

大規模有限要素解析モデルの 軽量化について

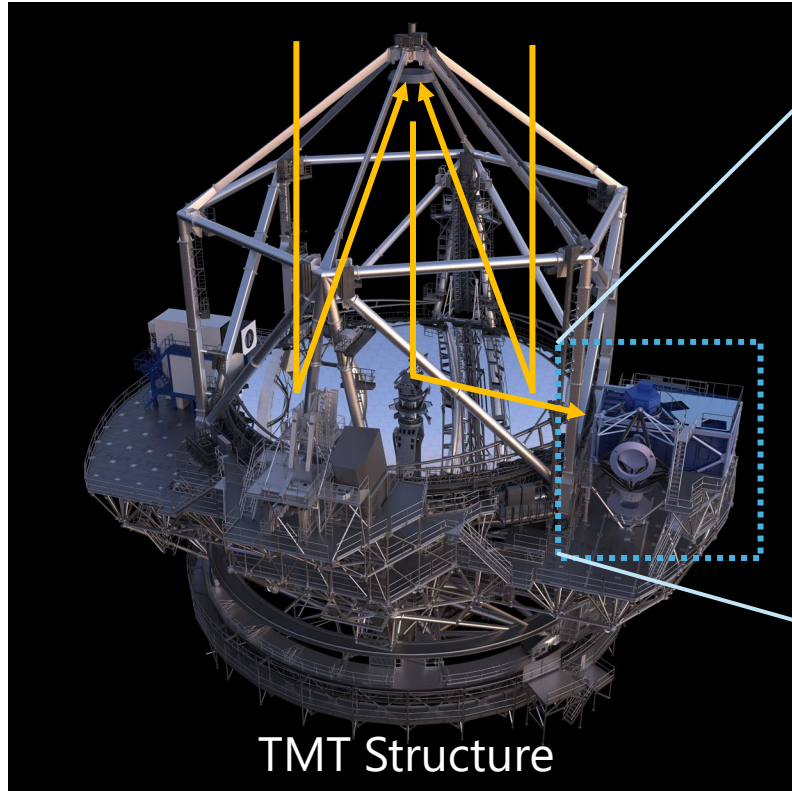
第44回 天文学に関する技術シンポジウム

2025/04/17

国立天文台

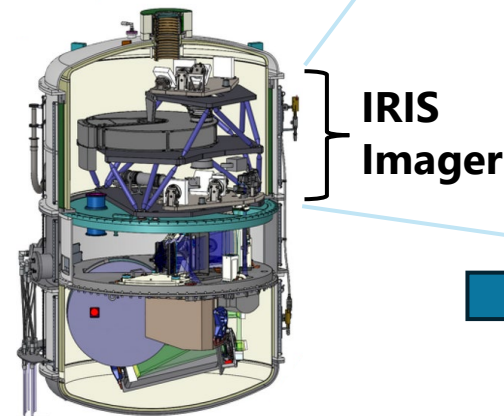
清水 莉沙、池之上 文吾、大淵 喜之(先端技術センター)
鈴木 竜二(TMTプロジェクト)

TMT第一期観測装置IRIS



近赤外線撮像分光装置 IRIS

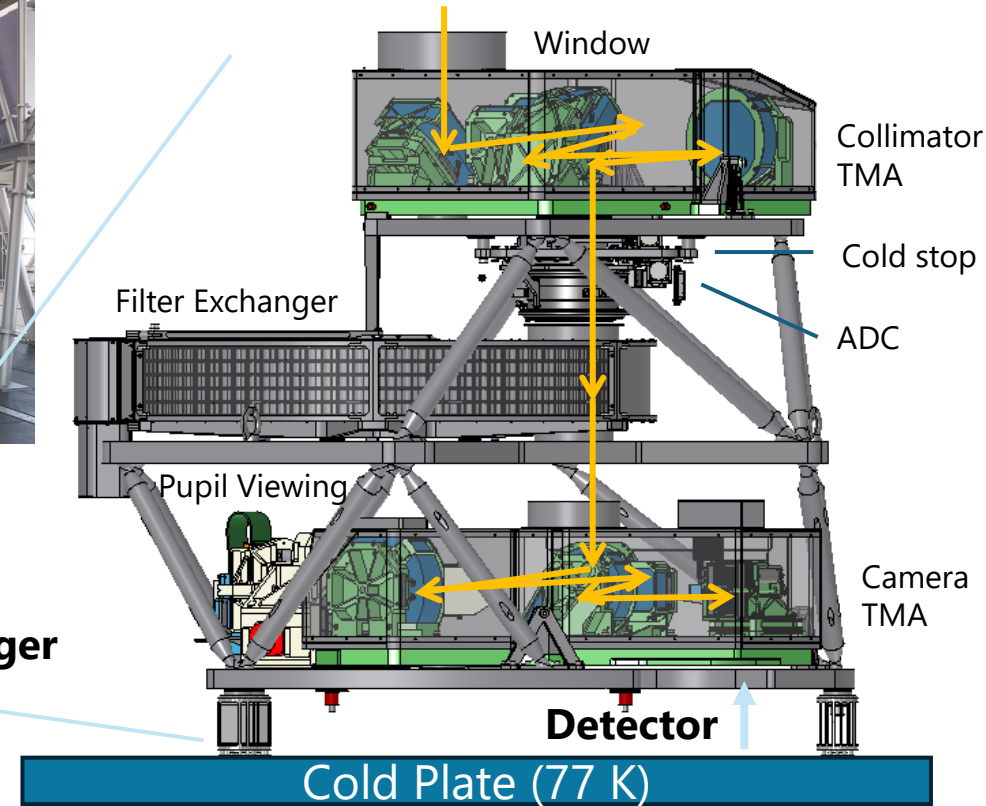
- ・ NFIRAOSに吊り下がっている
- ・ IRIS撮像部は3階構造
- ・ 複数のサブシステムによって構成



NFIRAOS

Narrow Field InfraRed Adaptive Optics System

狭視野赤外線補償光学系



光学素子の振動が結像性能に与える影響

- 光学素子が振動すると、像が振動して観測感度に影響が及ぶ

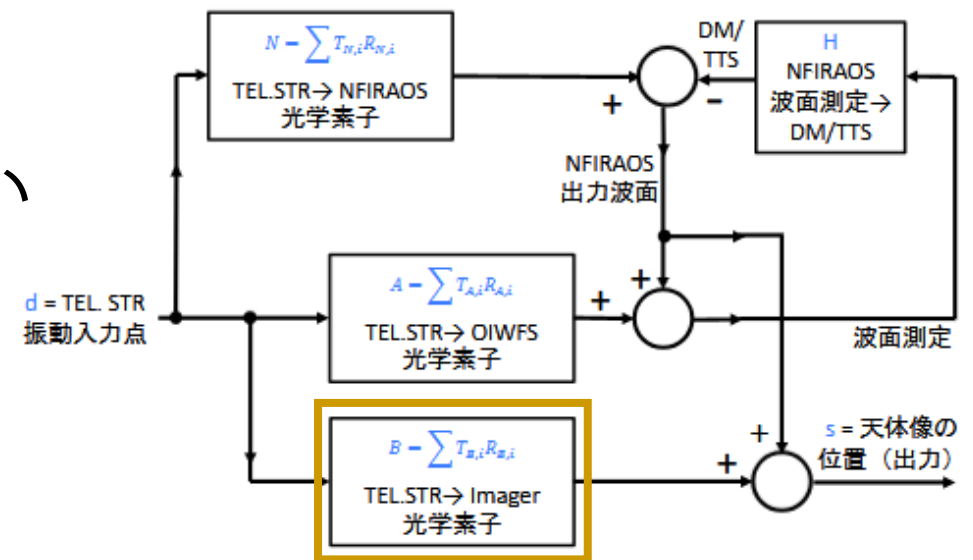


- 望遠鏡I/Fから入力される振動がIRISの結像性能に与える影響を計算したい

- その計算のためには…
望遠鏡入力点から各光学素子までの伝達関数が必要

- 伝達関数 (Transfer Function)
システムの入力と出力の関係を表す関数
振動解析 (周波数応答解析) によって算出

$$\frac{s}{d} = N \left(\frac{1}{1+H} \right) + B - A \left(\frac{H}{1+H} \right)$$

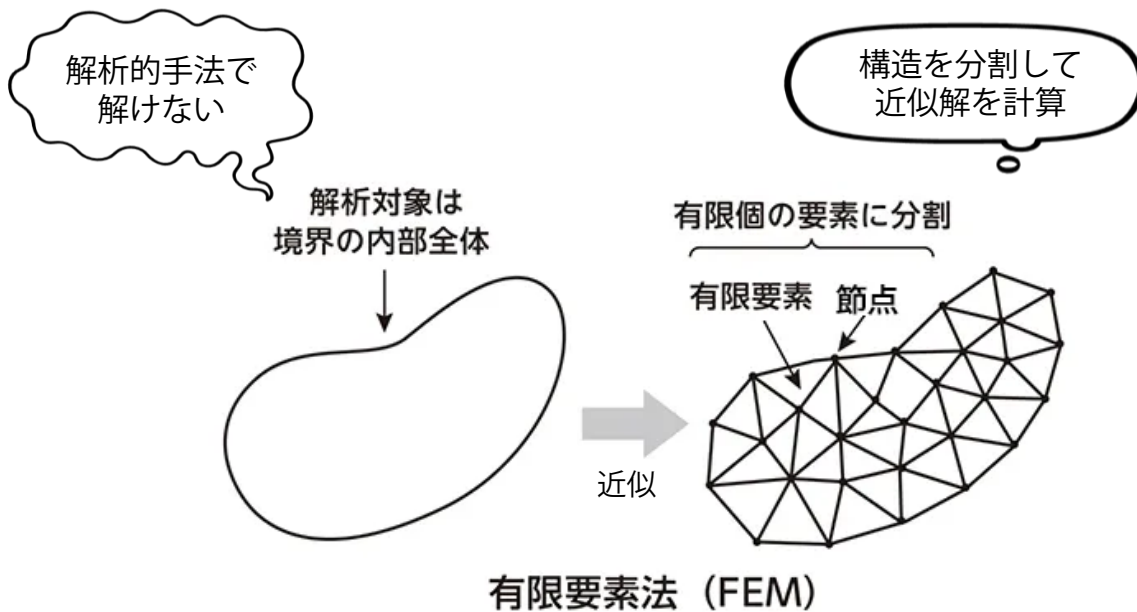


振動解析に用いるコントロールダイアグラム
(参考) 鈴木竜二「第一期観測装置IRISの振動解析」(2022)

有限要素法

- 有限要素法とは

- 複雑な形状や材質の物体・構造物の解析に使われる数値解析手法
- 試作や実験による評価回数を減らし、設計・開発コストを大幅削減
- 構造（強度、**振動**）、熱、流体、電磁気などいろいろな分野で活用

