

# 要旨

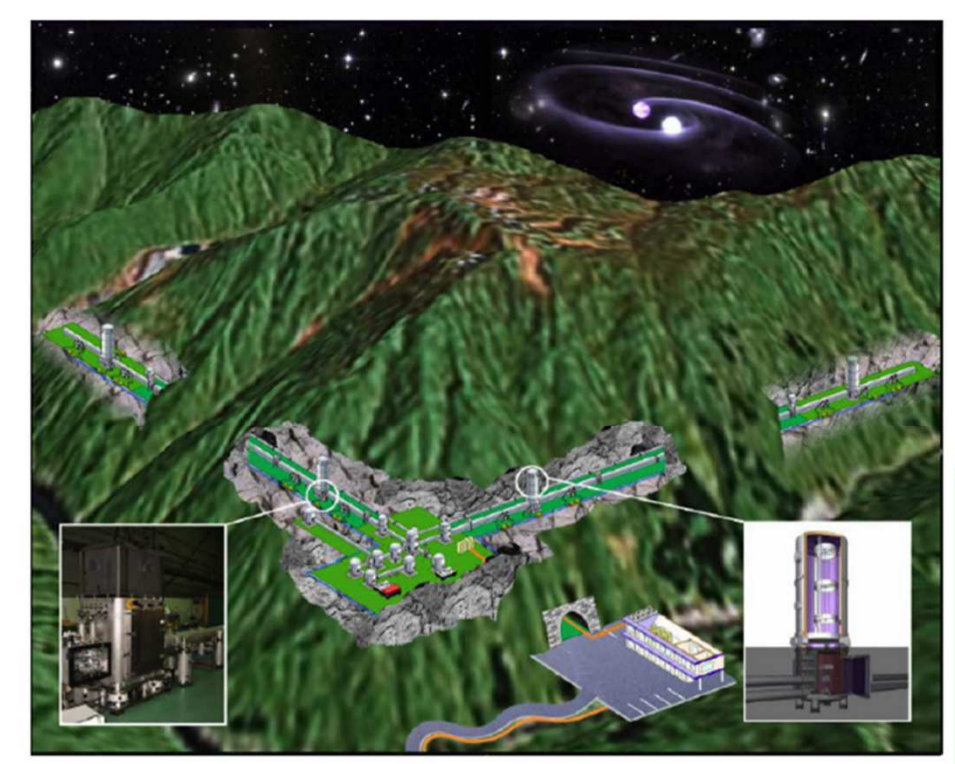
- 大型低温重力波望遠鏡計画(KAGRA)で使用される
- 直径約2.4m高さ約3.8m真空Chamber
- 約20Kに冷却されたミラーが入る

## 作業内容

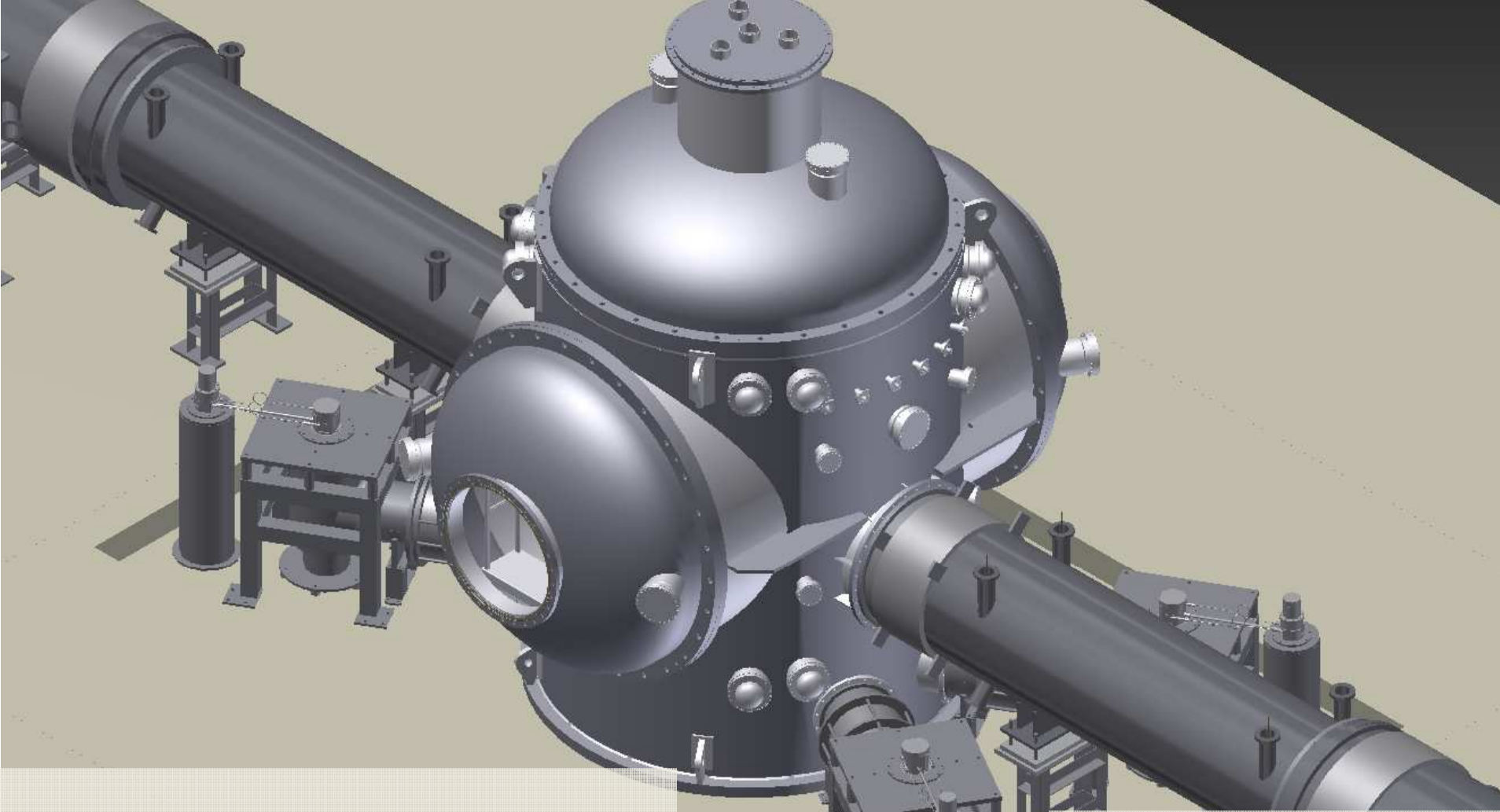
- クライオスタットのモード解析、応答スペクトル解析
- 輻射シールドの設計とモード解析、応答スペクトル解析
- クライオスタット周りの3D図の作成
- ビームダクト、ダクトシールドの図面

