

高速増殖原型炉もんじゅ

IVTM本体の点検調査に基づく 下部ガイドへの影響評価

平成24年1月26日

独立行政法人日本原子力研究開発機構
敦賀本部

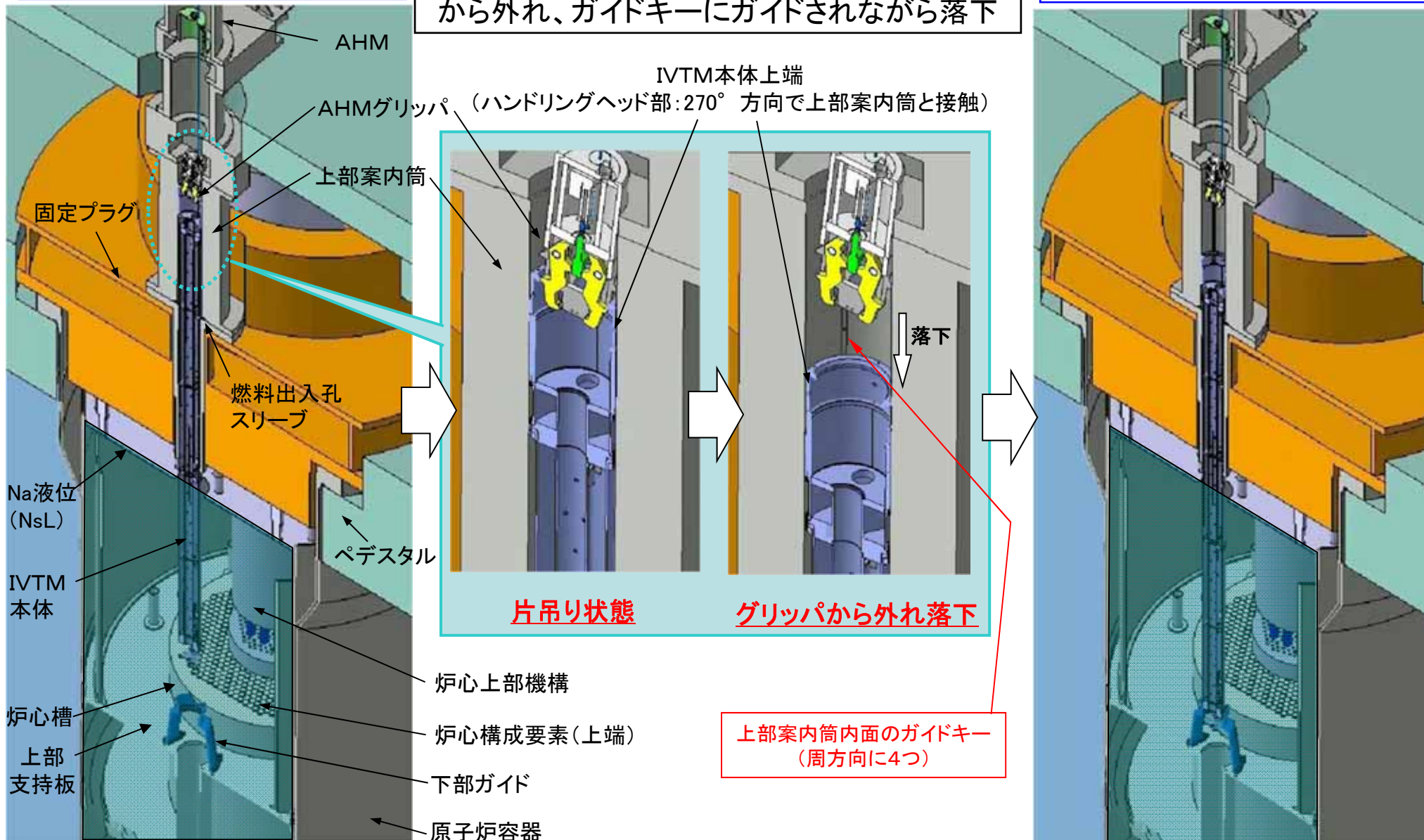
1. IVTM本体の点検調査から推定される下部ガイドとの接触状況	・・・	2
2. 下部ガイドの評価方針	・・・	7
3. 下部ガイドへの影響評価	・・・	9
4. 下部ガイドのルースパーツ確認	・・・	20
5. まとめ	・・・	25

1. IVTM本体の点検調査から推定される下部ガイドとの接触状況
2. 下部ガイドの評価方針
3. 下部ガイドへの影響評価
4. 下部ガイドのルースパーツ確認
5. まとめ

IVTM吊り上げ状態(落下前)

IVTMは約2m吊り上げた時点でAHMグリッパから外れ、ガイドキーにガイドされながら落下

IVTM落下後の状態(着座後)