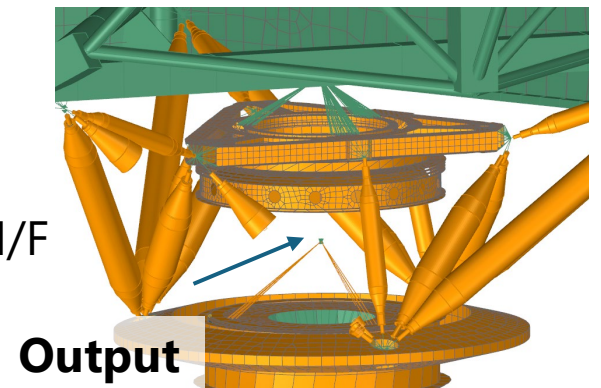
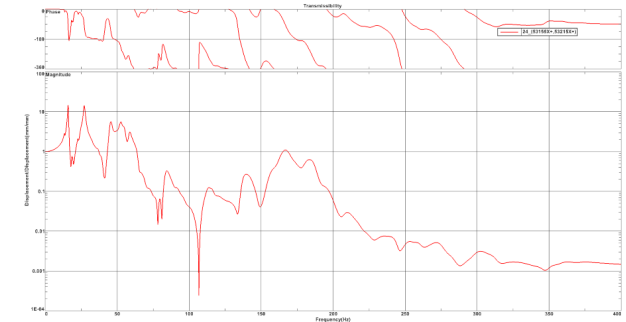
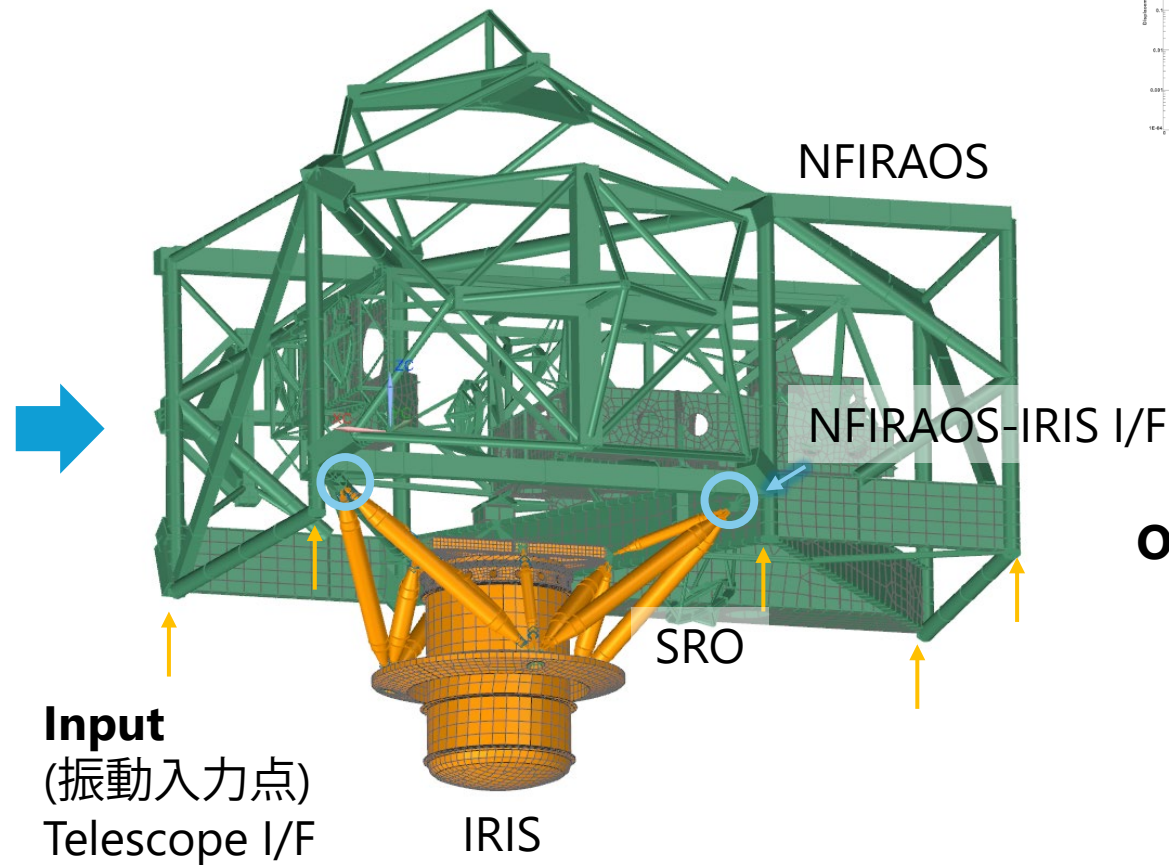
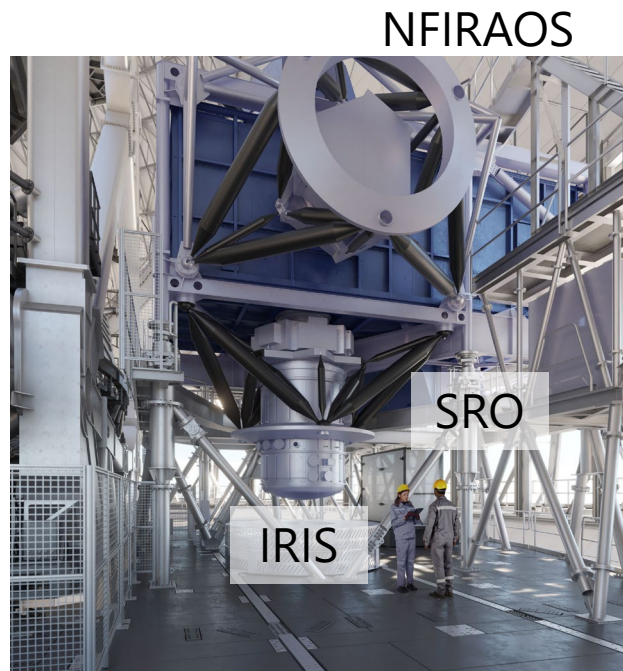


<https://www.asahi-kasei-plastics.com/knowledge-cae/plastics-cae1/>

1. 解析対象物を単純な形状をした要素に分割
2. 要素の未知量（変位量や温度等）を簡単な関数で仮定
節点値を用いて要素を定式化
3. 各要素の方程式を組み合わせて全体の方程式を得る

国立天文台先端技術センター
システム設計グループ熱構造設計チームでは
有限要素ソルバーとして
Siemens社のNX Nastranを使用中

過去のIRISの振動解析モデル



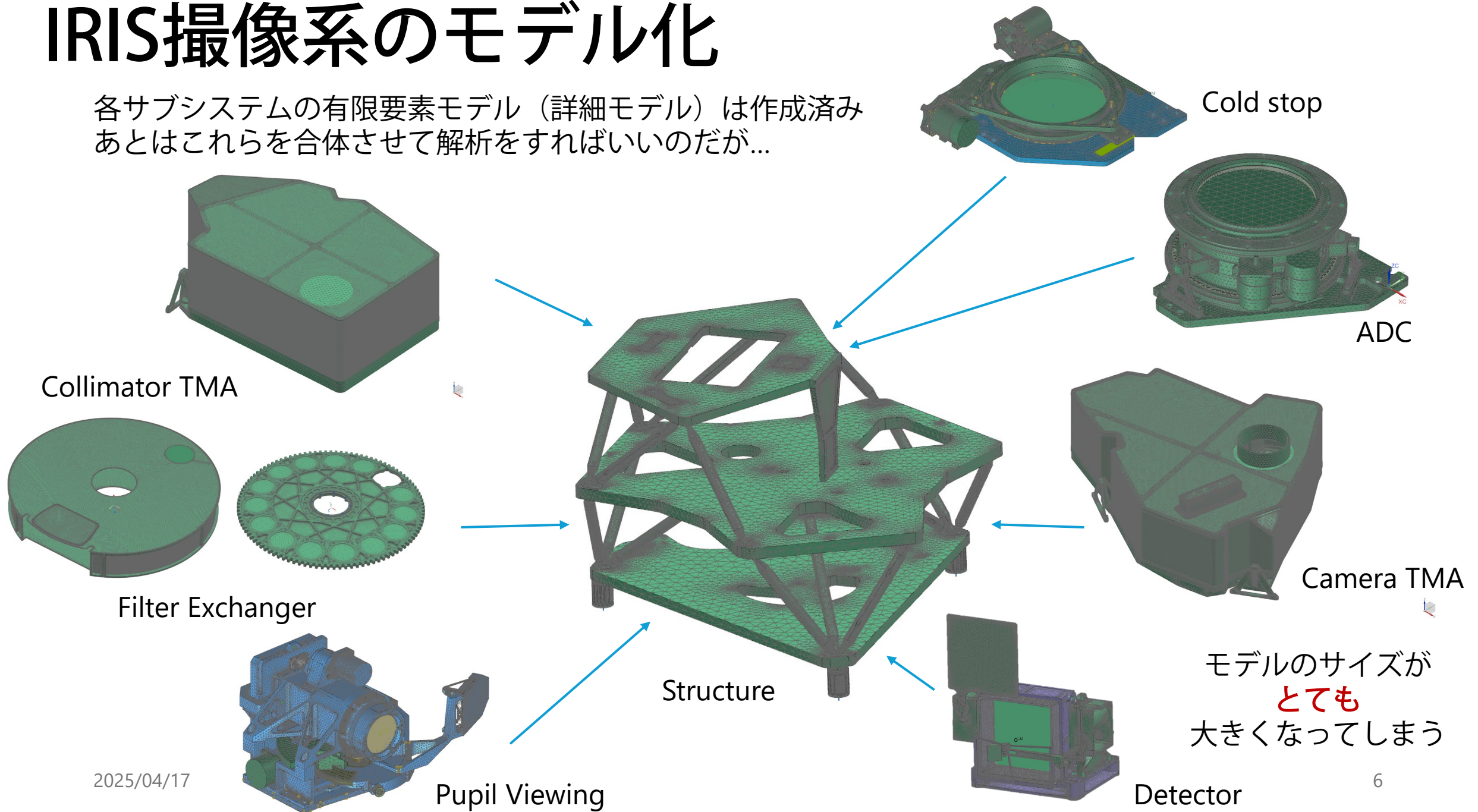
IRIS撮像系は
代表質点1点で表現
↓
サブシステムは省略

前回のレビュー（ Preliminary Design Phase ）時に
作成した伝達関数算出用有限要素(FE)モデル

より詳細な結像性能の評価のためにはIRIS撮像系各サブシステム・光学系を再現したモデルが必要

IRIS撮像系のモデル化

各サブシステムの有限要素モデル（詳細モデル）は作成済み
あとはこれらを合体させて解析をすればいいのだが...



モデルのサイズが大きいことで起きる弊害

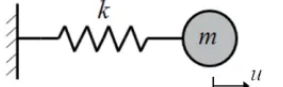
- 計算に時間がかかる
 - 一回にかかる時間が長いと、繰り返しの計算がしにくい
 - 1日かけても解析が終わらないかも…
 - 解析がエラーで止まる
 - 長い時間計算するので何かとトラブルが起きる
 - 一時ファイル（スクラッチファイル）が大きくなりすぎてディスク容量不足とか…
 - 退勤前に解析を始めて翌朝解析が止まっているとかなり萎える
 - とにかくデータ量が大きい
 - 読み込みの量が多くファイルを開くのに時間がかかるため
すぐに結果を閲覧できない
 - コマンドの処理も遅くなる
 - 当然結果のファイルも大きい
- 解析に使う計算機をアップグレード？
個人のPCで計算できる程度までモデルを軽量化する？

物体の振動特性について

- 振動

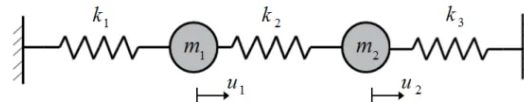
- 構造物の振動特性は、主に構造物の質量 m と剛性 k が影響

1自由度系の非減衰自由振動の運動方程式


$$m\ddot{u} + ku = 0$$

固有振動数 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

2自由度系の非減衰自由振動の運動方程式


$$\begin{aligned} m_1\ddot{u}_1 + k_1u_1 + k_2(u_1 - u_2) &= 0 \\ m_2\ddot{u}_2 + k_2(u_2 - u_1) + k_3u_2 &= 0 \end{aligned}$$

固有振動数 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}, \sqrt{\frac{3k}{m}}$