# KAGRA計画

岐阜県神岡に建設が進んでいる重力波検出器



- <目的>
1. 重力波の検出  
世界初の直接検証
  2. 新しい天文学の創生  
電磁波、ニュートリノ、重力波
- 地下に設置した腕長3kmのマイケルソン干渉計の鏡を20Kに冷却し、中性子連星の合体で発生する重力波を狙う。



## KAGRA クライオスタットの設計

2012/04/12  
高エネルギー加速器研究機構  
機械工学センター  
小池 重明、久米 達哉  
超伝導低温工学センター  
木村 誠宏、鈴木 敏一

## KAGRAのCryogenics

高真空中で静かに冷やす

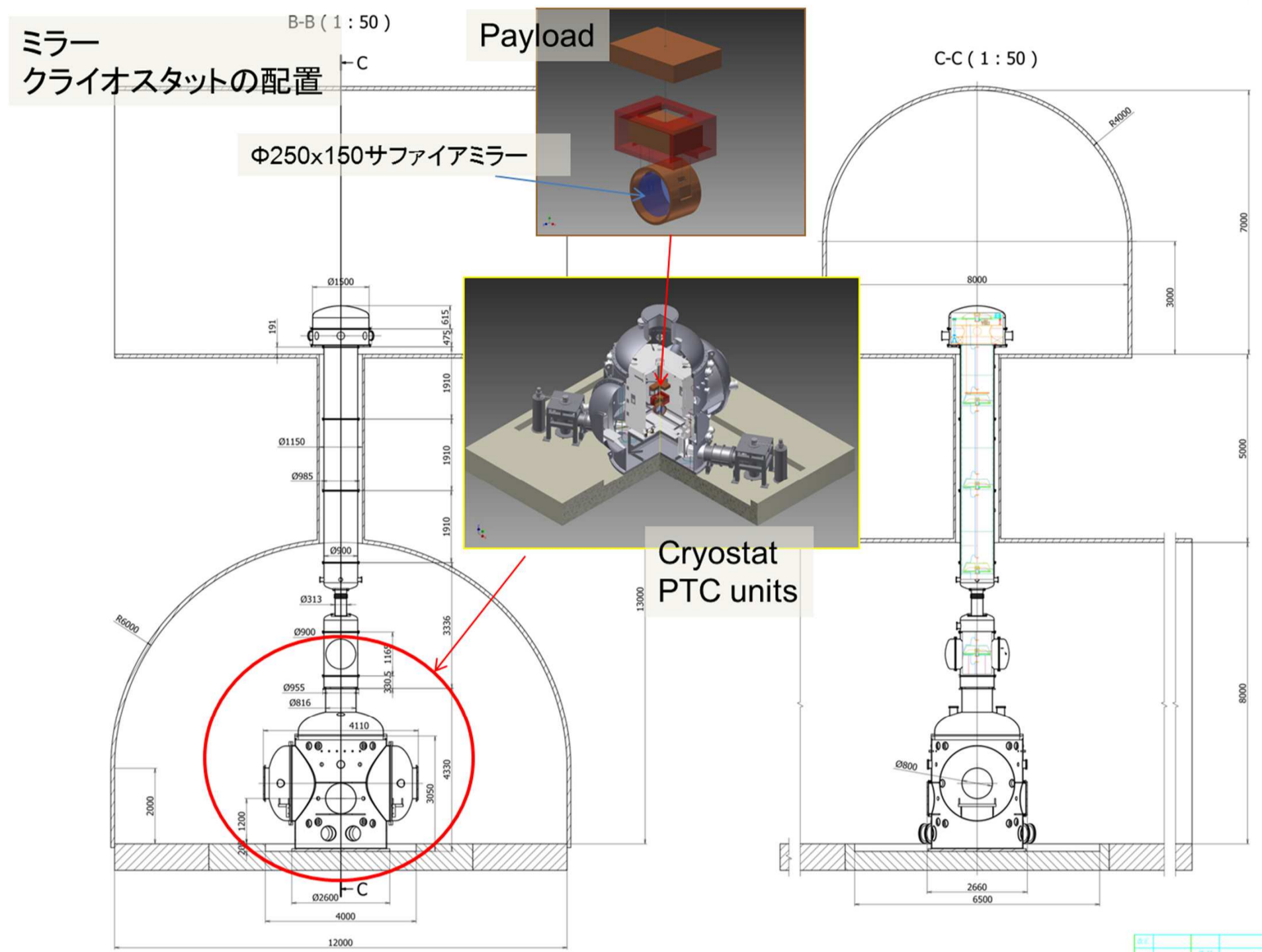
Vacuum for LCGT  
Optics of the interferometer must operate in a high vacuum because of sensing an extremely small signal. No optical window is required in the main cavity. All components have a common vacuum space and should reduce outgassing from their surfaces. Generally, metal surfaces have much smaller rate of outgassing than organic materials at 300K. A surface with low temperature also have a very small rate of outgassing. Super Insulator (SI) is effective thermal insulation for cryogenic parts. SI consists of 20~30 layers of aluminized polyester films.