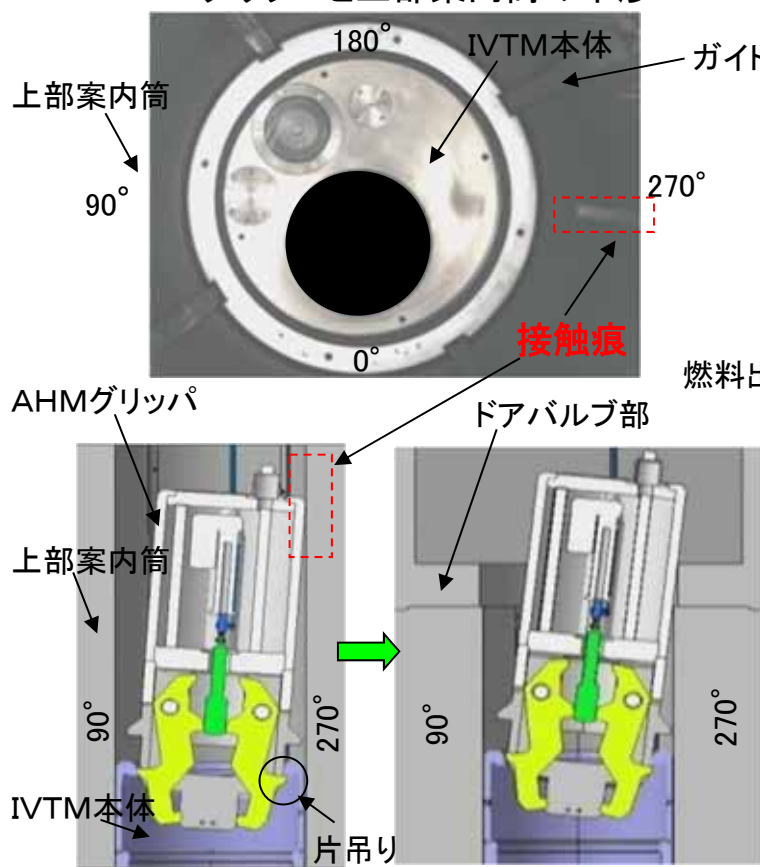


片吊り状態

グリッパから外れ落下

上部案内筒内面のガイドキー (周方向に4つ)

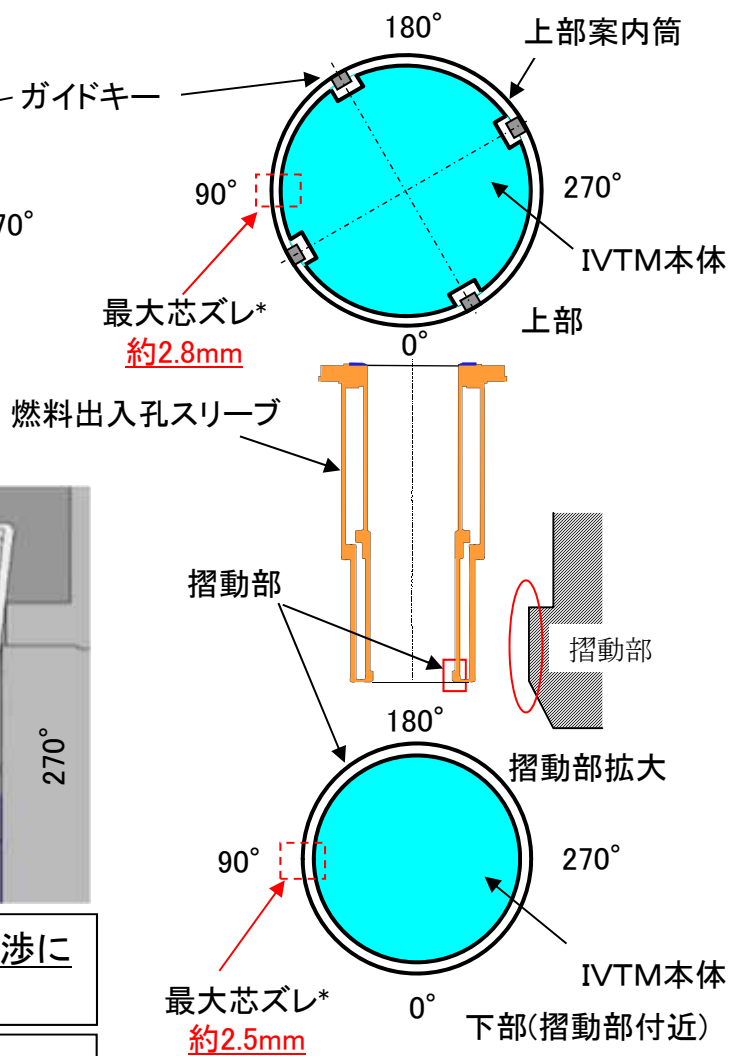
AHMグリッパと上部案内筒の干渉



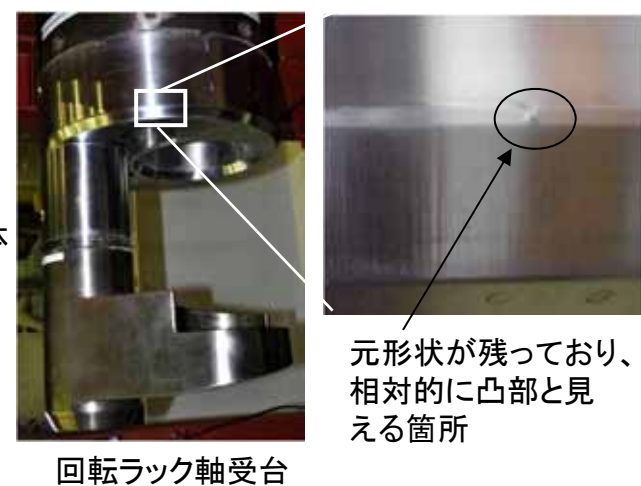
①AHMグリッパと上部案内筒との干渉による接触痕を270° 方位に確認。

②AHMグリッパが270° にずれる事でIVTM本体の頂部は90° または270° 側にずれうる。ただし、上部案内筒の90° 側、270° 側とも落下時に生じたようなIVTM本体との接触痕は認められなかった。