多自由度系の非減衰自由振動の運動方程式

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}$$

質量マトリクス 剛性マトリクス

固有方程式 $(\omega^2[M] + [K])\{X\} = \{0\}$ を解くと
固有値・固有振動数が得られる

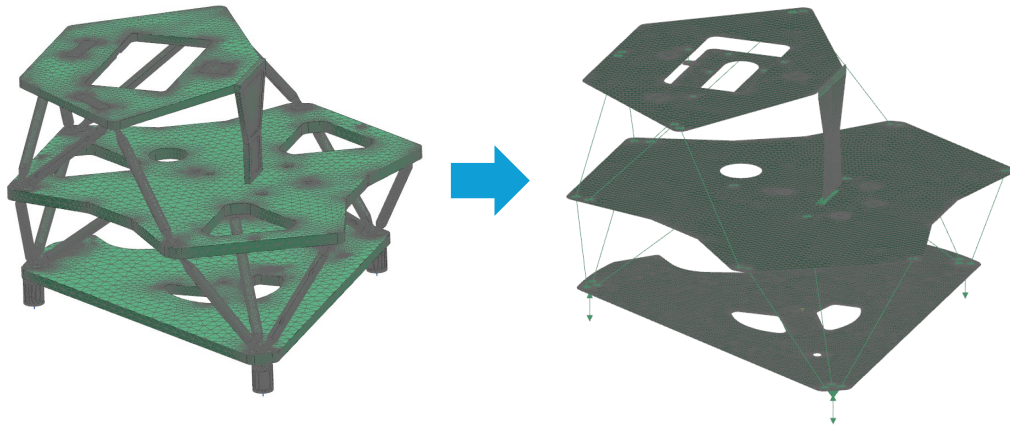
固有振動数は系の自由度の数だけ存在

自由度を下げれば
計算量も減る

有限要素モデルの軽量化を図る方法

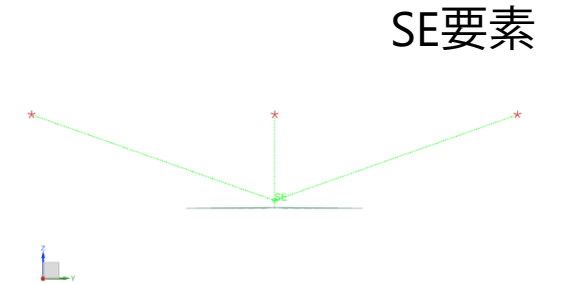
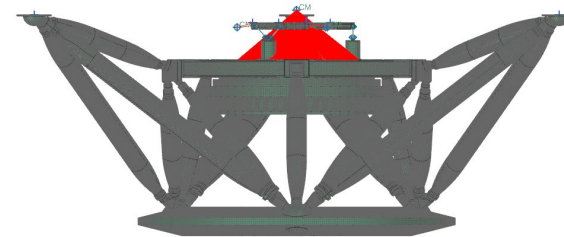
モデルの要素数・自由度を減らす！

- モデルの簡略化



モデルの特性を損なわないようにしながら
2D要素や1D要素に置き換える

- スーパーエレメント(SE)を使用



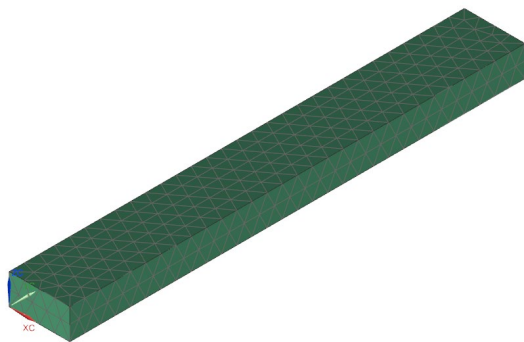
スーパーエレメント機能でモデルを分割して計算する

モデルの簡略化

有限要素法で使われる要素の種類

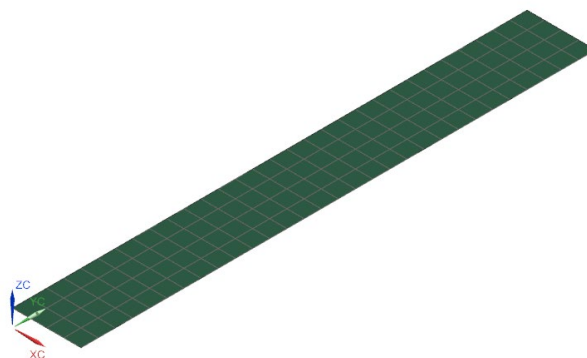
← 要素数多

要素数少 →



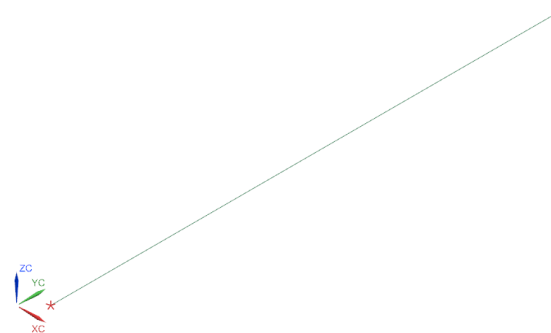
3D要素（ソリッド要素）

3次元の立体形状をした要素
元となる3Dモデルの形状のまま
簡単にメッシュを作成できる



2D要素（シェル要素）

面で構成された要素
計算上は板圧分の剛性を持つ
板形状のものに適する



1D要素（ビーム要素）

節点と線で繋いだ
最もシンプルな要素
棒、円筒などに適する
複雑な形状には向かない

0D

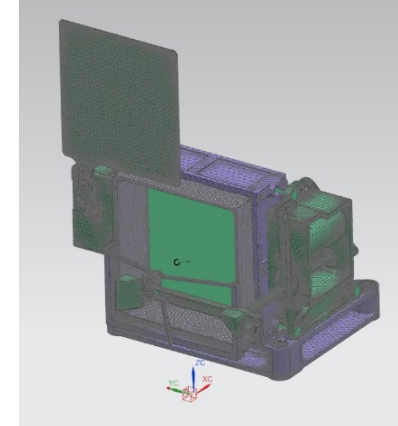
0D要素（質点）

質量・慣性モーメントだけをもつ要素
質量や慣性の影響をモデルに与える

モデル簡略化の大まかな流れ

① 詳細解析モデルの作成(Reference)

- 振動解析を実施
- 固有振動数の計算

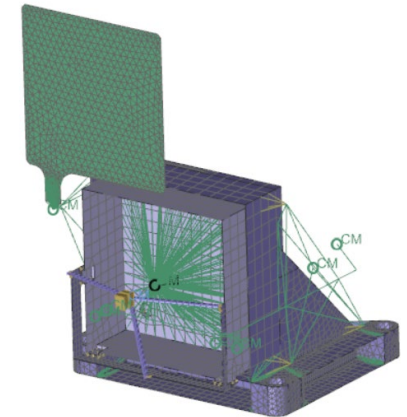


② 3D要素の置き換え

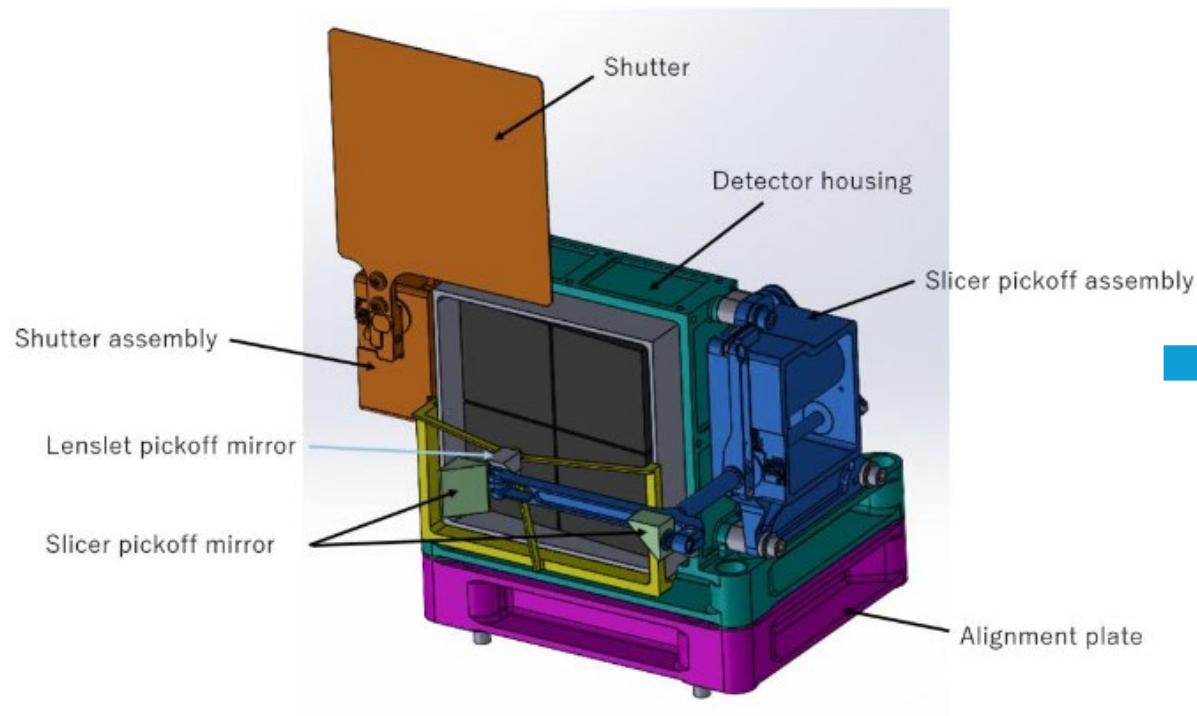
- 3D要素を2D要素や1D要素に置き換える

③ モデルの調整

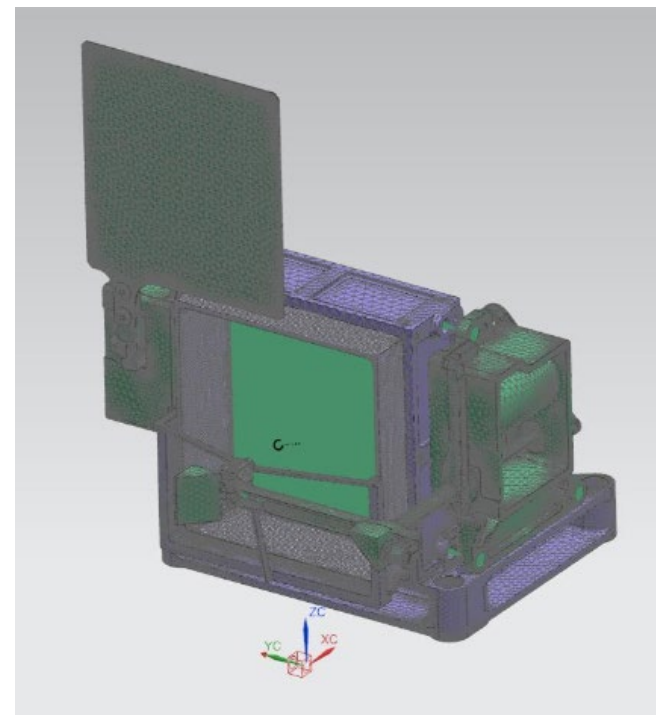
- 詳細解析モデルと比較しながら、材料や形状を調整する



① 詳細解析モデルの作成



CADモデル



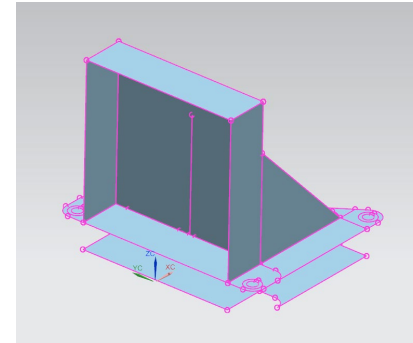
FEMモデル

CADモデルをもとに解析モデルを作成
振動解析を実施

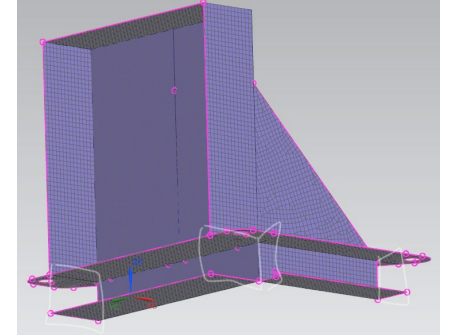
② 3D要素の置き換え

1. 2D要素への置き換え

- 3Dモデルをもとに中立面の作成
- 中立面に2D要素を作成する
- 厚みの設定は基本的にはモデル通り
(のちに薄くしたりと調整する)
- 2Dにするのが難しい箇所は3D要素のままとする



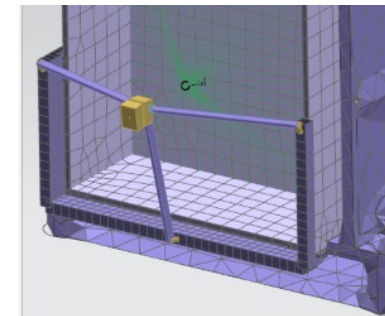
中立面の作成



2D要素の作成

2. 1D要素への置き換え

- 棒形状などは1D要素（ビーム要素）に置き換える
- ビーム断面形状はできるだけ実際に寄せる



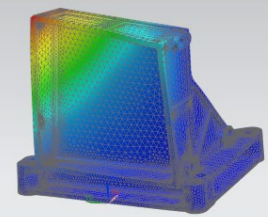
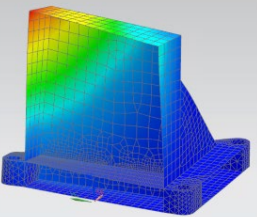
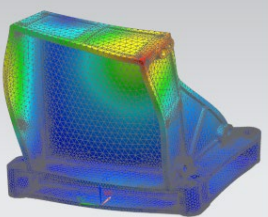
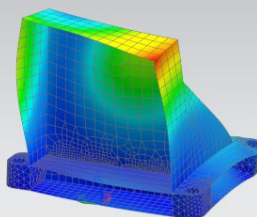
1D要素の作成