SAS Seismic Attenuation System  
床振動からの絶縁

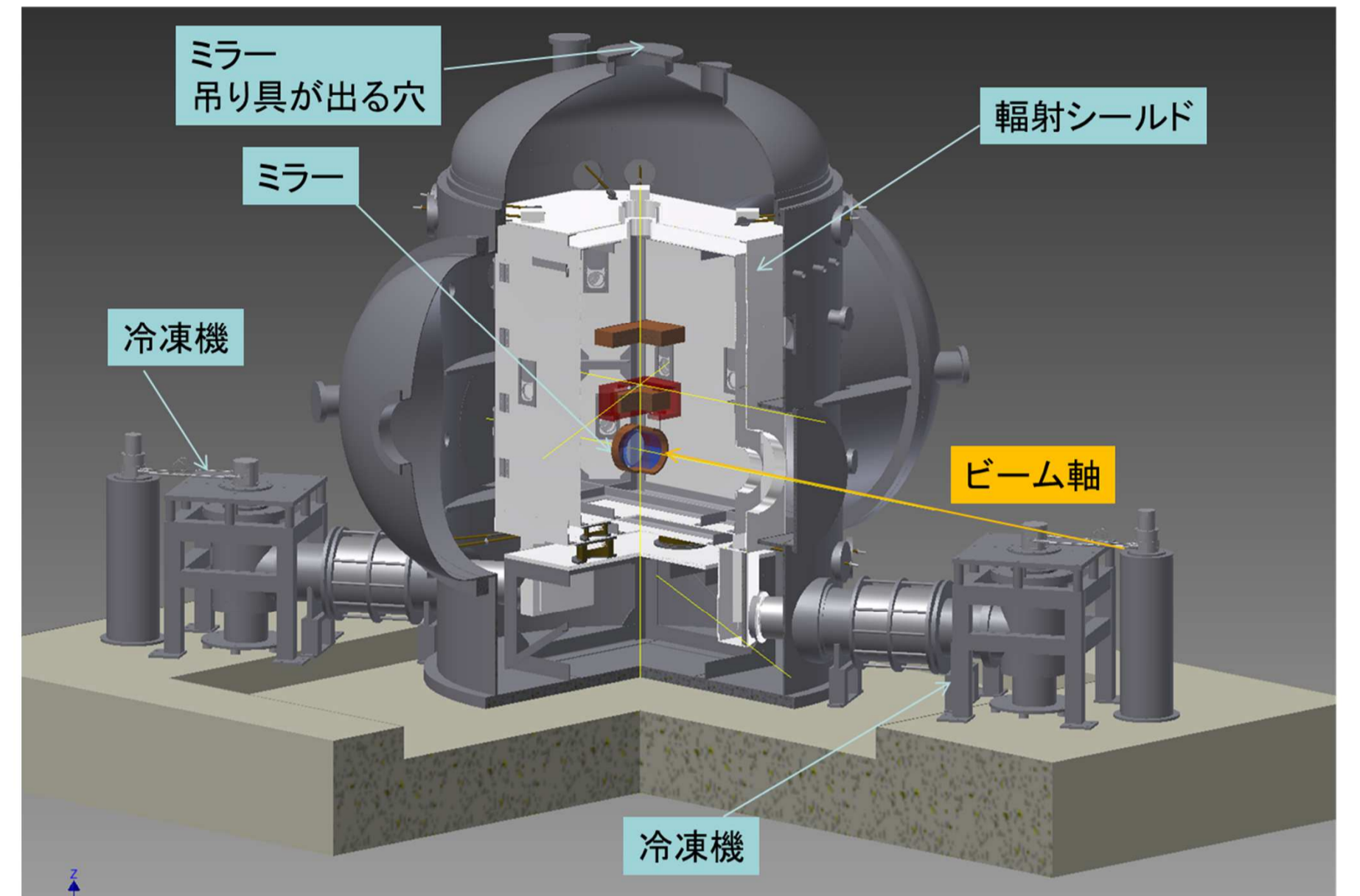
防振懸架装置  
Vibrator Spectra of Cryostat System (Z)

Beam Pipe  
輻射シールド、ミラー  
冷凍機ユニット

Baffles for stopping thermal radiation  
ε: emissivity  
1-ε: reflectivity  
Straight pipe ε<<1  
6 baffles  
-> 99.4% reduction