*参考-1:IVTM本体落下時に想定される最大の傾き

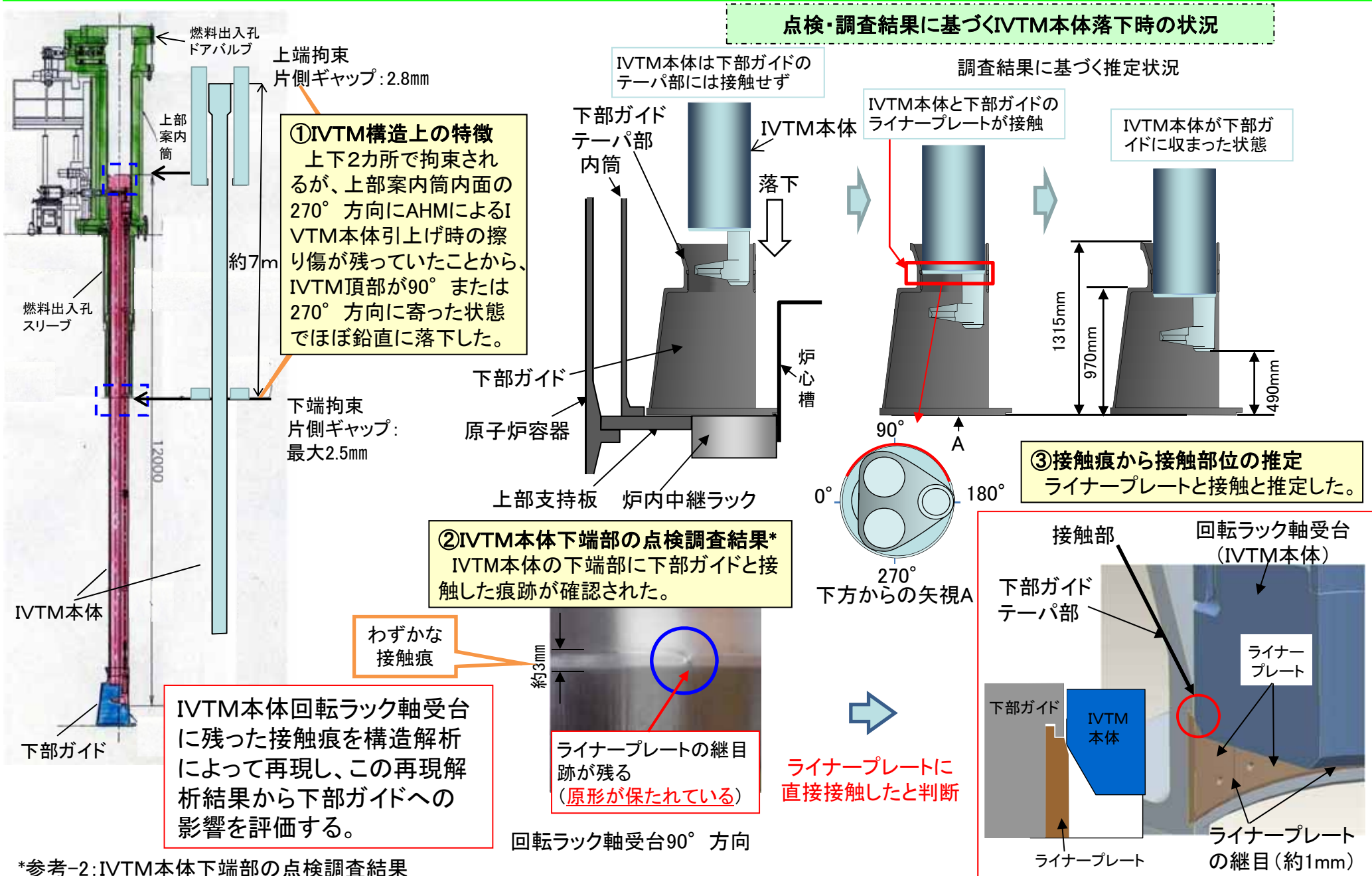


③燃料出入孔スリーブの摺動部全周には落下時に生じたようなIVTM本体との接触痕は認められなかった。



④回転ラック軸受台に残る接触痕は元形状を残している箇所(凸部)が認められた。

①、②、③、④より
燃料出入孔スリーブ摺動部と上部案内筒にIVTM本体が落下しながら接触した痕跡は認められなかった。
 ⇒ 芯ズレは少なく、ほとんど傾いていないと判断。さらに、回転ラック軸受台に残された接触痕には元形状が残っていた。
 ⇒ IVTM本体の落下状態は多少の芯ズレがあったとしても、ほぼ鉛直に落下したと推定される。



点検・調査結果に基づくIVTM本体落下時の状況

①IVTM構造上の特徴
 上下2カ所で拘束されるが、上部案内筒内面の270°方向にAHMによるIVTM本体引上げ時の擦り傷が残っていたことから、IVTM頂部が90°または270°方向に寄った状態でほぼ鉛直に落下した。

②IVTM本体下端部の点検調査結果*
 IVTM本体の下端部に下部ガイドと接触した痕跡が確認された。

③接触痕から接触部位の推定
 ライナープレートと接触と推定した。

IVTM本体回転ラック軸受台に残った接触痕を構造解析によって再現し、この再現解析結果から下部ガイドへの影響を評価する。

ライナープレートの継目跡が残る
 (原形が保たれている)

ライナープレートに直接接触したと判断

*参考-2:IVTM本体下端部の点検調査結果

【落下の概要】

- IVTM本体をAHMで吊上げた際にIVTM本体を吊っていたグリッパが外れ、約2mの高さから落下した。その時、IVTM本体は上部案内筒内のガイドキーに沿って落下した。

【IVTM本体と下部ガイドの最大接触想定】

- IVTM本体は上部案内筒のガイドキー及び燃料出入孔スリーブの下端によって傾きが拘束され、最大傾きは 0.06° 以下であり、ほぼ鉛直に落下する。最大傾いた状態で落下したことを想定すると、IVTM本体下端部は下部ガイドテーパ部に接触する。