3. 剛体要素、0D要素への置き換え

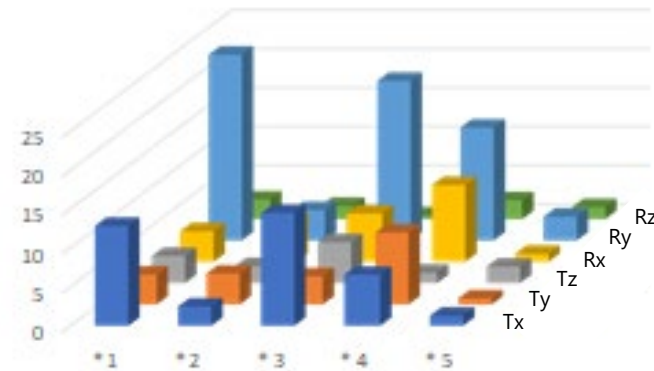
- 剛性に寄与しないようなものは
剛体要素や0D要素に置き換える

③ モデルの調整

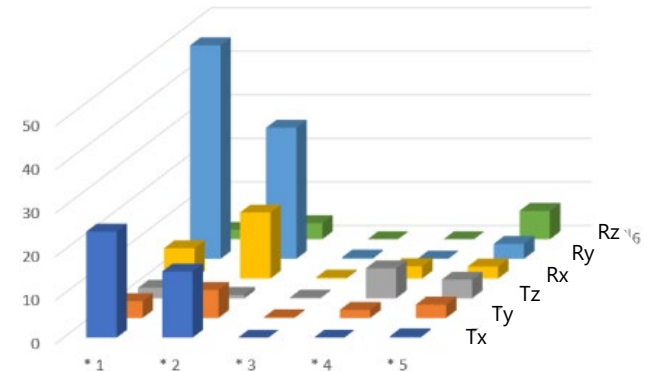
- ・ 簡略化モデルを解析して、詳細モデルと結果を比較をする
 - ・ 質量・重心などのプロパティ
 - ・ モードシェイプや固有振動数
 - ・ 有効質量比

	Detailed model	Simplified model
#1	661.492 Hz	536.858 Hz
		
#2	1903.03 Hz	1671.01 Hz
		
#3	2211.49 Hz	2181.52 Hz

モードシェイプ・固有振動数の比較



詳細解析モデル



簡略化モデル

有効質量比の比較

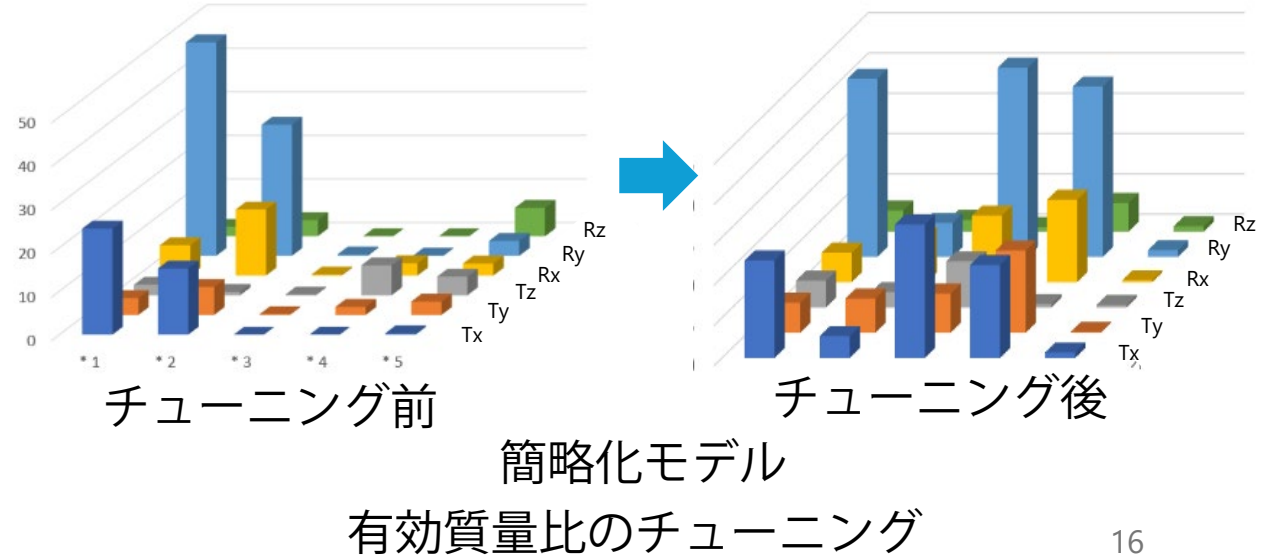
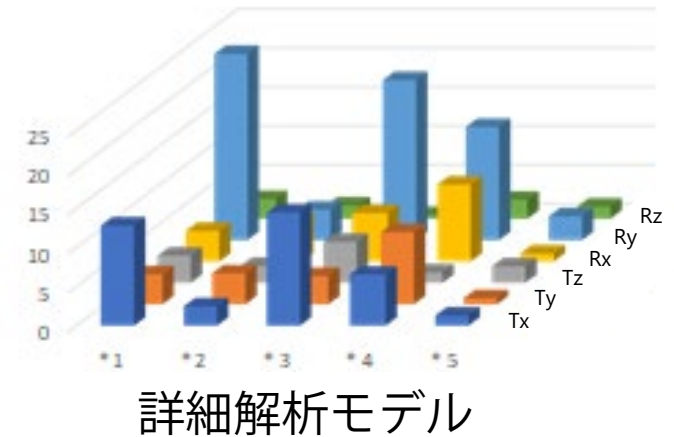
固有振動のうちどの振動モードが
支配的となるかを判断する指標

③ モデルの調整

- 各振動モードと有効質量比を合わせるために
 - モードシェイプやひずみエネルギーの分布調整箇所を確認
 - 片持ち梁の固有振動の式

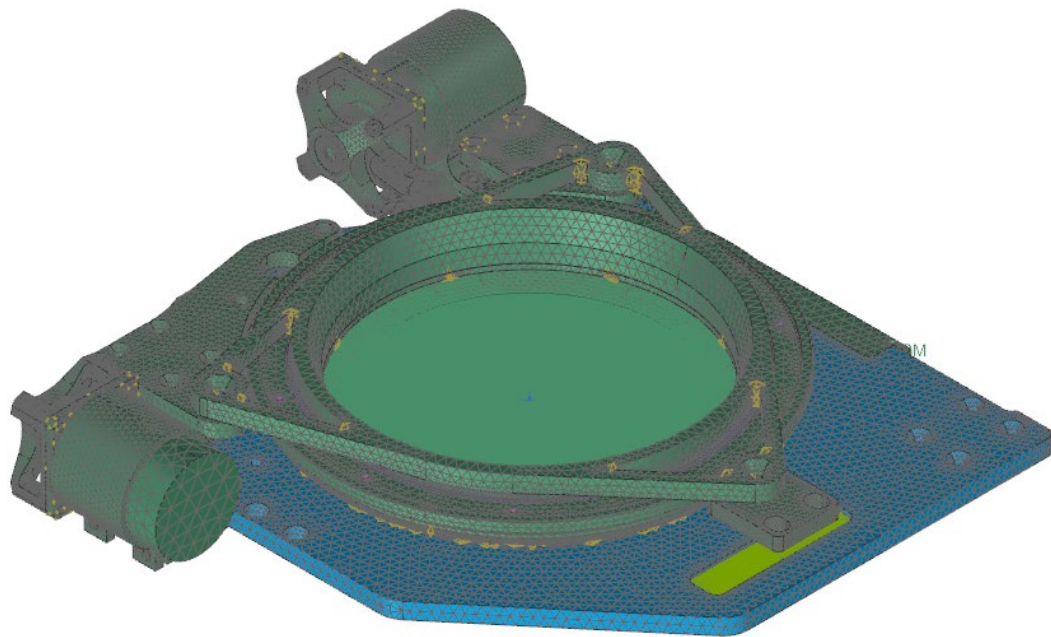
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m/k}}$$
$$k = \frac{3EI}{L^3}$$

をもとに調整
 m を変える：材料特性（密度）
 I を変える：厚みなど
 E を変える：ヤング率



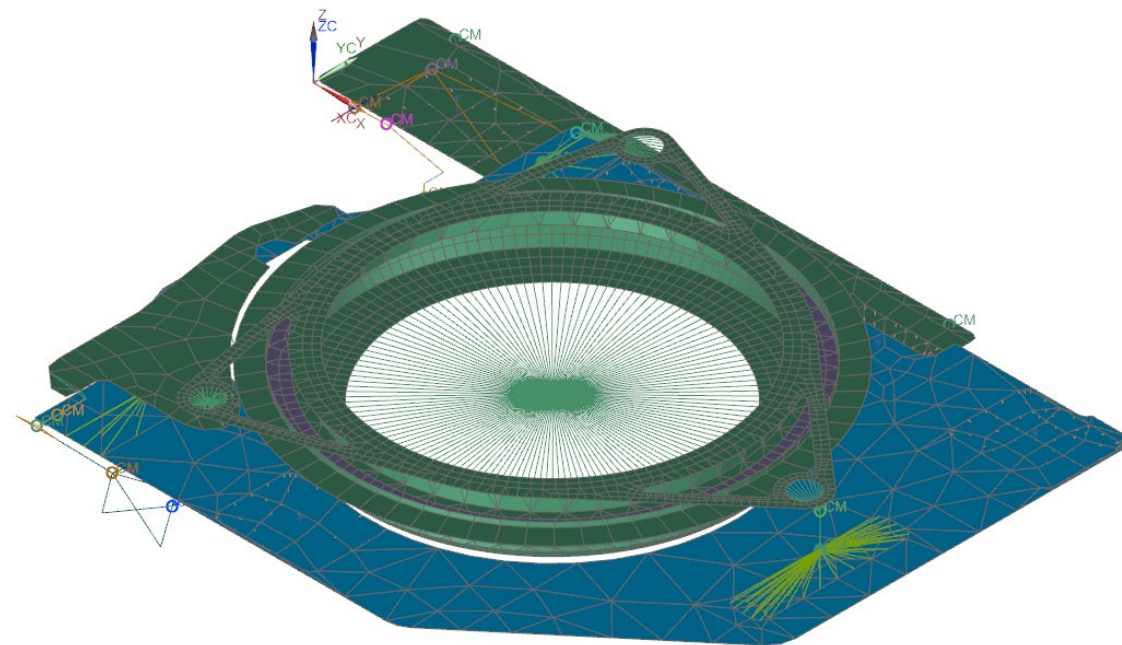
IRIS撮像系の簡略化の例：Cold stop

Cold stop: 副鏡サポート構造からの熱輻射による影響を抑えるためのマスク



詳細モデル

要素数	600,000
ノード数	1,060,000
自由度	3,130,000

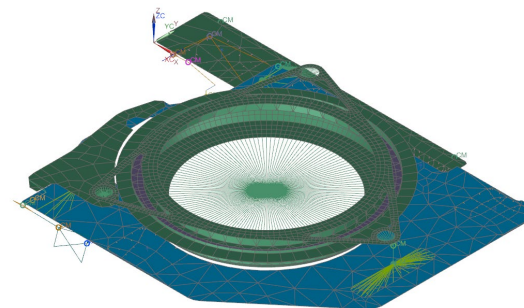
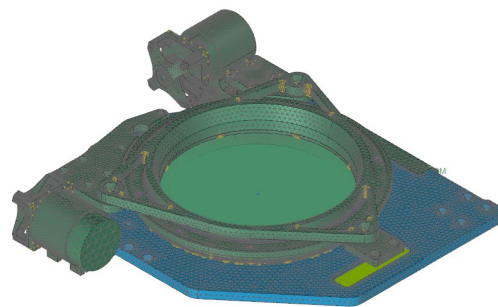


