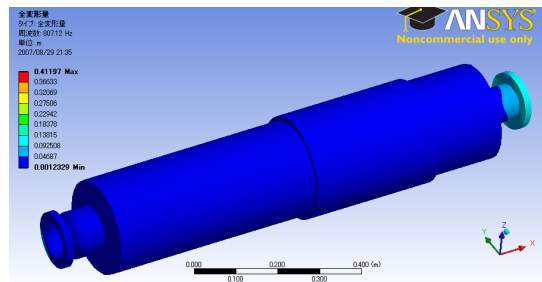


図 53: モード 25(807.12Hz) のジャケットの変形

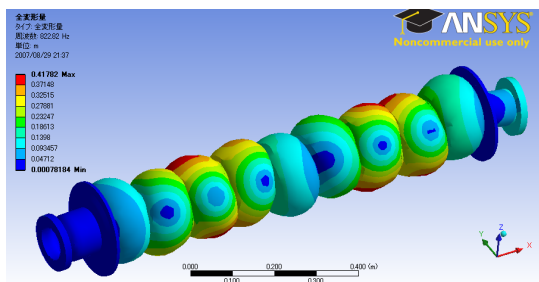


図 54: モード 26(822.82Hz) の空洞の変形

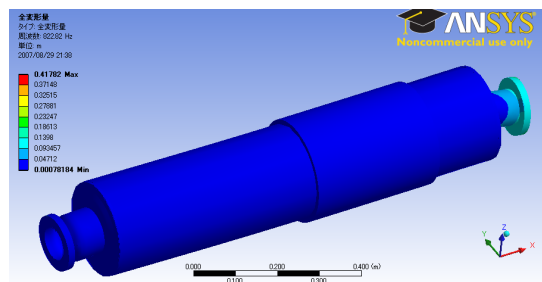


図 55: モード 26(822.82Hz) のジャケットの変形

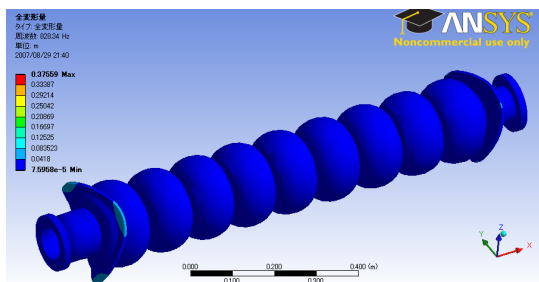


図 56: モード 27(828.34Hz) の空洞の変形

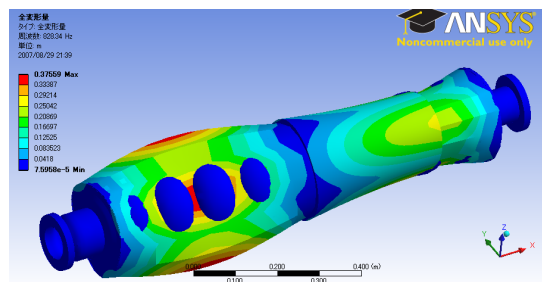


図 57: モード 27(828.34Hz) のジャケットの変形

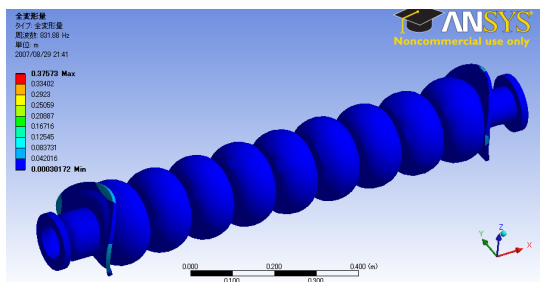


図 58: モード 28(831.88Hz) の空洞の変形

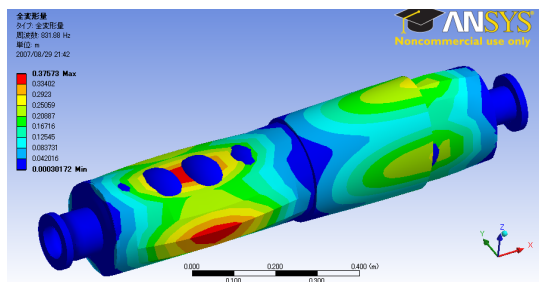


図 59: モード 28(831.88Hz) のジャケットの変形

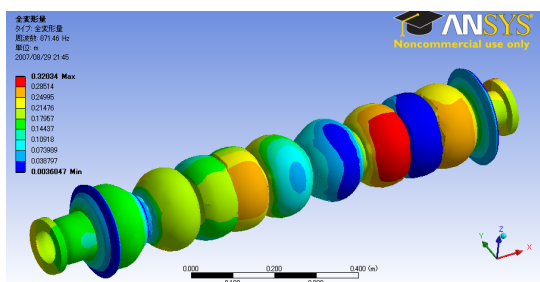


図 60: モード 29(871.46Hz) の空洞の変形