【IVTM本体の点検調査】

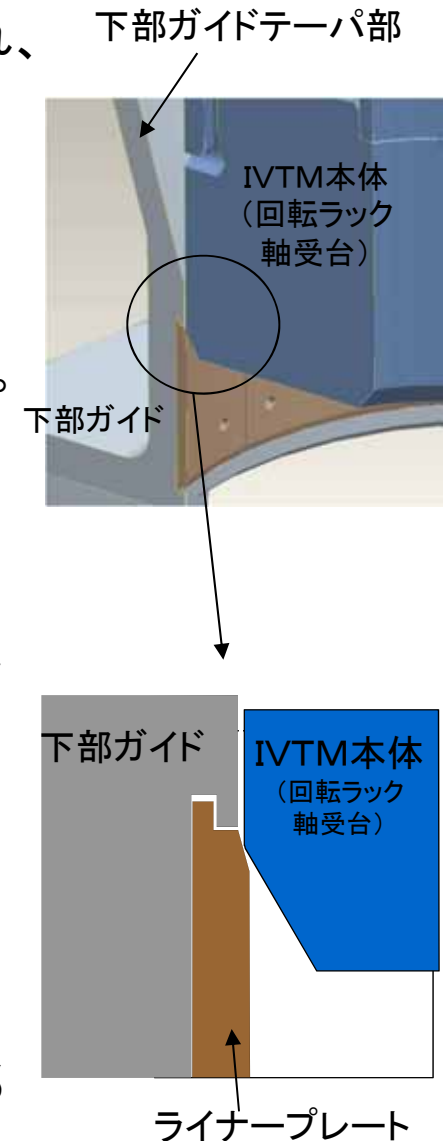
- IVTM本体の点検調査は、下部ガイドとの接触痕の有無を確認し、接触痕があった場合は、形状、深さ、幅、範囲をポイントに点検調査を実施した。

【IVTM本体下端部の点検調査】

- IVTM本体の回転ラック軸受台にわずかな接触痕が残ったのみであり、ライナープレート継ぎ目の痕跡(原形が残っていた)が明瞭に残っていた。

【IVTM本体の点検調査から推定される下部ガイドとの接触状況】

- IVTM本体はほぼ鉛直に落下し、IVTM本体下端部は下部ガイドテーパ部にほとんど接触せず、直接下部ガイド円筒部にあるライナープレートに接触したものと推定される。

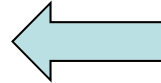


1. IVTM本体の点検調査から推定される下部ガイドとの接触状況
2. 下部ガイドの評価方針
3. 下部ガイドへの影響評価
4. 下部ガイドのルースパーツ確認
5. まとめ

① IVTM本体の点検調査

IVTM本体には下部ガイドと接触した痕跡が残っており、この調査から、接触位置、接触範囲、接触痕の形状・深さ等を明確にし、IVTM本体落下時における下部ガイドとの接触状況を推定する。また、構造解析のリファレンスデータとする。

試験により圧痕の性状を確認

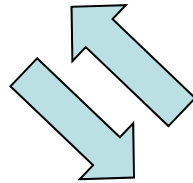


③ 検証試験*

検証試験により、押付け荷重と圧痕(変形量)の関係を定量的に求め、解析結果妥当性を確認する。

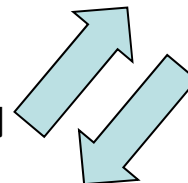
- 試験片を用いた押付け試験を行い、IVTM本体側に接触痕が残ること、下部ガイドのライナープレート側には接触痕がほとんど残らないことを確認する。
- 解析コードによって試験片の変形が再現されることを確認する。

構造解析のもとになるデータを提供



圧痕が構造解析によって再現されることを確認

構造解析に用いる解析コードを検証試験の評価に適用

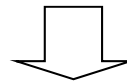


検証試験データに基づく押付け荷重から解析評価の妥当性を確認

② 構造解析による回転ラック軸受台の圧痕再現*, (注1)

IVTM本体下部と下部ガイドを模擬したモデルを用いた構造解析を行い、IVTM本体接触部の変形状況が再現できることを確認する。

(注1) 下部ガイド構造解析条件は、パラメータサーベイにより決定



下部ガイドへ付加される荷重、下部ガイドの変形量等を評価

④ 下部ガイドへの影響評価

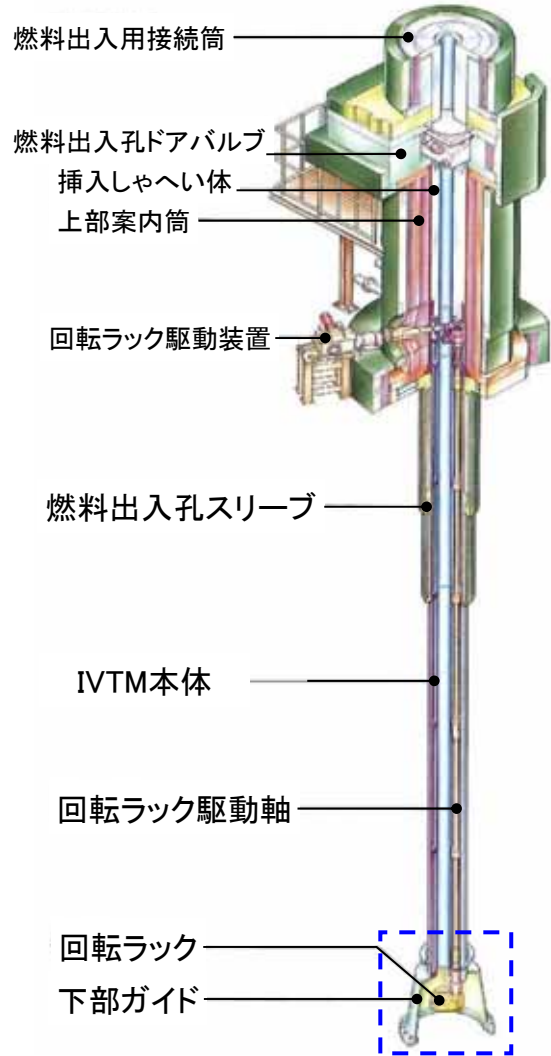
妥当性が確認された解析コードを用いてIVTM本体落下による下部ガイドの機能への影響を評価する。