簡略化モデル

要素数・自由度
1/100以下に削減

要素数	3,500
ノード数	4,500
自由度	23,400

重心や慣性能率の比較 (Cold stop)

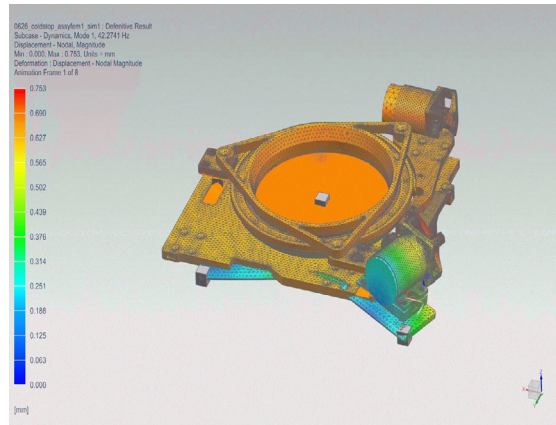


		詳細モデル	簡略化モデル	Error [%]
質量 [kg]		2.47	2.39	-3.35
重心の座標 [mm]	x	115.95	117.55	1.38
	y	-65.44	-63.48	-3.01
	z	16.28	16.82	3.28
慣性能率 [kg・mm ²]	xx	21645.94	20453.67	-5.51
	yy	43592.81	43636.48	0.10
	zz	63048.60	62012.92	-1.64
	xy	-19650.59	-18836.80	-4.14
	yz	-2830.03	-2755.81	-2.62
	xz	4833.32	4790.10	-0.89

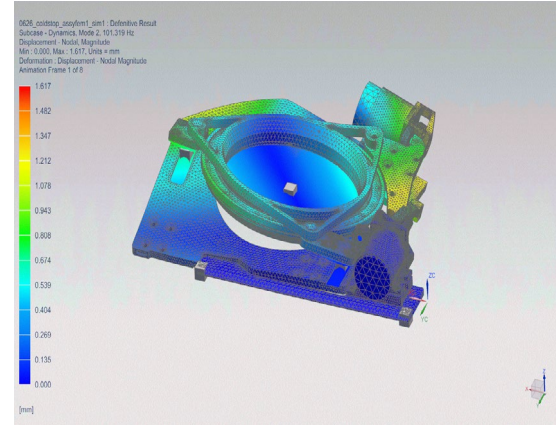
詳細モデルを基準として、質量や重心、慣性能率の誤差を詳細モデルに対して5%目安に収める

モードシェイプの比較 (Cold stop)

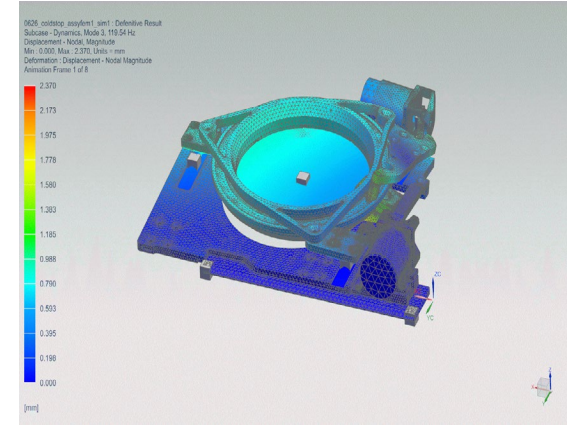
詳細モデル



42.3 Hz

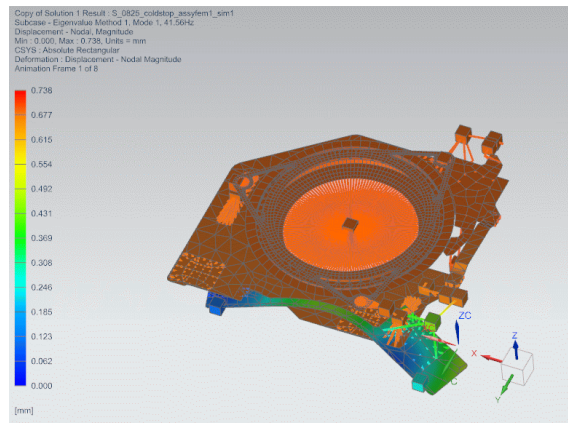


101.3 Hz

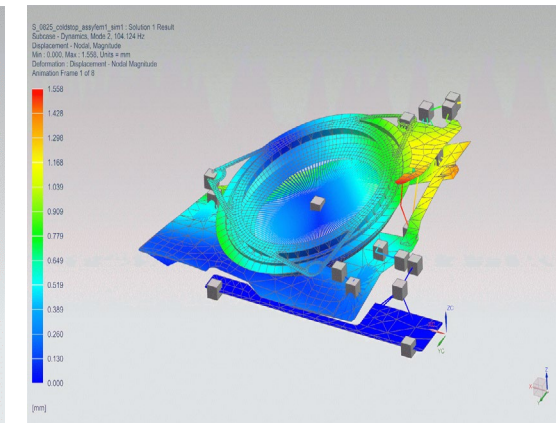


119.5 Hz

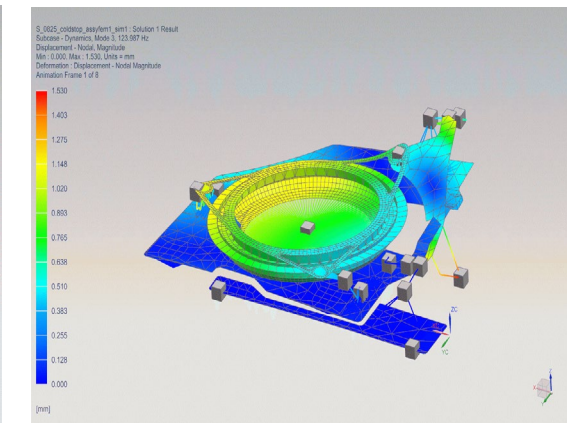
簡略化モデル



40.6 Hz



104.1 Hz

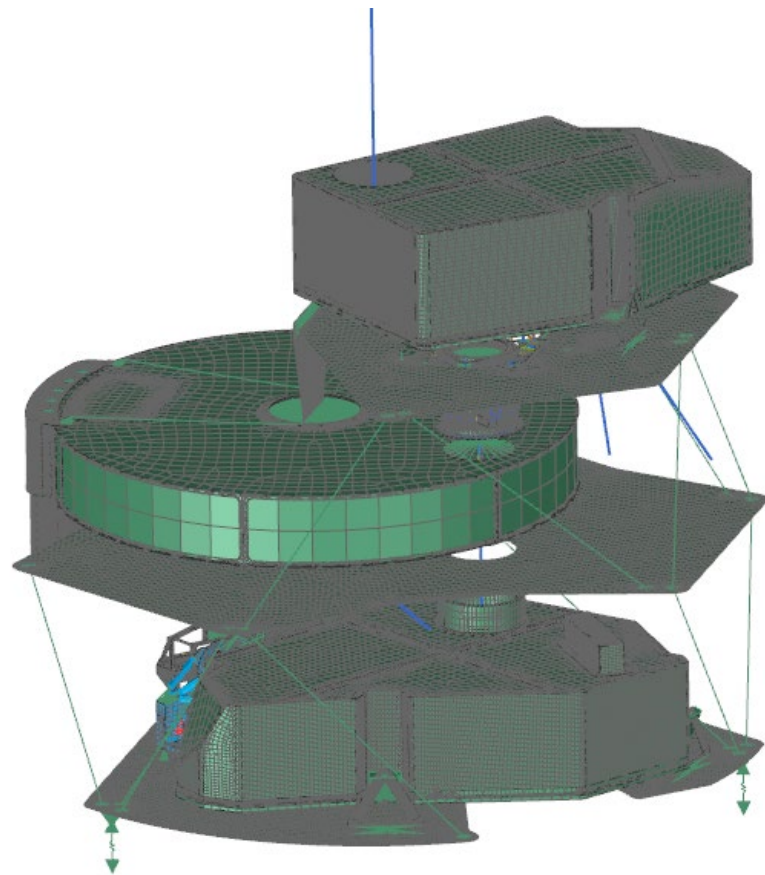


124.0 Hz

詳細モデルを基準として、固有振動数の誤差も5%に収める（~200 Hz）

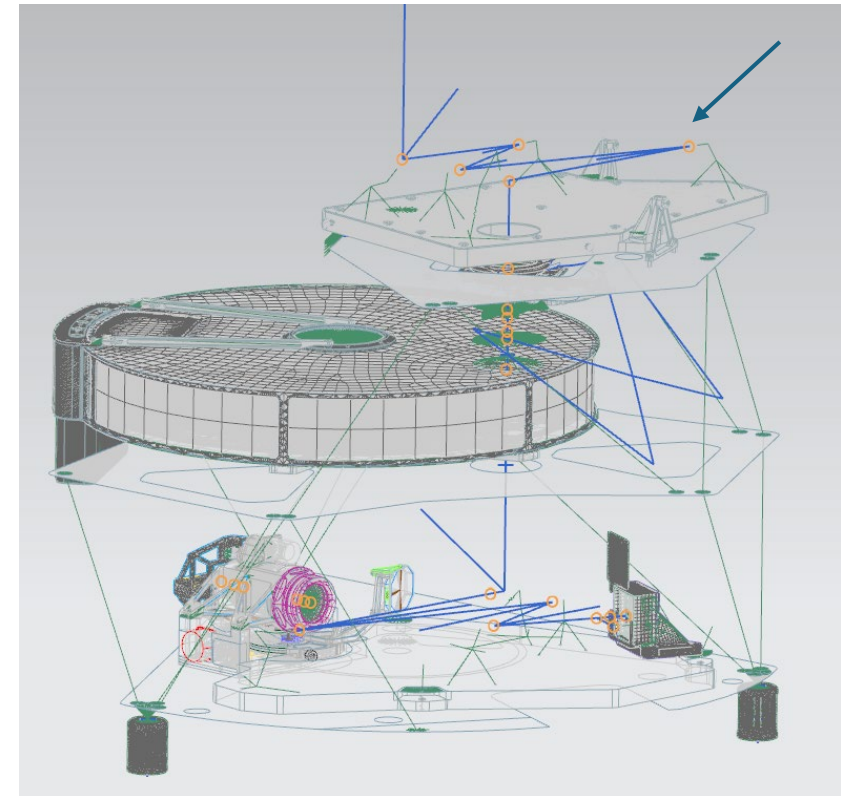
簡略化モデルで構築したIRIS撮像系のモデル

撮像系のサブシステムはすべて簡略化モデルによって構築
熱構造設計チームに所属する技術職員3名で作成



要素数 360,000
ノード数 400,000
自由度 195,000

光学素子のノード



一つのサブシステムの詳細モデルと同等のサイズまで軽量化できた

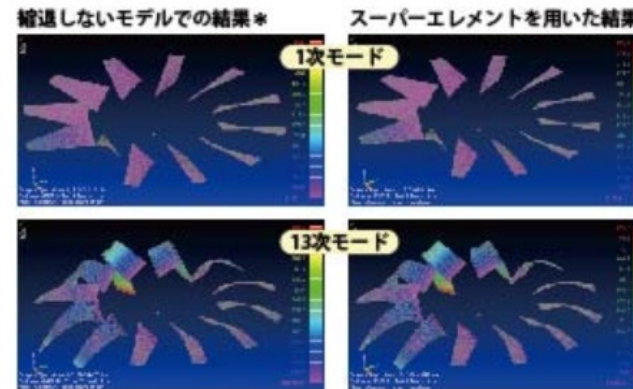
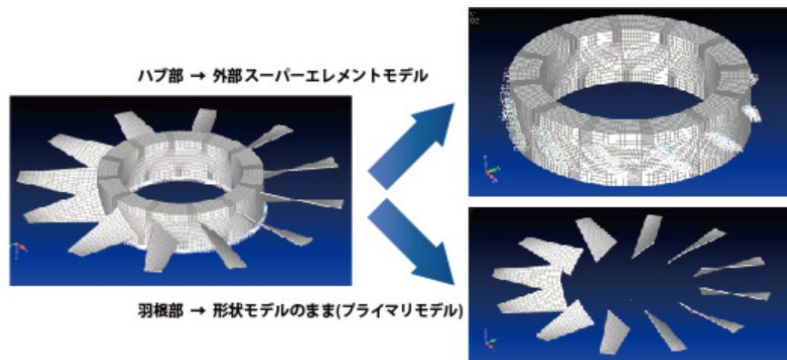
モデル簡略化の所感