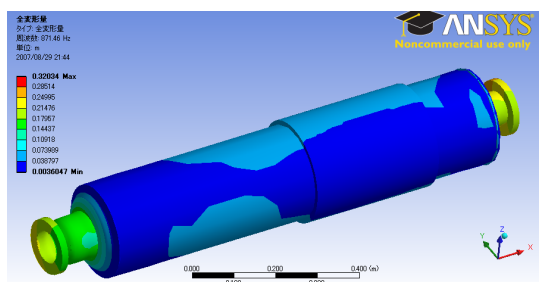


図 61: モード 29(871.46Hz) のジャケットの変形

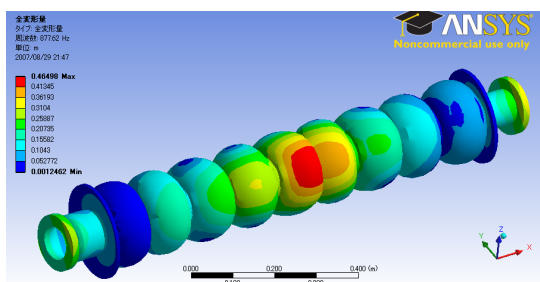


図 62: モード 30(877.62Hz) の空洞の変形

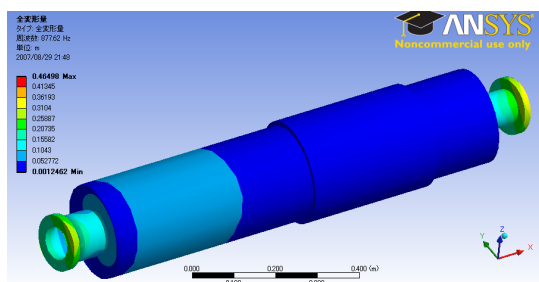


図 63: モード 30(877.62Hz) のジャケットの変形

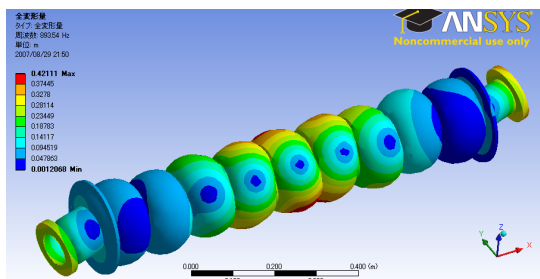


図 64: モード 31(893.54Hz) の空洞の変形

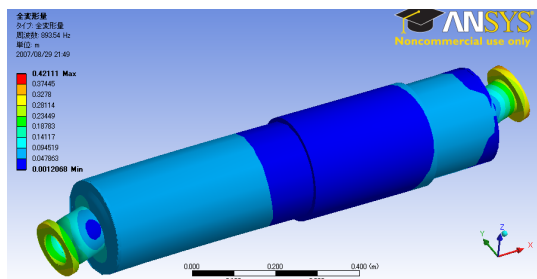


図 65: モード 31(893.54Hz) のジャケットの変形

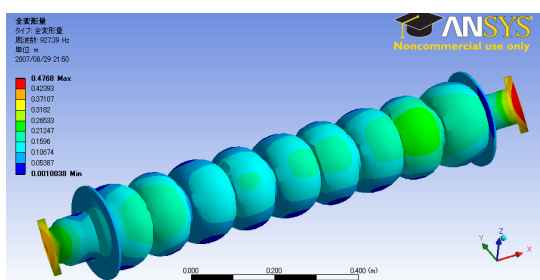


図 66: モード 32(927.39Hz) の空洞の変形

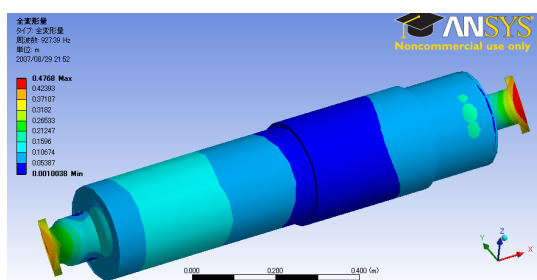


図 67: モード 32(927.39Hz) のジャケットの変形

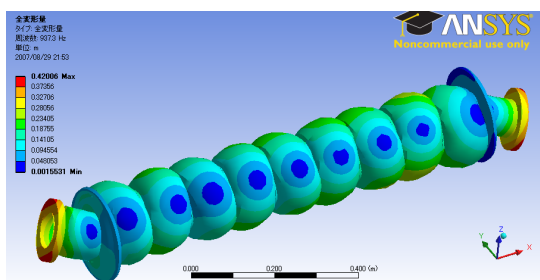


図 68: モード 33(937.3Hz) の空洞の変形

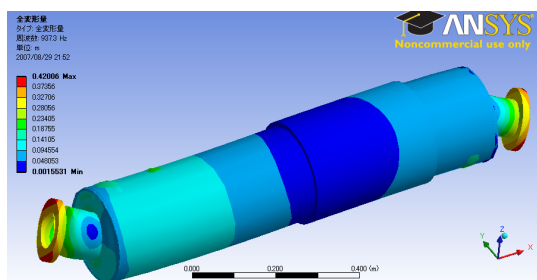