下部ガイドの機能: ①ガイド機能及び②支持機能

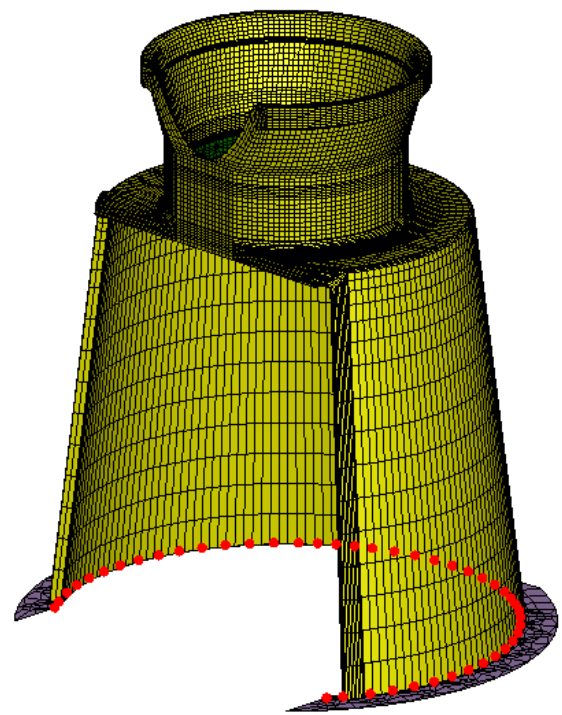
*参考-3: 構造解析による回転ラック軸受台の圧痕再現
 参考-4: 試験片を用いた検証試験による回転ラック軸受台の圧痕再現と検証試験の解析
 参考-5: 下部ガイド構造解析から求めた押付け荷重と試験片を用いた検証試験から求めた押付け荷重の比較

1. IVTM本体の点検調査から推定される下部ガイドとの接触状況
2. 下部ガイドの評価方針
3. 下部ガイドへの影響評価
4. 下部ガイドのルースパーツ確認
5. まとめ

■ 下部ガイド、回転ラック軸受台 解析モデル

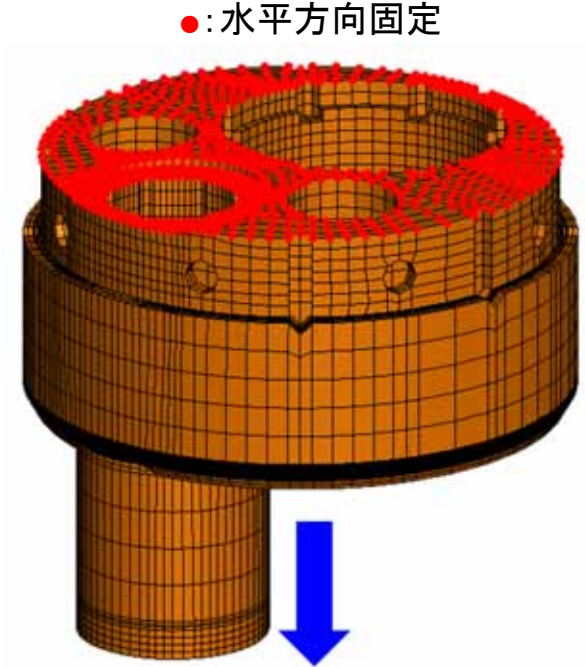


下部ガイド
節点数:141776
要素数:106380



下部ガイド下端を完全拘束
下部ガイドの境界条件

回転ラック
節点数:240693
要素数:193938



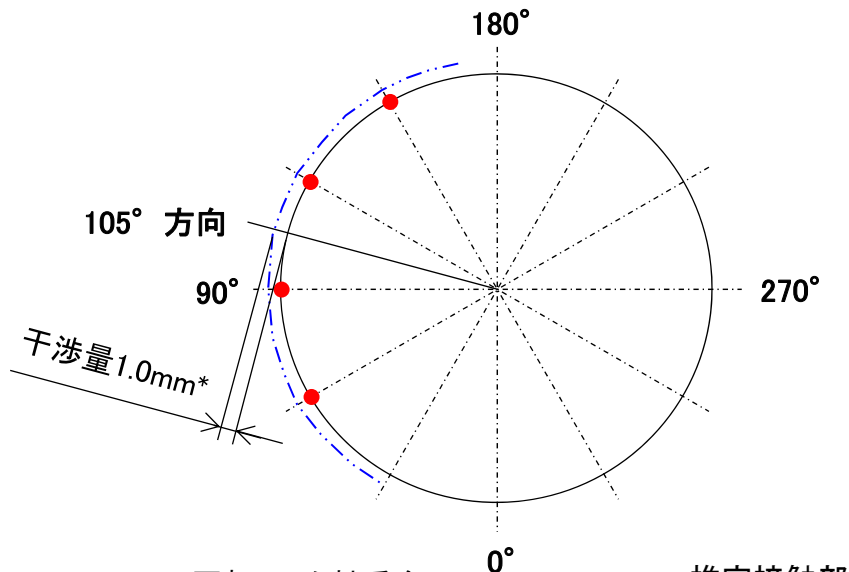
●:水平方向固定
鉛直方向に速度6.26m/s
(IVTM本体の落下速度)
回転ラックの境界条件

解析条件

- ・動的に解析を実施
- ・IVTM本体の落下速度(回転ラック軸受台の負荷速度): 6.26m/s
- ・下部ガイドの減衰率: 5%*
- ・下部ガイドと回転ラック軸受台の摩擦係数: 0.1*

*参考-6: 下部ガイドの解析条件
参考-7: 構造解析に用いた材料物性値

■ 下部ガイドとの接触条件(方向及び接触量)