- 高次までの再現はとても難しい
 - 完璧に模擬するのは難しい
ある程度で切り上げないと徒に時間が過ぎていく…
 - モデルの修正点はメモをしっかりとる
調整した場合にどんな変化を与えたか、与えた結果どう結果が変わったかを記録する
- あくまでも詳細解析モデルに合わせた結果でしかない
 - 実際とあっているかは、結局ものを作ってみないと分からない
- 大変で時間もかかる作業であったが、個人的にはかなり勉強になった
 - 有限要素法モデルを作る際に必要なテクニックや結果の見方など
短期間に多く学ぶことができた

スーパーエレメント

スーパーエレメント(SE)機能とは

- NX Nastranの機能のひとつ
- 大規模なモデルを分割して解析し計算負荷を軽減
 - あるパートに関してあらかじめ別の解析を実施
剛性、質量、減衰、荷重分布等の情報＋外部接点の情報のみに省略
→この要素をスーパーエレメントと呼ぶ
 - スーパーエレメントは外部接点の自由度しかもたない



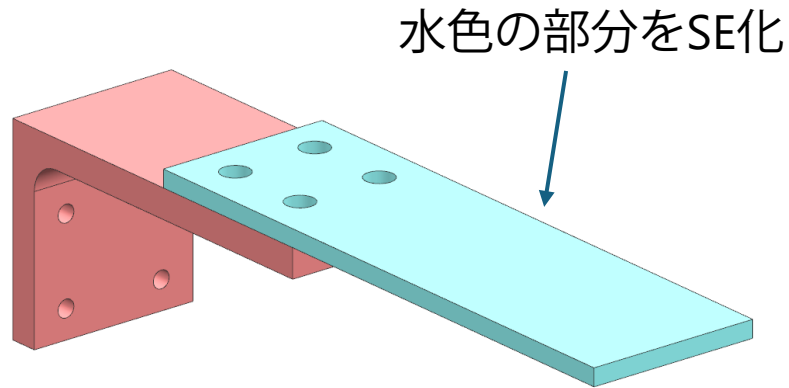
■ 固有振動数の比較 ■

固有値(次数)	縮退なし(Hz)	縮退あり(Hz)
1	7.91	7.91
5	7.91	7.91
13	276.45	276.45
25	673.41	673.41
37	901.13	901.13
50	1627.34	1627.34

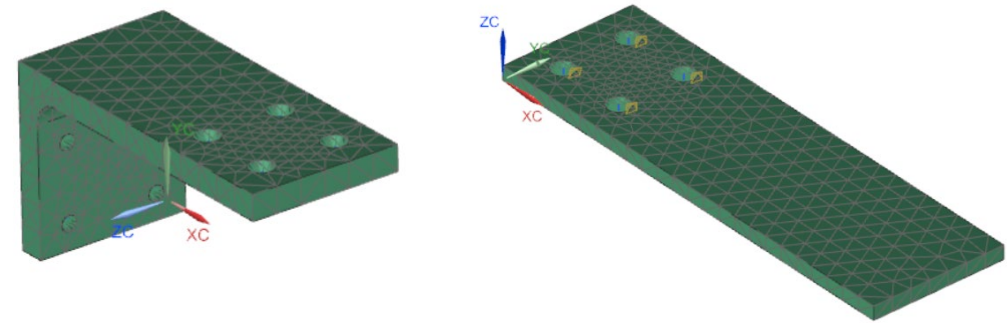
縮退なし : 1分15秒
ハブ部の縮退 : 6分40秒
羽根+SEモデル : 5秒

<https://www.cae-nst.co.jp/cases/nxn047/>

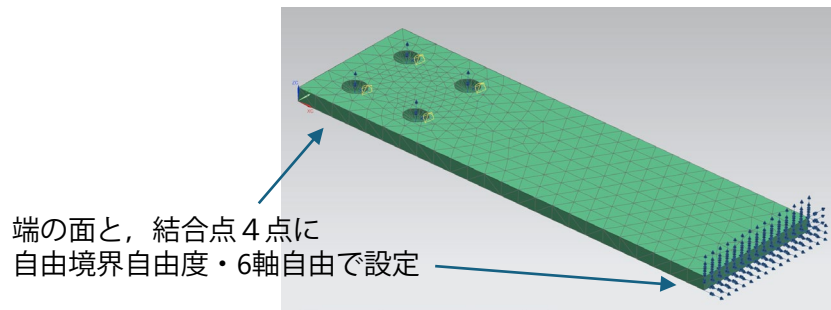
SEを含むモデルを作成する手順



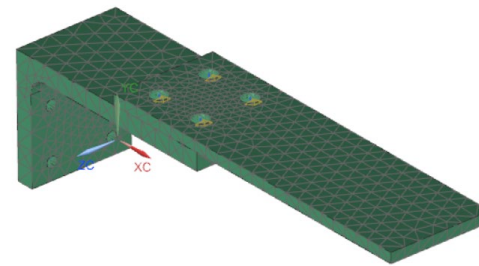
1. アセンブリファイルを用意する



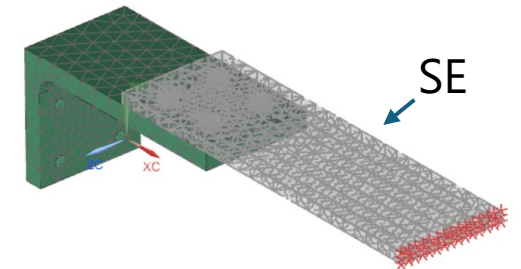
2. それぞれのパートに関して
メッシュを切って材料を割り当てる



3. SE化したいパートだけ
解析して結果を得る



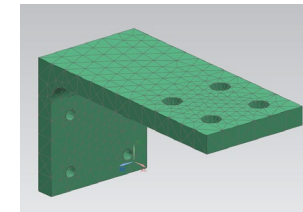
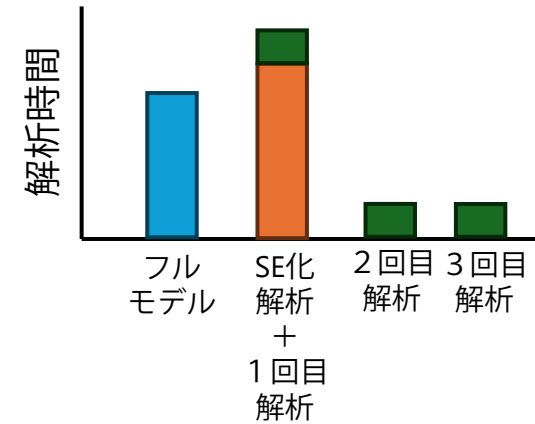
4. アセンブリに有限要素パートを
割り当てる



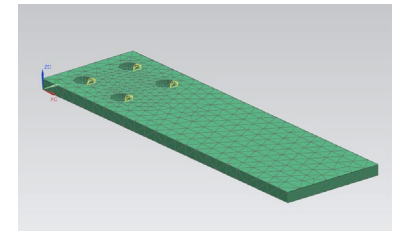
5. SE化するパートに
3.の解析結果を読み込ませる

スーパーエレメントが有効な場面

- 一部分だけ繰り返しの計算があるとき
 - 設計変更がある部分以外をSE化すれば、計算時間の短縮につながる
- モデルが大きいけど、どうにか解析したいとき
 - 自由度を落とし、分割して解析ができる
普通のマシンでは回せないような
大規模なモデルも解析が可能に
- 中の詳細な構造を知られたくないとき
 - SE化することで部品としての
剛性・振動特性情報だけを外部に出せる
構造の情報をブラックボックス化



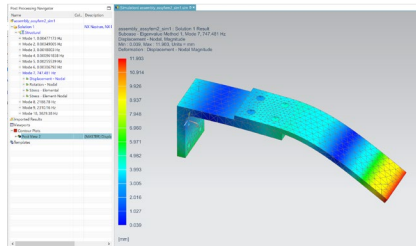
変更がある部分
→そのまま



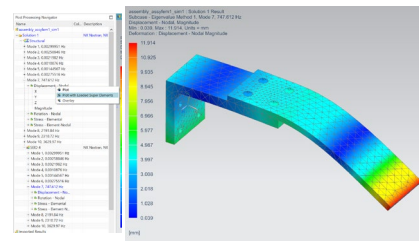
変更なし→SE化

スーパーエレメントを使用した所感

- SE使用時の精度は、SE生成時に抽出したモード数で変わる
 - 抽出モードが少ないと誤差が出るので、SE生成時の計算負荷が大きい



通常解析モデル

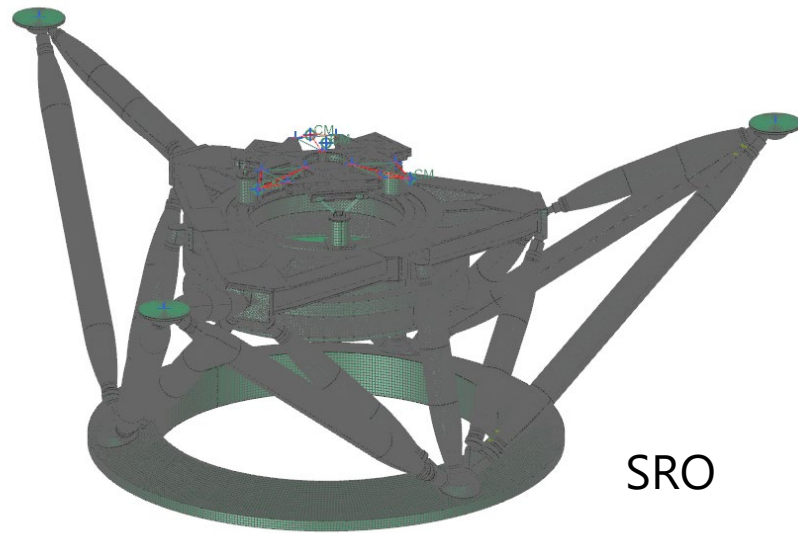


SEを使用した解析モデル

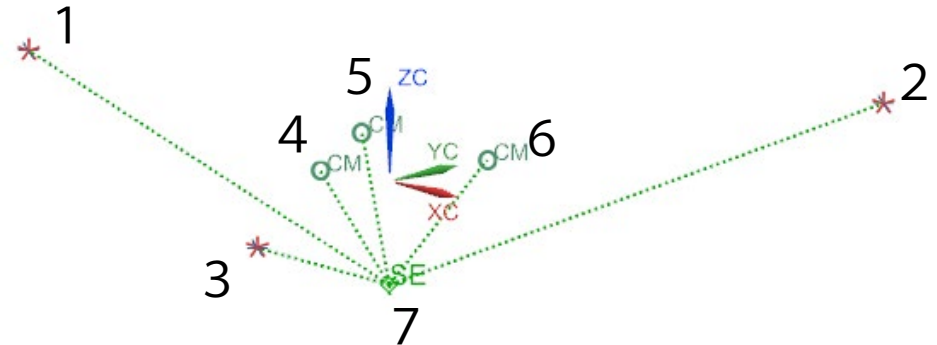
	従来[Hz]	スーパーエレメント[Hz]	誤差[%]
1	747.481	747.612	0.017526
2	2188.78	2191.84	0.139804
3	2310.16	2310.72	0.024241
4	3629.38	3629.97	0.016256

- 解析結果は見づらい
 - SE部分と通常モデルの結果は別に表示される
- SE生成時の境界条件をはじめ、様々な設定があり習熟が必要
 - 現状のところ計算時間はそこまで短縮されていない（使いこなせていない…）
- SEが使えないソリューションがあるなど、制約がある
 - NXの場合、普段伝達関数の算出に使っていた方法が使えなくて苦心