## KAGRAクライオスタット3D図



## クライオスタットのハンマリング試験とモーダル解析

固定点を変えると解析結果が変わるので固定箇所を変えてモーダル解析を行った

- ・自由振動
- ・底板全周固定+重力
- ・2箇所固定+重力
- ・3箇所固定+重力
- ・4箇所固定+重力

モーダル解析を行った  
固定場所は4か所ある下部吊具の下で固定場所を2,3,4と変えた

NSYS 13.0

重力

固定場所

実測値と計算値が大体一致したモード

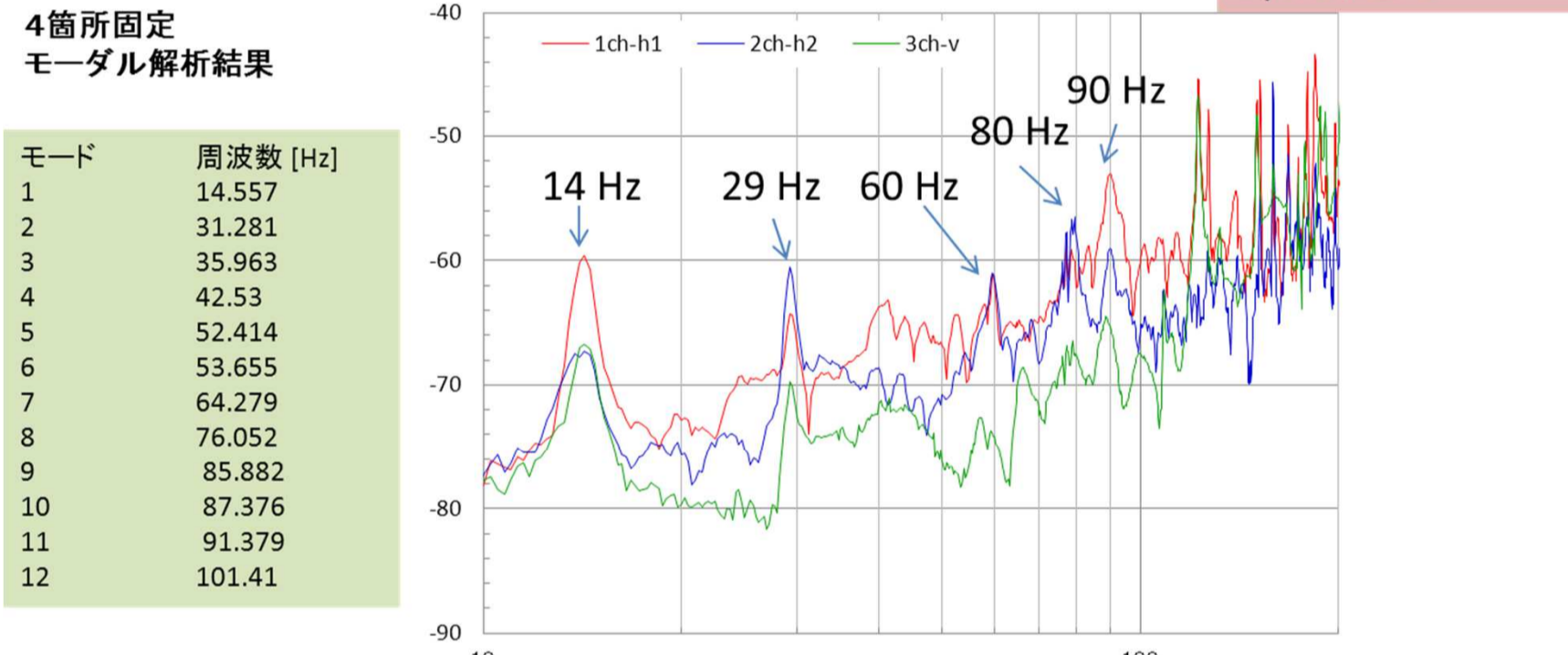
## モーダル解析結果

| 自由振動        | 底板全周固定      | 2箇所固定結果     | 3箇所固定結果     | モード    | 周波数 [Hz] |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|----------|
| F1 37.41 Hz | F1 21.52 Hz | F1 3.58 Hz  | F1 11.07 Hz | モード 1  | 14.537   |
| F2 40.95 Hz | F2 35.28 Hz | F2 20.76 Hz | F2 22.22 Hz | モード 2  | 31.281   |
| F3 42.92 Hz | F3 43.23 Hz | F3 24.97 Hz | F3 34.72 Hz | モード 3  | 35.963   |
| F4 43.15 Hz | F4 48.79 Hz | F4 35.87 Hz | F4 38.03 Hz | モード 4  | 42.53    |
| F5 43.66 Hz | F5 49.10 Hz | F5 42.17 Hz | F5 43.02 Hz | モード 5  | 52.414   |
| F6 56.56 Hz | F6 56.02 Hz | F6 42.75 Hz | F6 44.81 Hz | モード 6  | 53.655   |
| F7 77.60 Hz | F7 56.35 Hz | F7 55.79 Hz | F7 55.97 Hz | モード 7  | 64.279   |
| F8 79.33 Hz | F8 66.96 Hz | F8 55.86 Hz | F8 56.14 Hz | モード 8  | 76.052   |
|             |             |             |             | モード 9  | 85.882   |
|             |             |             |             | モード 10 | 87.376   |
|             |             |             |             | モード 11 | 91.379   |
|             |             |             |             | モード 12 | 101.41   |