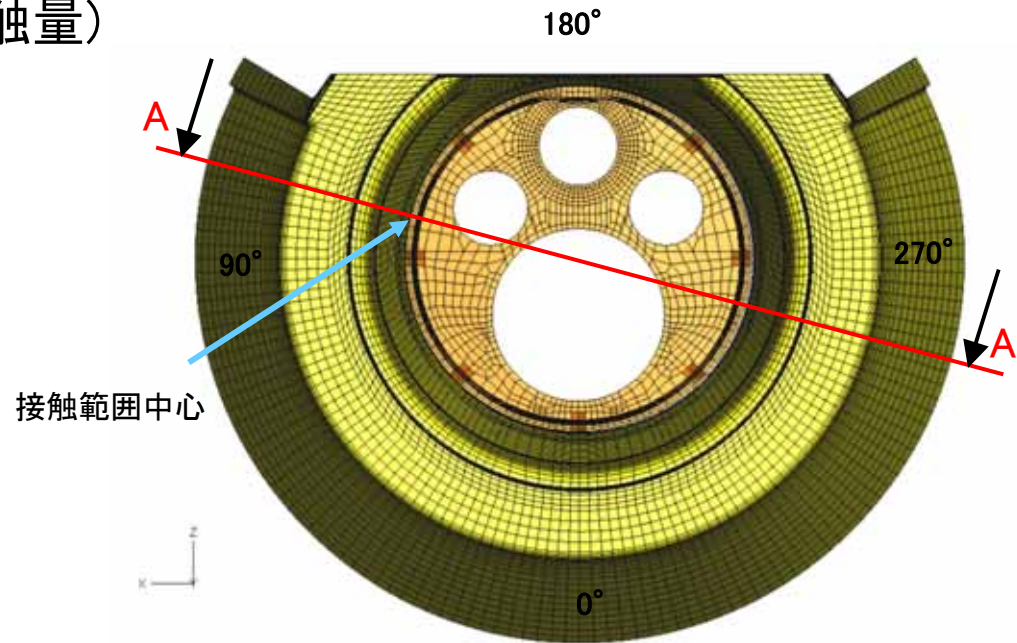


● : 回転ラック軸受台に凸部が確認された箇所
 - - - : 推定接触部

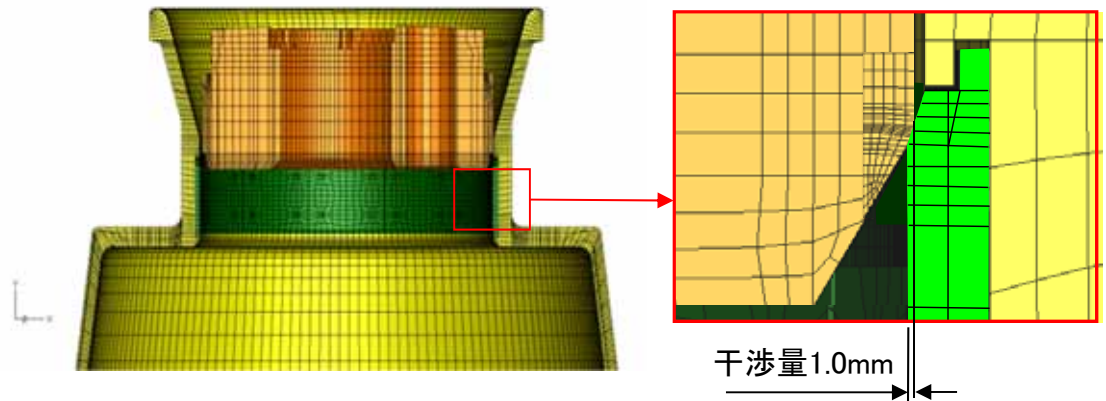
レプリカ調査より回転ラック軸受台と下部ガイドの接触範囲の中心は105°方向と考えられる。



本条件で構造解析を実施



IVTM本体が挿入される下部ガイドを直上から見た図

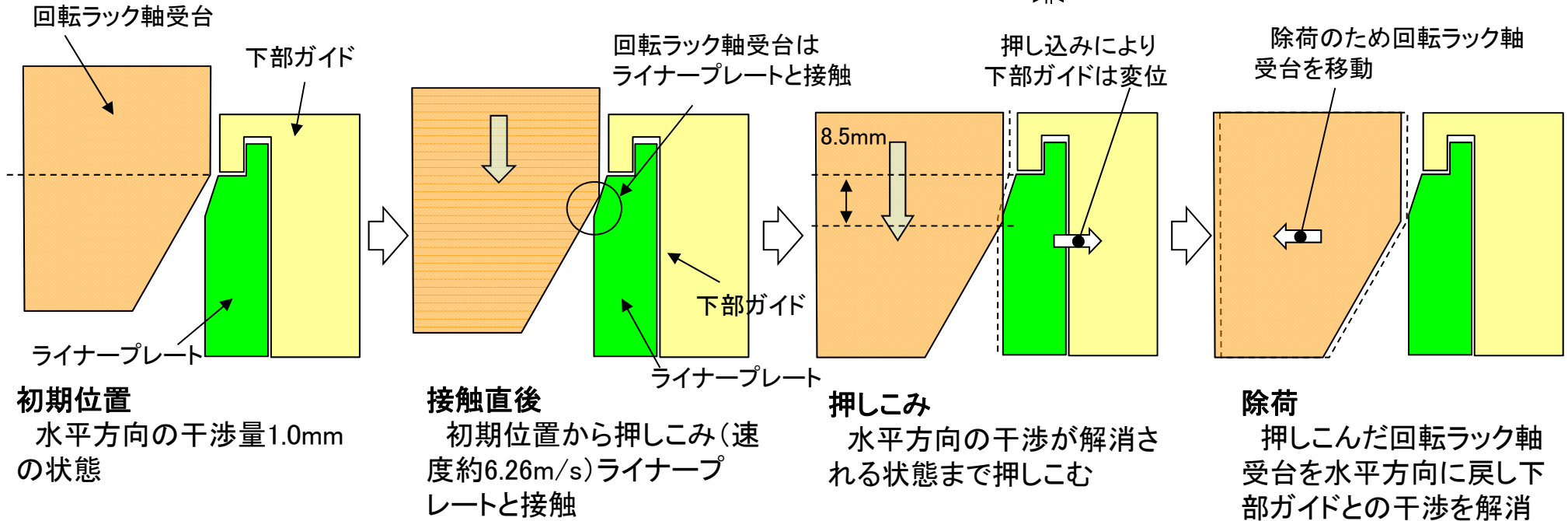
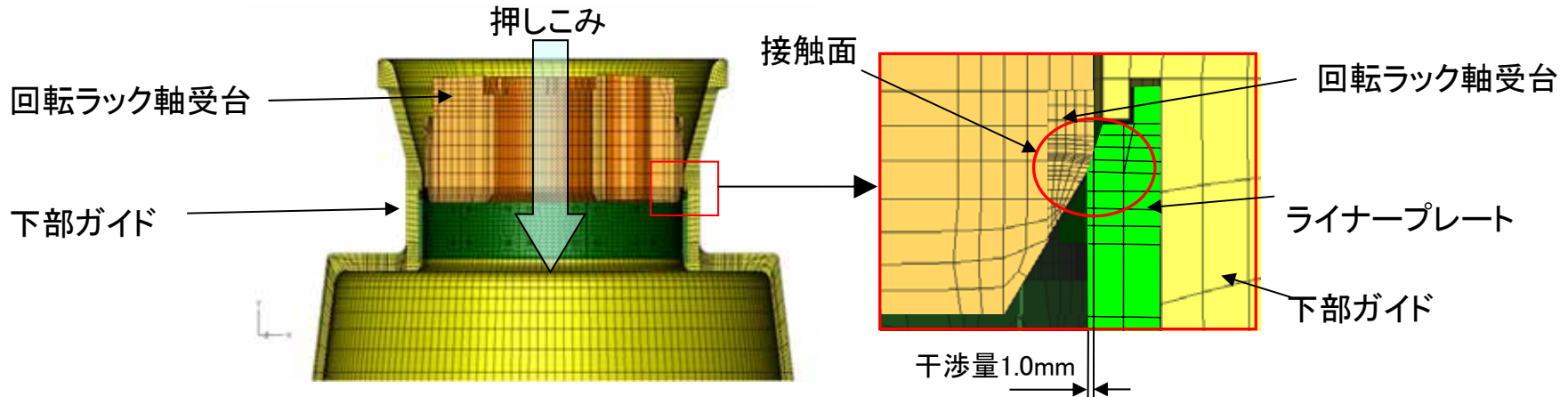