IRISのモデルへの適用

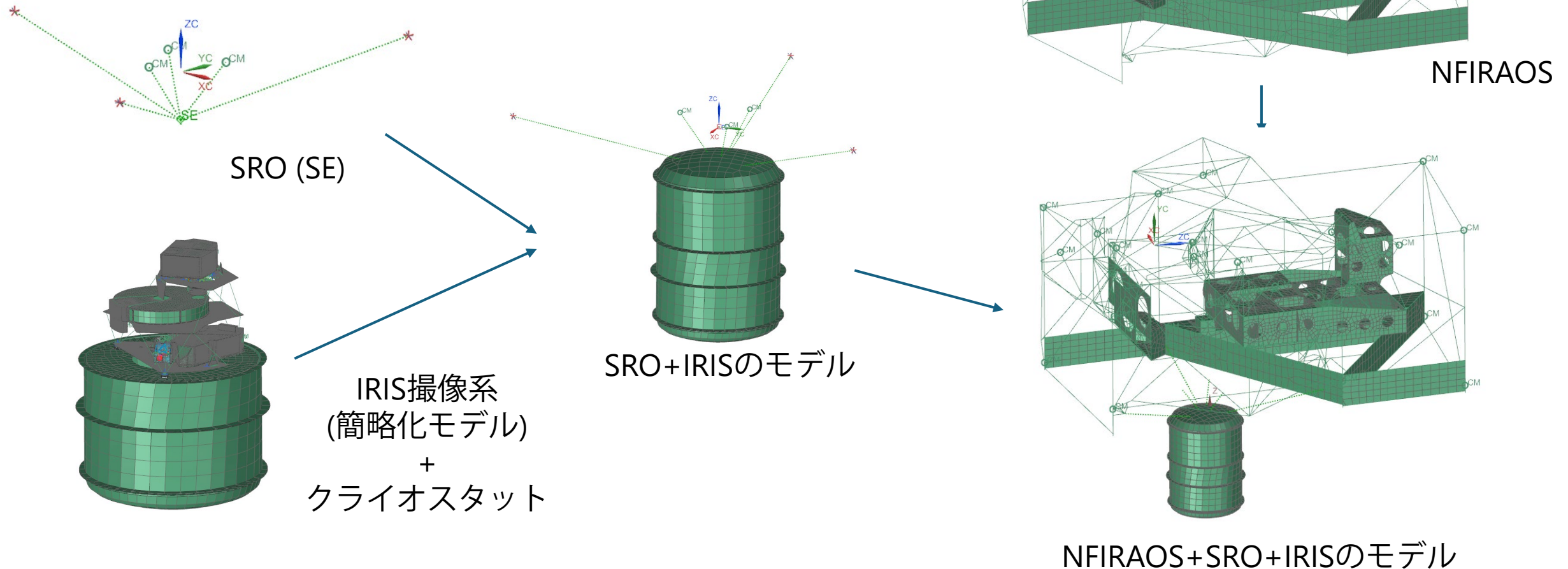


要素数	970,000
ノード数	1,800,000
自由度	5,500,000

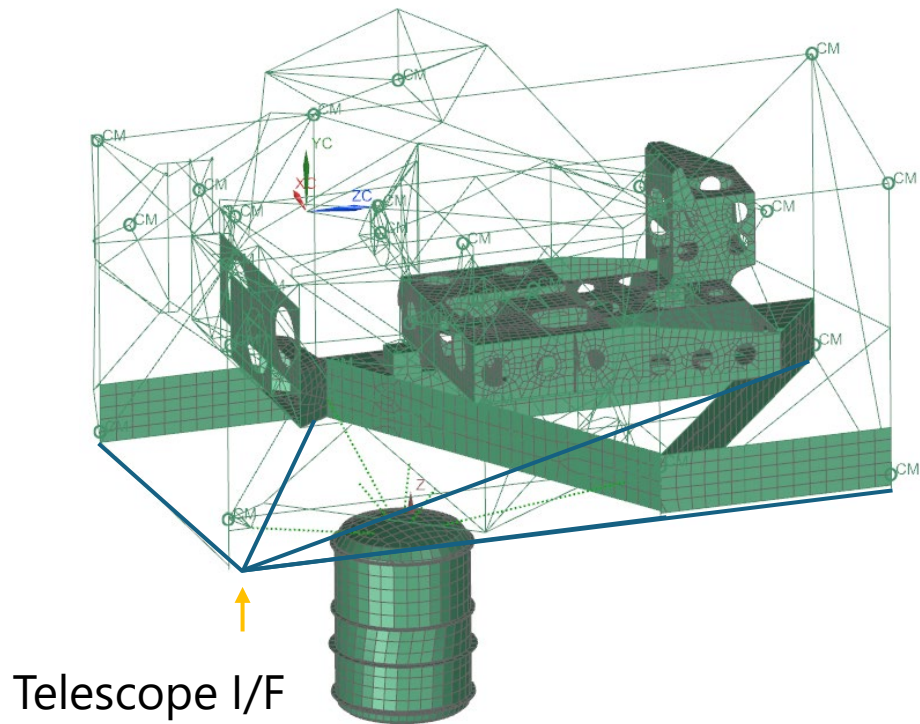


42

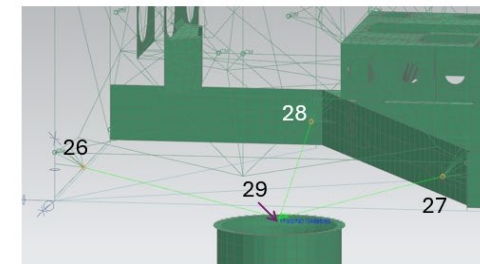
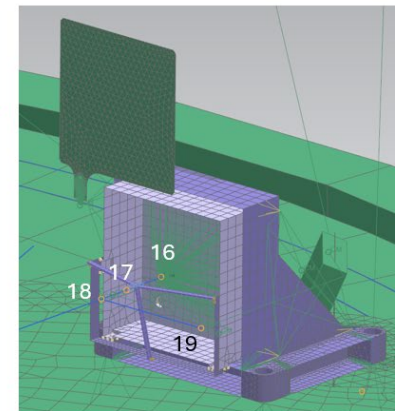
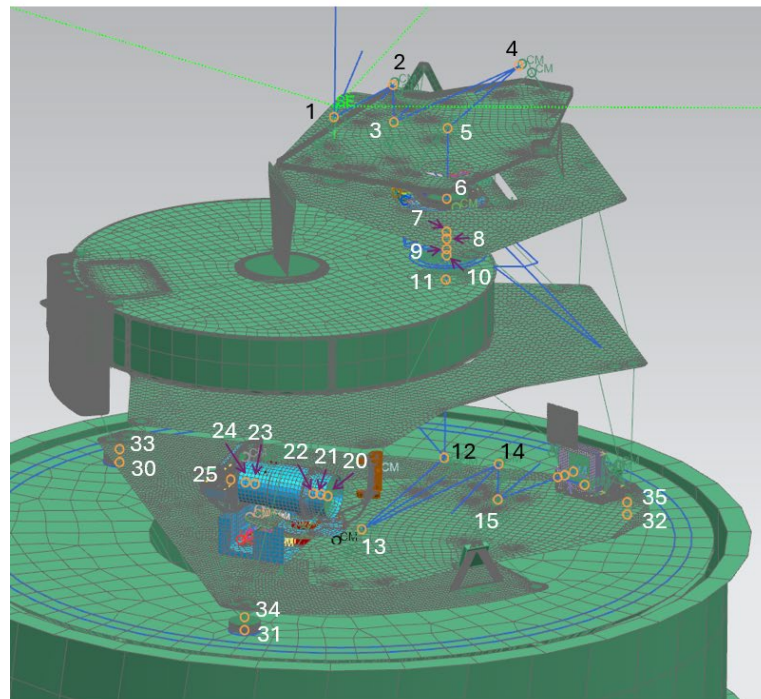
振動解析用モデルの作成



振動解析用モデルの作成



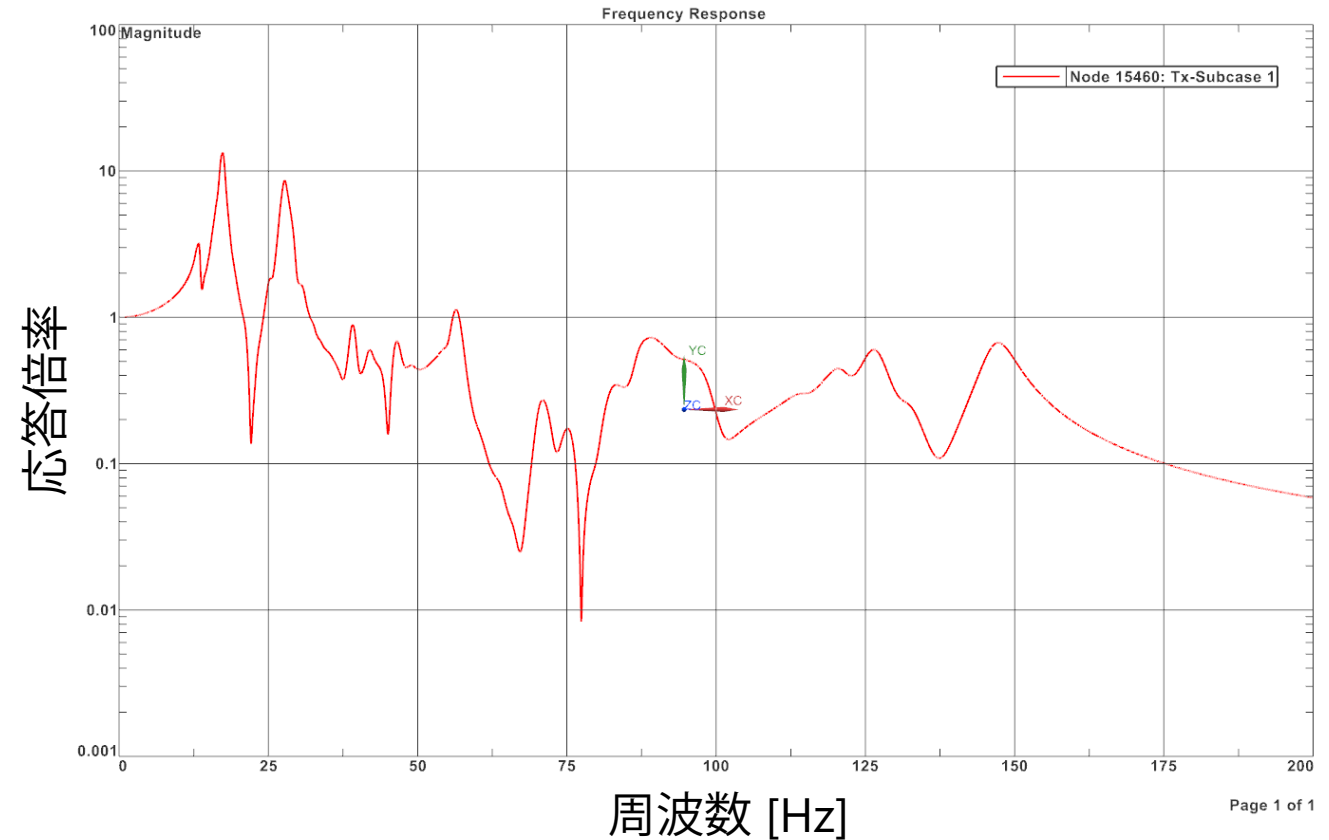
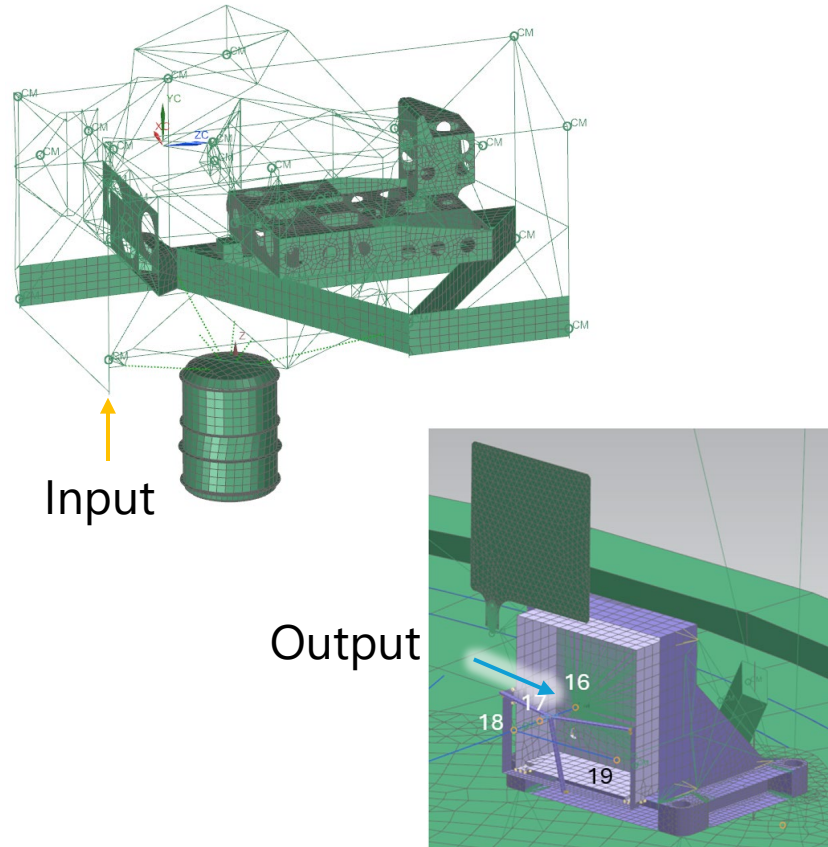
Telescope I/F
Tx/Ty/Tz 1 mm
その他5軸 拘束