図 69: モード 33(937.3Hz) のジャケットの変形

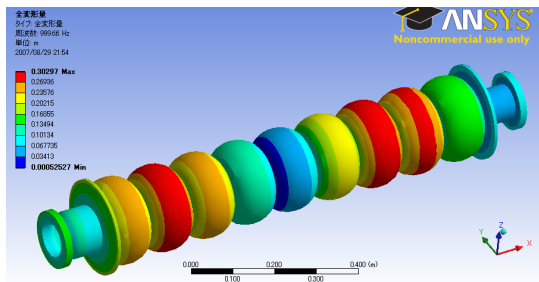


図 70: モード 34(999.66Hz) の空洞の変形

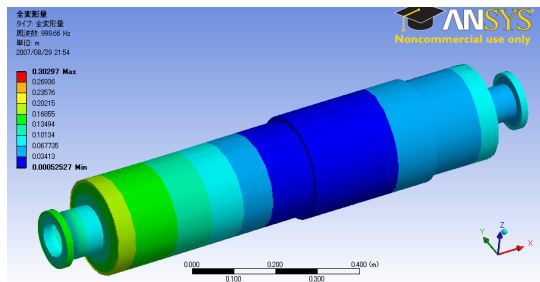


図 71: モード 34(999.66Hz) のジャケットの変形

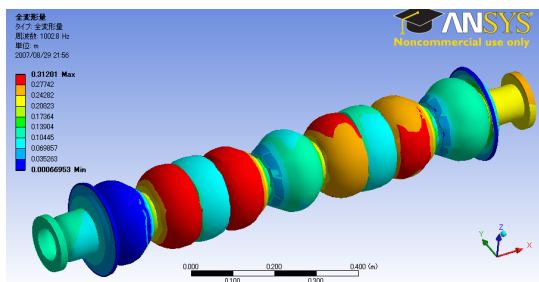


図 72: モード 35(1002.8Hz) の空洞の変形

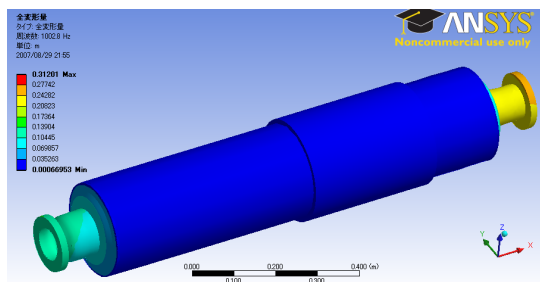


図 73: モード 35(1002.8Hz) のジャケットの変形

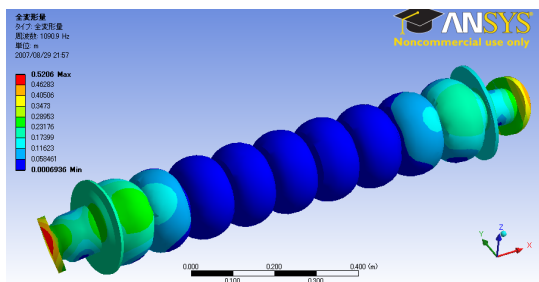


図 74: モード 36(1090.9Hz) の空洞の変形

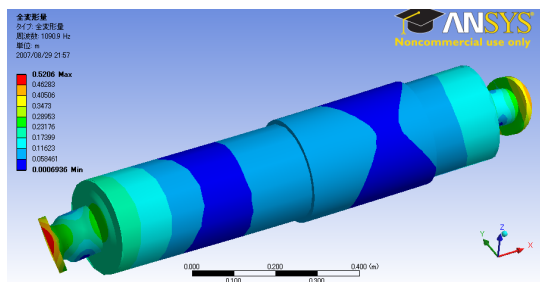


図 75: モード 36(1090.9Hz) のジャケットの変形

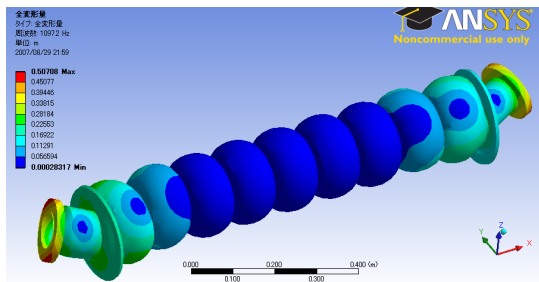


図 76: モード 37(1097.2Hz) の空洞の変形

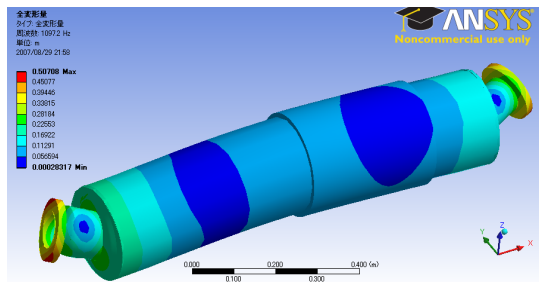