A-A断面を矢視方向から見た下部ガイド

回転ラック軸受台とライナープレートの干渉量 1.0mm*

*参考-8: 干渉量1.5mmとの解析結果の比較

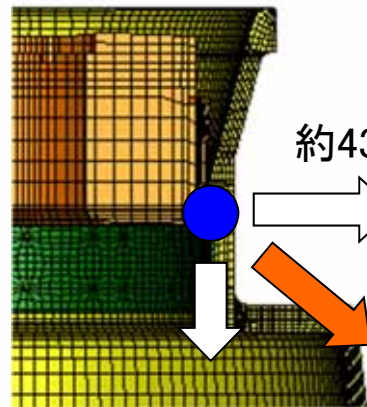
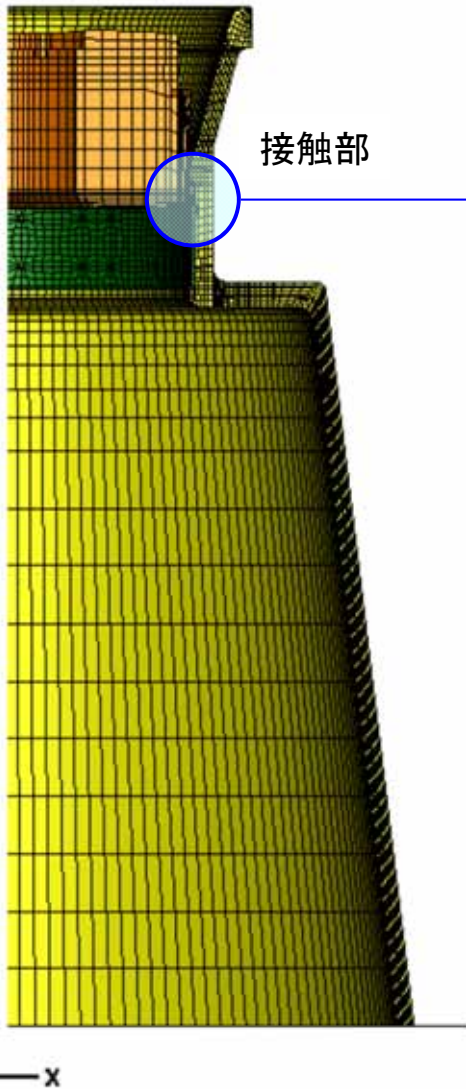
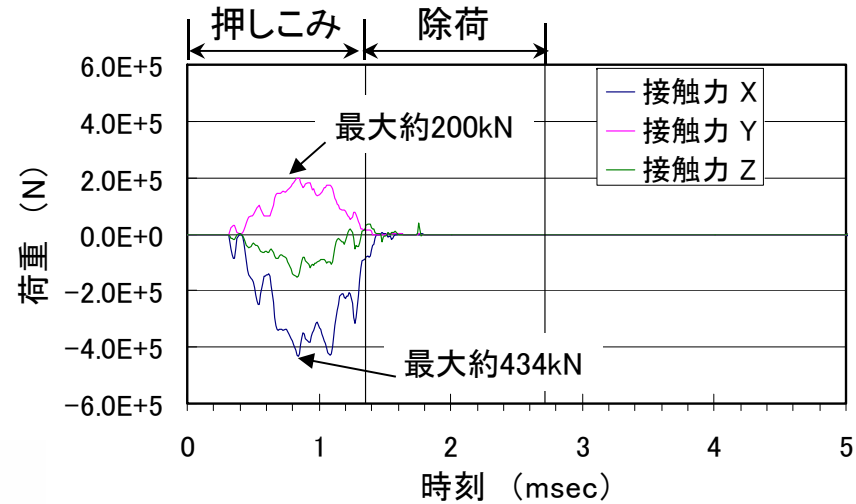
回転ラック軸受台を下部ガイドに干渉が解消されるまで押しこみを行い、下部ガイドが受ける荷重と変形量を評価した