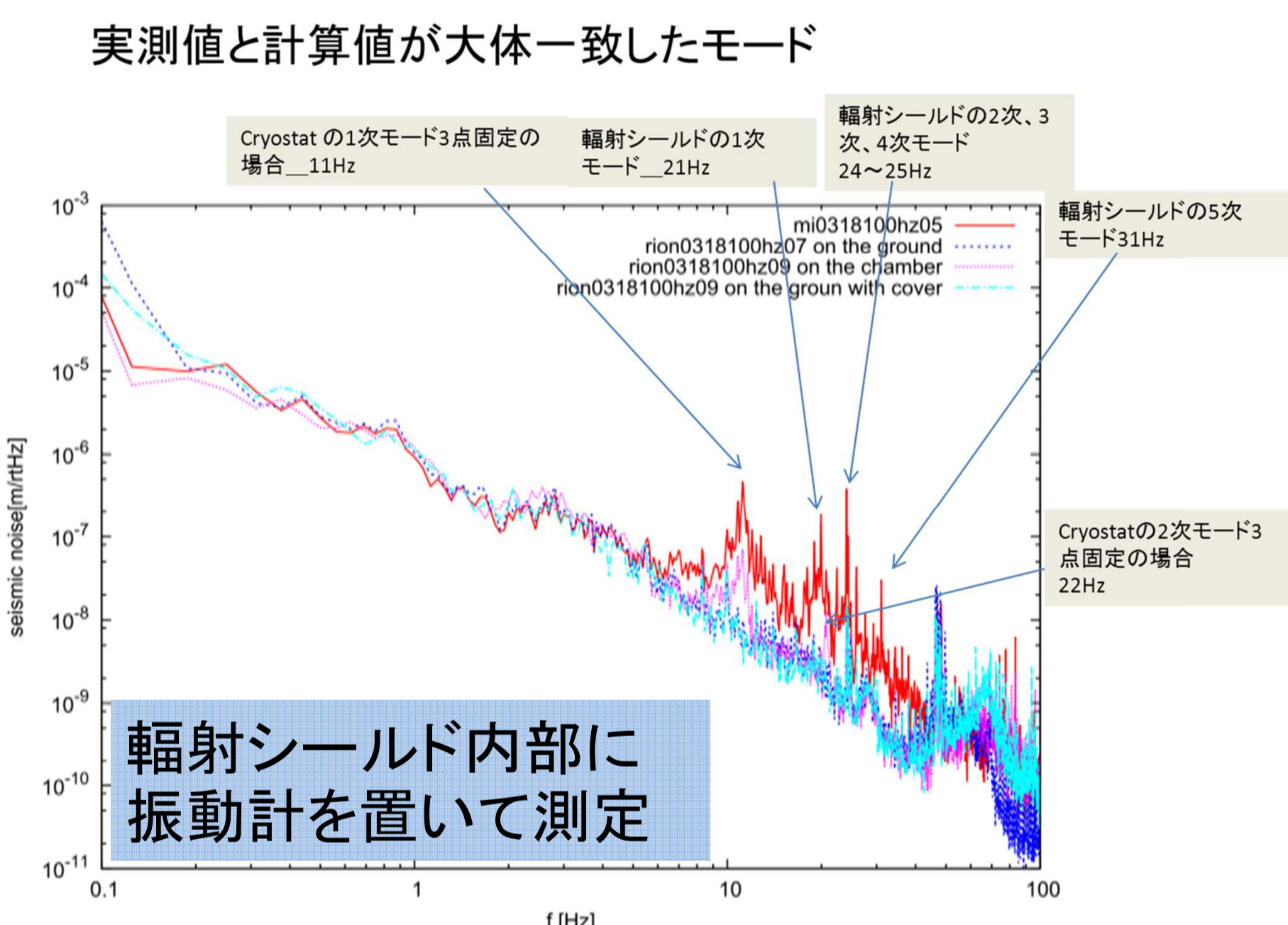
冷凍試験の準備中のCryostat1号機

'12/8ハンマリング試験結果 By久米さん

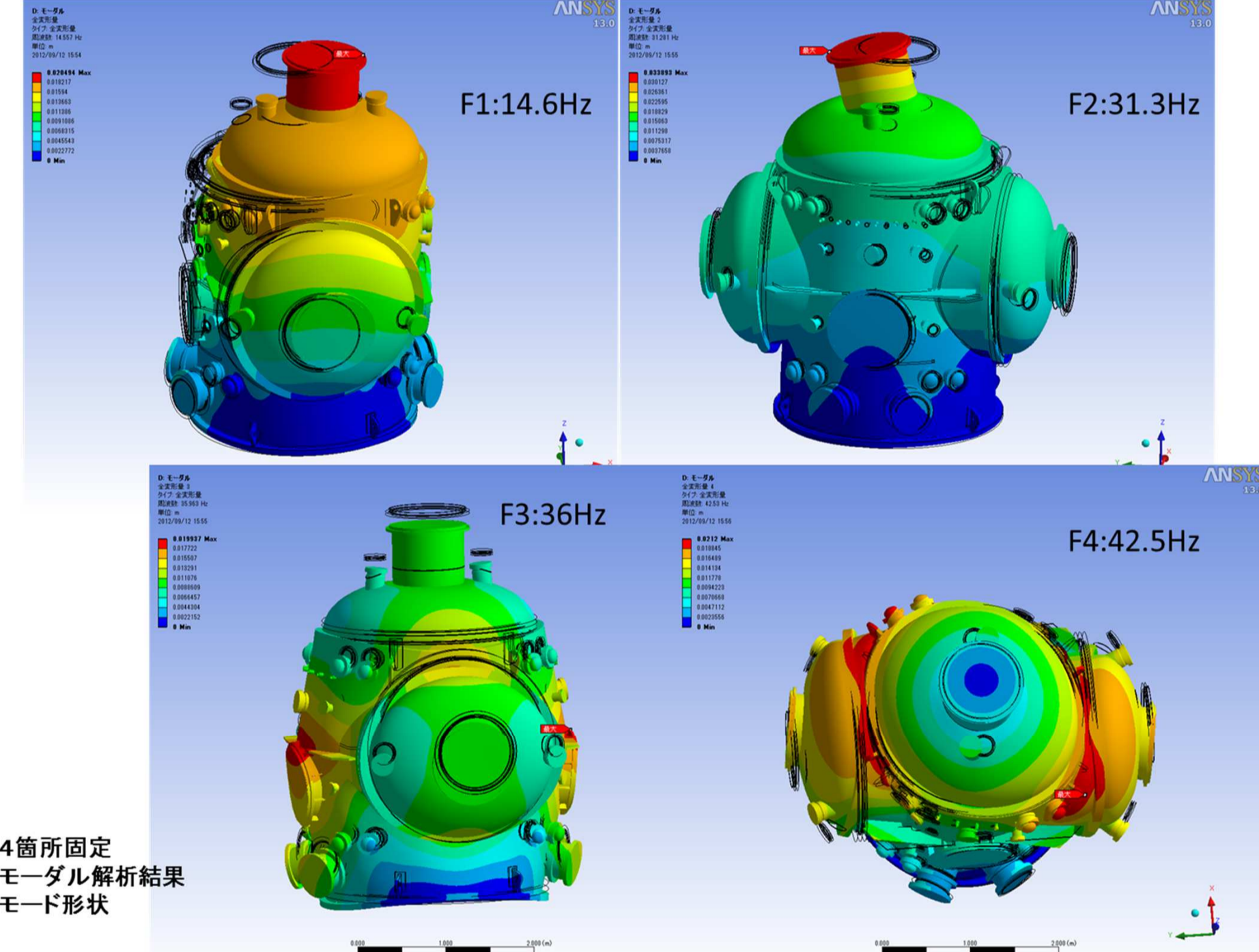


KAGRAクライオスタット真空容器の周波数応答関数(FRF)、インパルスハンマー入力、速度計のACCI(加速度検出)モード(ゲイン120 dB, カットオフ400Hz)にて検出、全10点のハンマー入力時の応答特性の平均値、1ch-h1は水平ビーム軸方向、2ch-h2は水平1ch-h1と直交方向、3ch-vは上下方向14, 29, 60, 80, 90 Hz付近にピークが見られる