図 77: モード 37(1097.2Hz) のジャケットの変形

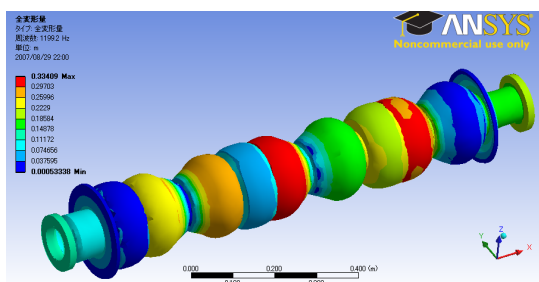


図 78: モード 38(1199.2Hz) の空洞の変形

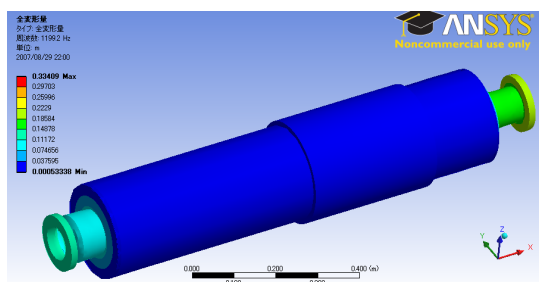


図 79: モード 38(1199.2Hz) のジャケットの変形

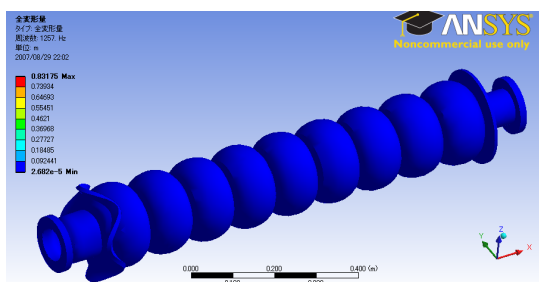


図 80: モード 39(1257Hz) の空洞の変形

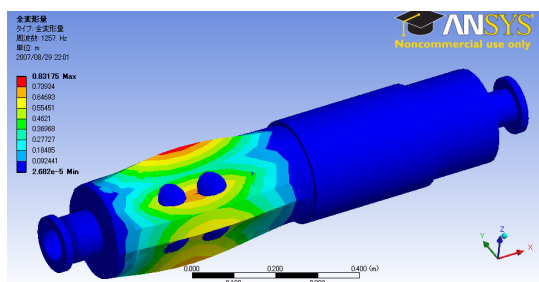


図 81: モード 39(1257Hz) のジャケットの変形

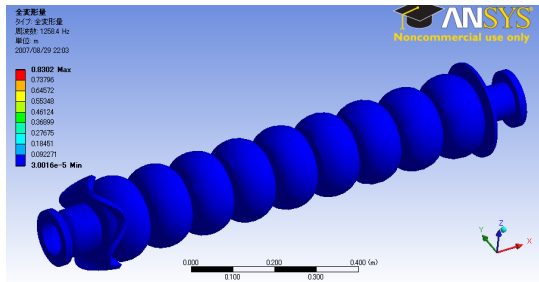


図 82: モード 40(1258.4Hz) の空洞の変形

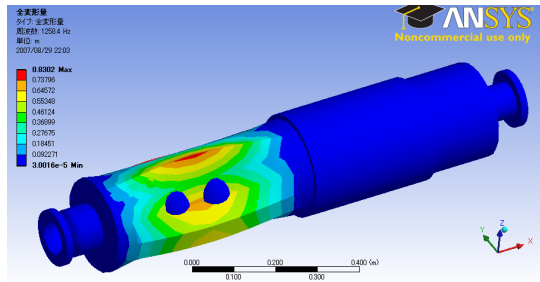


図 83: モード 40(1258.4Hz) のジャケットの変形

参考文献

- [1] Y.Morita et al. Ilc に向けた 9 セル超伝導空洞のためのチューナーに関する研究.
- [2] 山岡広. 45mev/m 加速空洞の機械的構造検討.
- [3] 山岡広. Private communications.