Telescope I/Fのノードを正弦波スイープで各軸1 mm強制変位させた場合の
各光学素子の変位を周波数応答解析で計算

Processor: Intel(R) Xeon(R) Gold 5122 CPU @3.60 Ghz Core 4, Logical processors 8
Installed memory (RAM): 64.0 GB (16 GB x 4)
GPU: NVIDIA Quadro P4000 (8 GB) のスペックのPCで計算時間 **19時間**

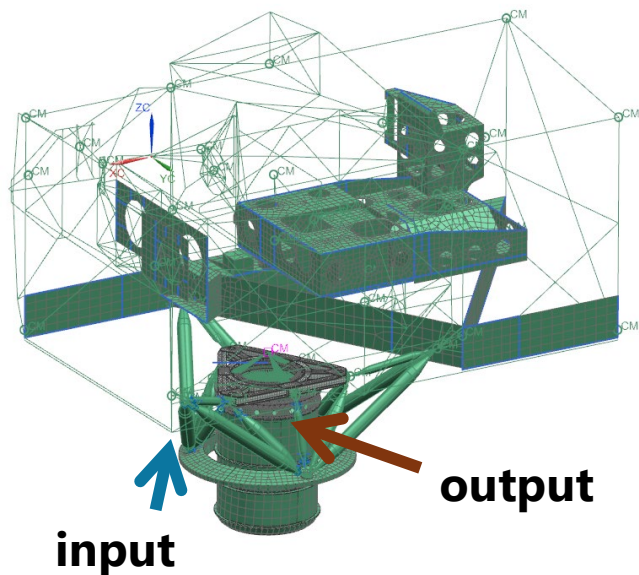
伝達関数計算結果の例 (Detector Tx-Tx)



Input)望遠鏡構造からOutput)検出器の応答倍率(x並進方向)が求められた

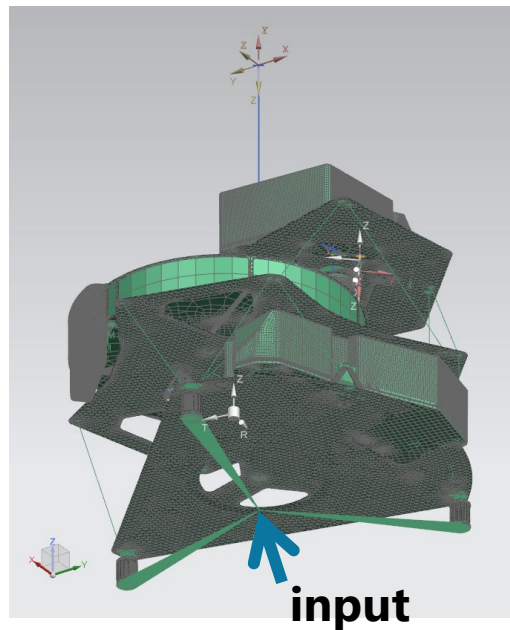
結果の妥当性検証

今まで作成した解析モデルの結果同士を比較して、妥当な結果が得られているか検証中



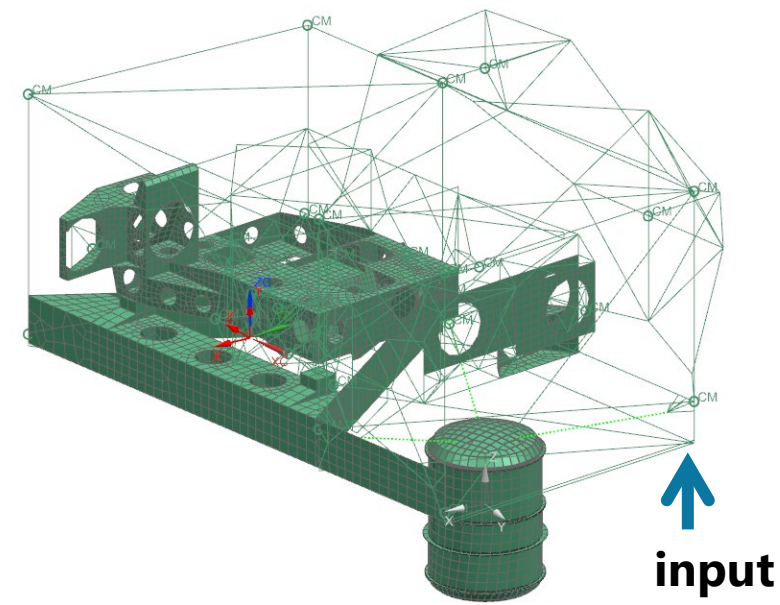
NFIRAOS+IRISが質点のモデル

Input – NFIRAOS ISS代表点
Output – Imager Point mass



Imagerのみのモデル
(2021年春作成)

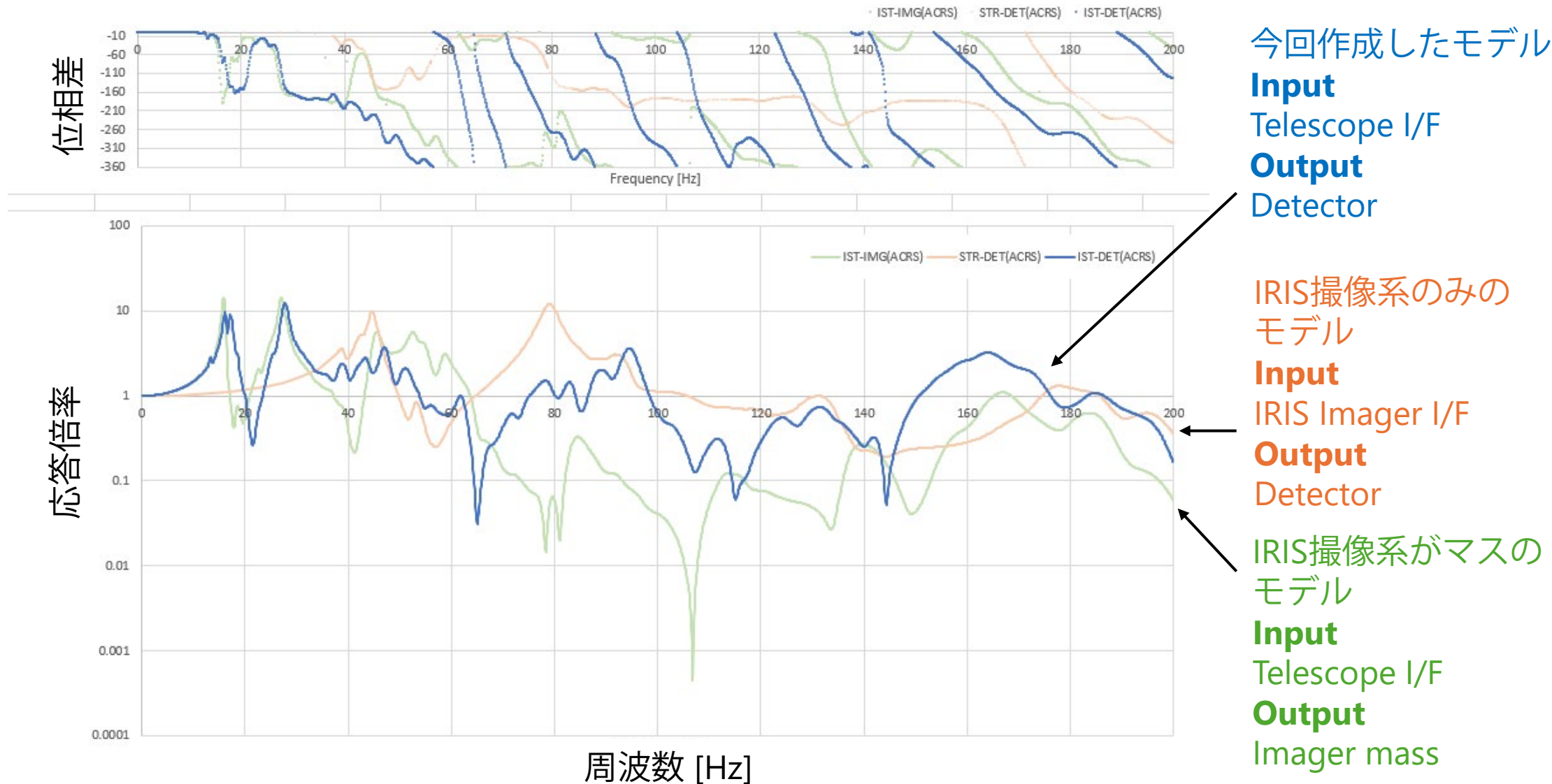
Input – Flexure 3点の代表点
Output – 任意の光学素子



今回作成した、NFIRAOSに
Imagerを乗せたモデル

Input – NFIRAOS ISS代表点
Output – 任意の光学素子

結果の妥当性検証(Detector Tx-Tx)



各モデル簡略化手法の比較

	モデルの簡略化	スーパーエレメント(SE)	通常モデル
モデルの作成時間	△ 技量によるが、1週間以上かかる	◎ 数日（通常モデル作成と同等） 解析を回すだけで簡略化	○ 数日（通常モデル作成と同等）
モデル作成の難しさ	△ 簡略化にテクニックが必要	△ モデル作成は通常と同じだが 解析は境界条件などの設定が特殊	○ 通常モデル作成の方法
モデルの解析時間	◎ うまくモデル化できれば短い	△ SE生成の解析が時間かかる 繰り返ししない場合はメリット少	× 時間はかかる 最悪重くて回せない
モデルの扱いやすさ	◎ うまくモデル化できれば軽い	△ SEの読み込みは時間がかかる	△ 通常モデル メッシュが細かいと重くなる
モデルの再現性	△ 技量によるが低次モードのみ 高次モードまで再現はかなり難	○ ただしSE生成時に高次モードまで 解析する必要がある	○ 通常モデル作成の方法
結果の評価しやすさ	○ 簡易化された部分は 分かりにくい場合もある	△ SE化した部分は別途表示 評価しにくい	◎ CADモデルと同じ形で評価
その他コメント	・ 技量の差がモデルに反映される ・ 振動解析初心者のトレーニングに 良いかもしれない	・ NXでは追加ライセンスが必要（課金） ・ シミュレーションによっては SEが使えない場合もある ・ 機能を活かしきるのは大変	・ 正直マシンパワーを改善して 通常モデルで解析したほうが 一番経済的ではある（できるなら）

まとめ

- 望遠鏡の振動がTMT第一期観測装置IRISの結像性能に及ぼす影響を調べるため、望遠鏡構造から各光学素子までの伝達関数を求めるための有限要素モデルを作成した。
- モデルの軽量化のため、3Dモデルの簡略化とスーパーエレメントによる簡略化を実施した。
- 望遠鏡取り付け点を入力とした光学素子への伝達関数を求めた。現在結果の妥当性を確認している。