4箇所固定のモーダル解析結果が実測値に一番合っているようである



## 固定条件によって固有振動数が大きく変わる



## 4点固定の場合のモード変形状

## 放射シールドのモーダル解析と応答スペクトル解析

先端を固定x4  
先端を固定x16  
変位スペクトルを入力x4  
底面固定

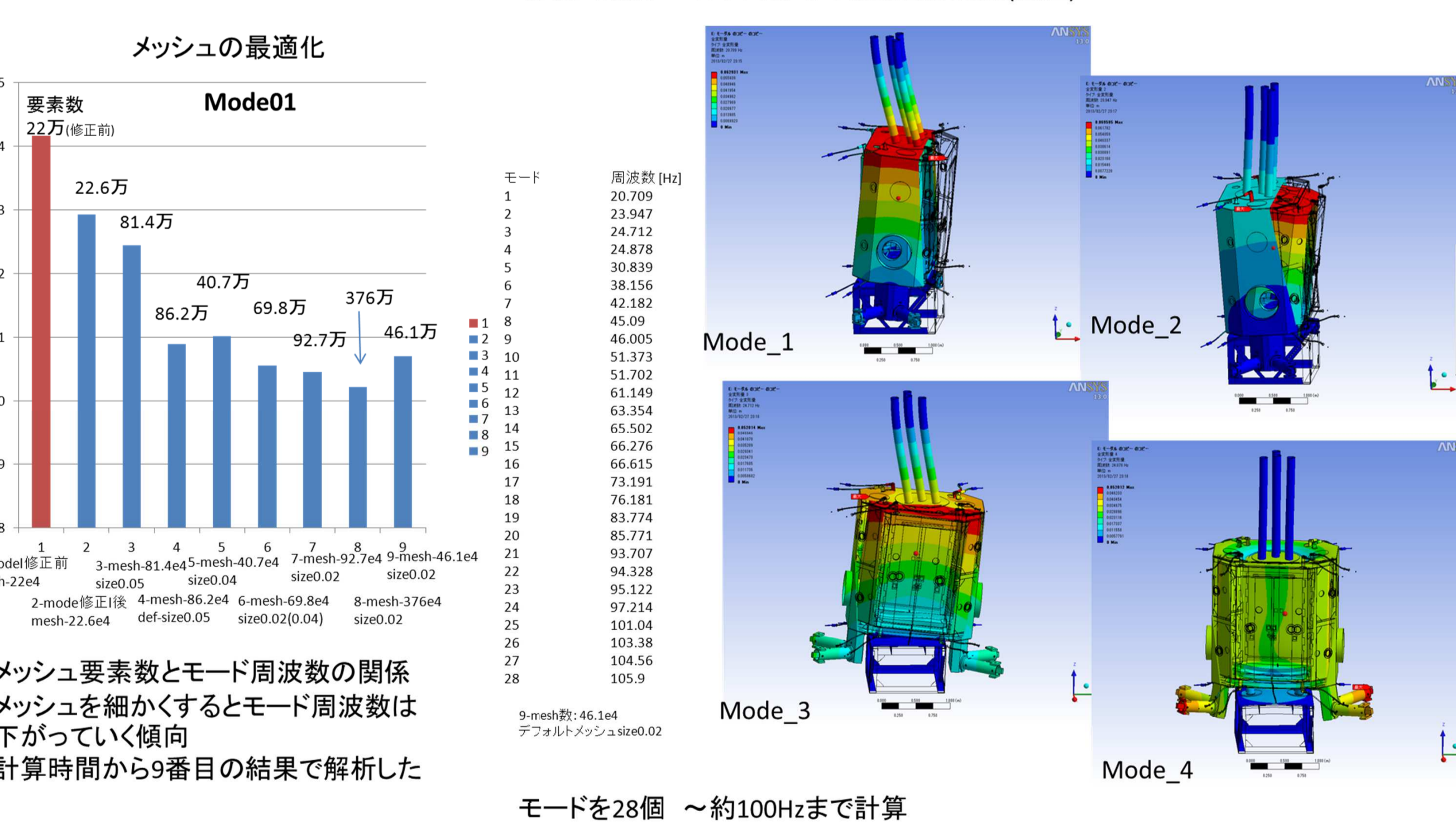
モデル形状

メッシュの最適化

Mode01

| 要素数      | モード | 周波数 [Hz] |
|----------|-----|----------|
| 22万(修正前) | 1   | 20.709   |
|          | 2   | 23.947   |
|          | 3   | 24.712   |
|          | 4   | 24.878   |
|          | 5   | 30.859   |
|          | 6   | 38.156   |
|          | 7   | 42.182   |
|          | 8   | 45.09    |
|          | 9   | 46.005   |
|          | 10  | 51.373   |
|          | 11  | 51.702   |
|          | 12  | 61.149   |
|          | 13  | 63.354   |
|          | 14  | 65.502   |
|          | 15  | 66.276   |
|          | 16  | 66.035   |
|          | 17  | 73.101   |
|          | 18  | 76.181   |
|          | 19  | 82.774   |
|          | 20  | 85.771   |
|          | 21  | 93.707   |
|          | 22  | 94.328   |
|          | 23  | 95.122   |
|          | 24  | 97.214   |
|          | 25  | 101.04   |
|          | 26  | 103.38   |
|          | 27  | 104.56   |
|          | 28  | 105.9    |

メッシュ要素数とモード周波数の関係  
メッシュを細かくするとモード周波数は下がっていく傾向  
計算時間から9番目の結果で解析した



## ○応答スペクトル法

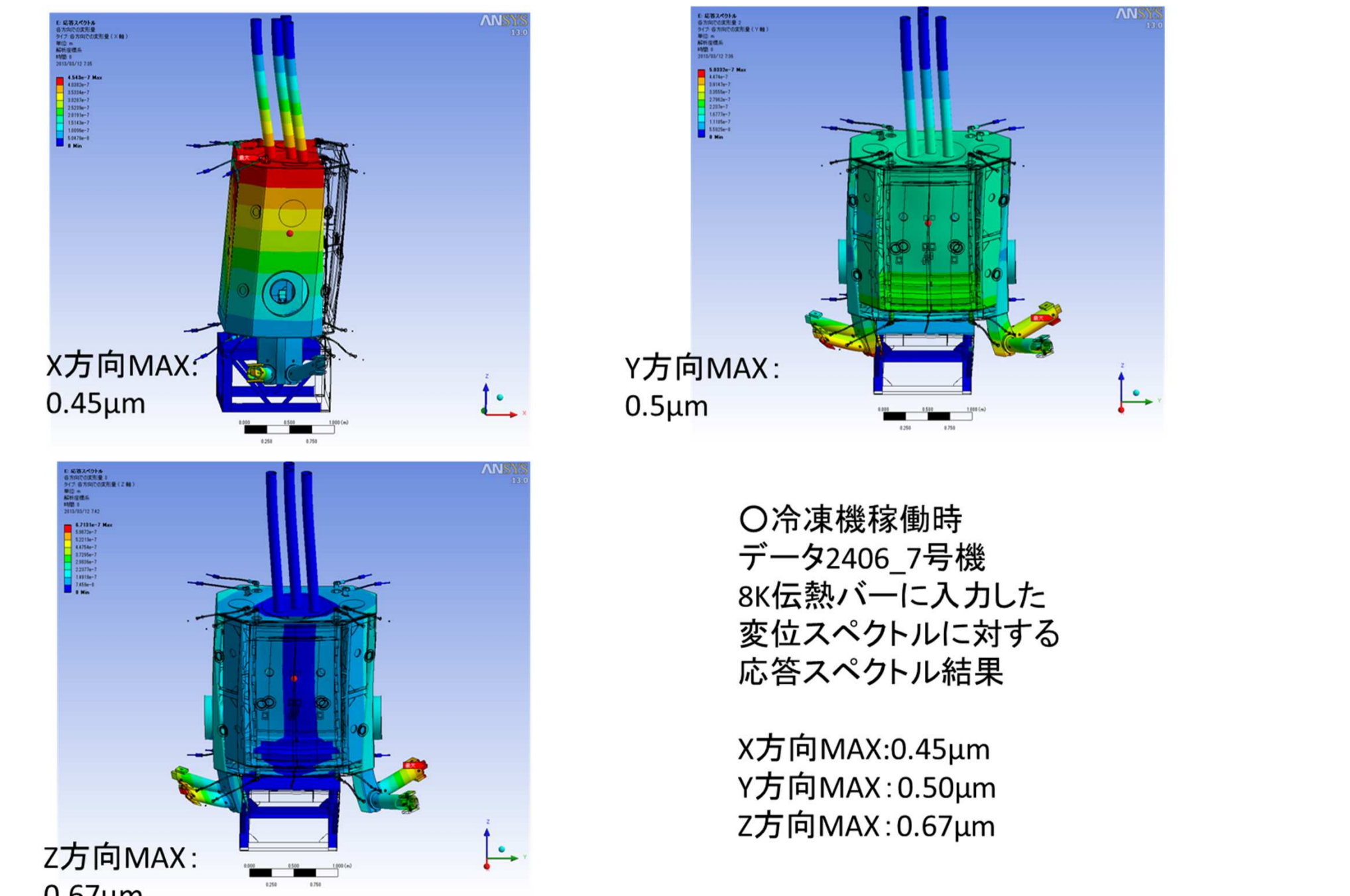
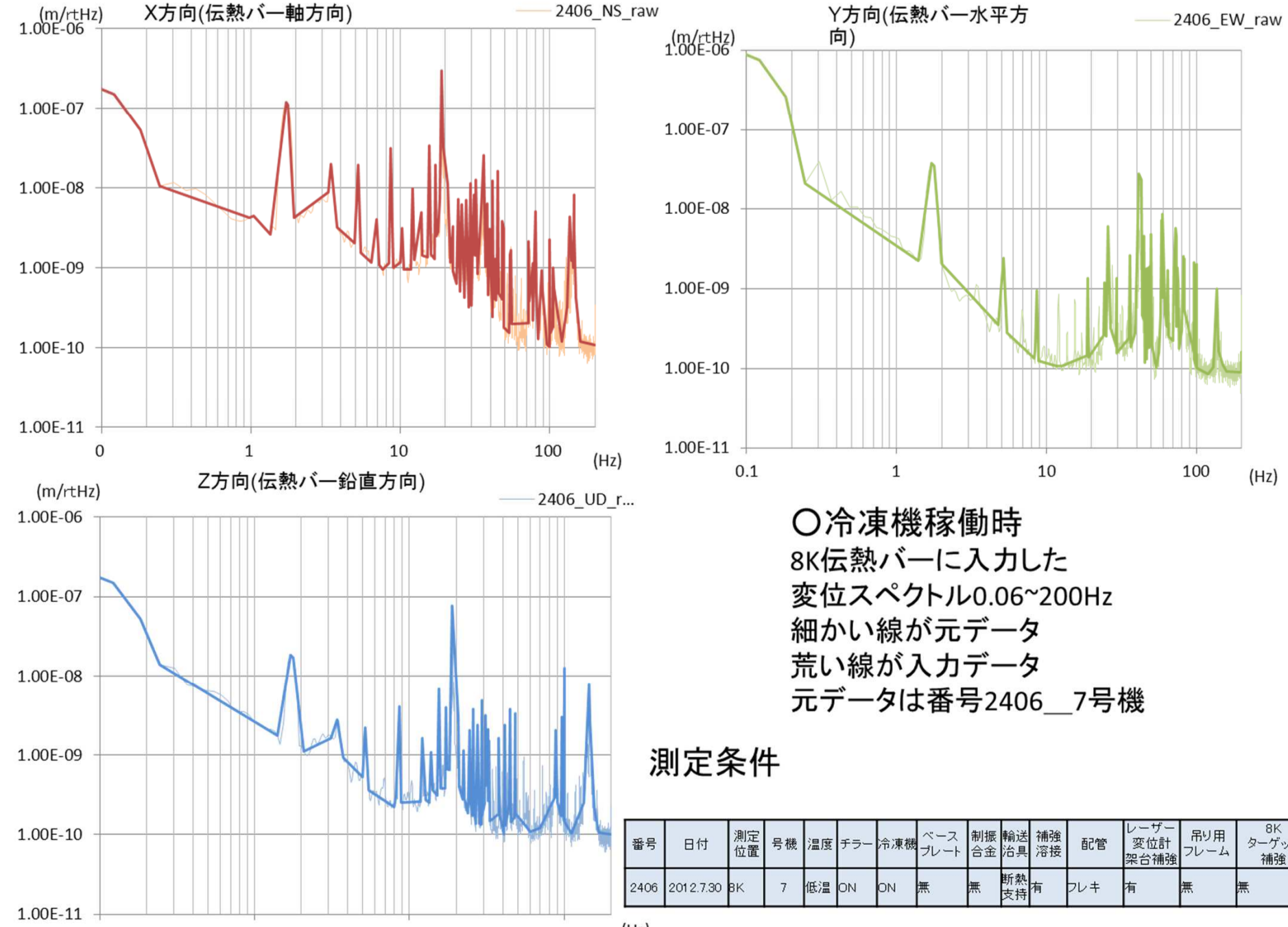
応答スペクトルは、(図3)に示すようなもとも単純な一質点系(一つの固有周期と一つの減衰定数で特性が決まる)と呼ばれるモデルが、地震動を受けた場合に生じる最大の応答値(加速度や速度、あるいは変位でもよい)をその固有周期に対して描いた図のことです。この図は1質点で表される単純な構造物の最大応答を示しているにすぎません。しかし、この応答スペクトルを使って多質点系の最大応答も推定することができます。

応答スペクトルを用いた多質点系の最大応答の推定方法は今までに幾通りかの提案があります。それらを表1に示しますが、このうち最も一般的なのが、SRSS(Square Root of Sum of Squares)法と呼ばれるものです。最近では各固有モードの重なり具合をより実情に近い形に推定するように精度を向上させたCQC法も使われています(表1)。

応答スペクトル法

1. 絶対値法
2. 自乗平均法(SRSS)
3. 絶対値法と自乗平均法の併用
4. CQC法

Epistola Vol.25  
建設省建築研究所発行:1999.8 より



## まとめ

- KAGRAではミラーを入れるクライオスタットと放射シールドの実機が完成しテスト中
- クライオスタットのハンマリング試験とモード解析を比較し固定方法を変えた解析で1次,2次,4次~6次モードまで大体固有周波数が合った
- 放射シールド内部に振動計を置いて測定した結果では放射シールドの1~5次モードとクライオスタットの1,2次モードのピークを確認できた
- 放射シールドについて冷凍機振動と地盤振動の応答スペクトル解析をした。結果については実際に振動計にて測定した結果と比較検証する必要がある。

## 冷凍機入力振動データとその応答スペクトル解析結果例