■ 解析結果*

8.5mm(1.357msec)まで押しこみ後、除荷

回転ラック軸受台の荷重



二乗和
約478kN(48ton)

約200kN(20ton)

下部ガイドに発生する最大荷重

除荷後、下部ガイドは振動するが、振動が収束した時点での下部ガイドの変形量(ひずみ量)を評価

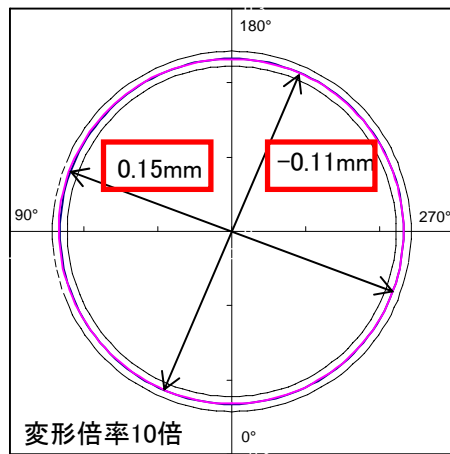
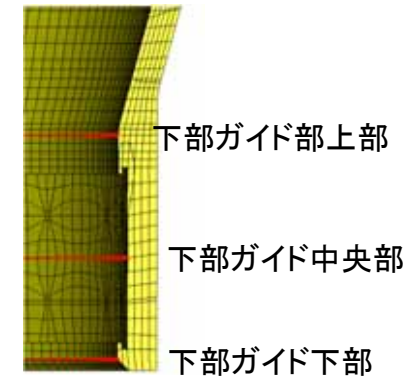
下部ガイドには瞬間的に約478kN(48ton)の荷重が発生

*参考-9: 下部ガイドの影響評価の結果

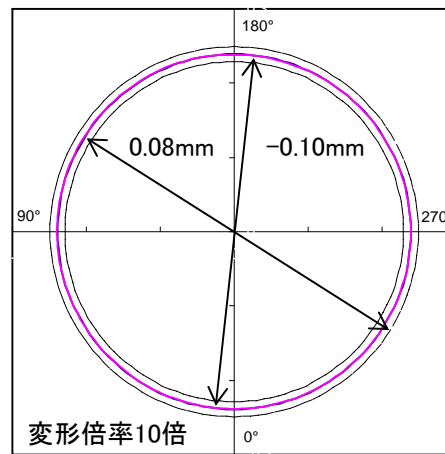
■ 下部ガイドへの影響評価

下部ガイド支持部(円筒部)の径の変化量を評価し、下部ガイドの内径(462mm)の寸法公差 $\pm 2\text{mm}$ と比較する。

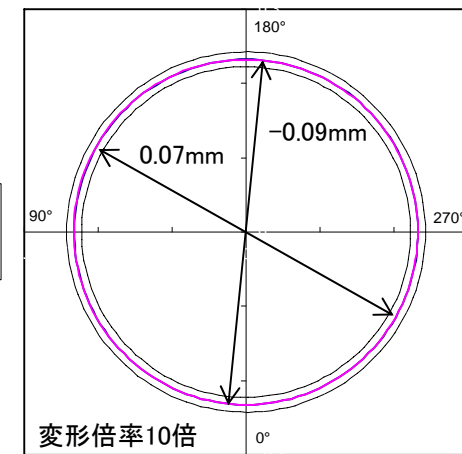
下部ガイドのガイド機能、支持機能への影響を確認する。



下部ガイド上部



下部ガイド中央部

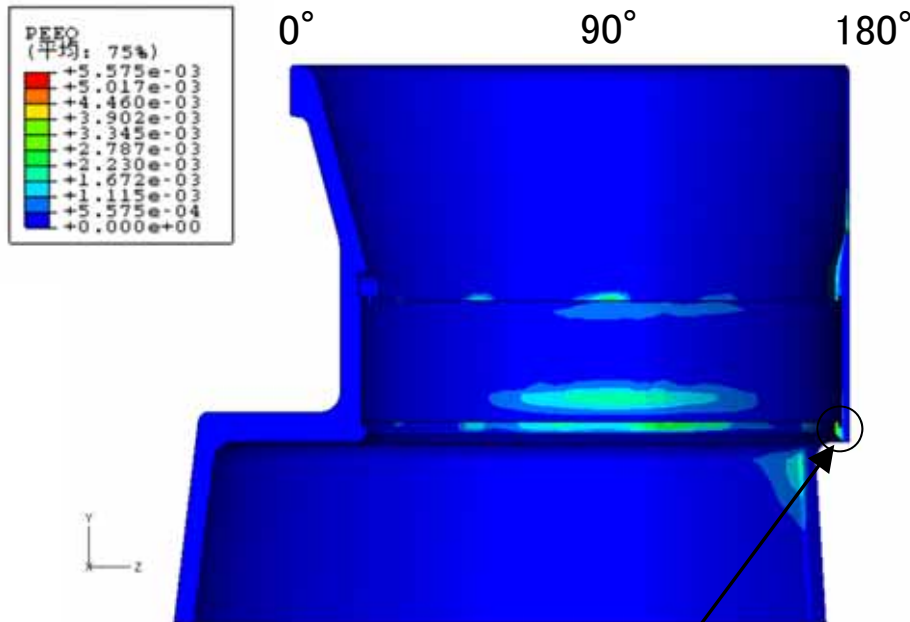


下部ガイド下部

下部ガイド支持部(円筒部)の径の変化量は、外径方向に最大約0.15mm、内径方向に最大約0.11mmである。一方、下部ガイドの製作時の内径精度は $+0.2 \sim +0.8\text{mm}$ である。この製作時の寸法精度に内径の変化量を加えても、下部ガイドの設計時の内径寸法公差 $462 \pm 2\text{mm}$ を満足するため、下部ガイドのガイド機能及び支持機能に影響は与えない。

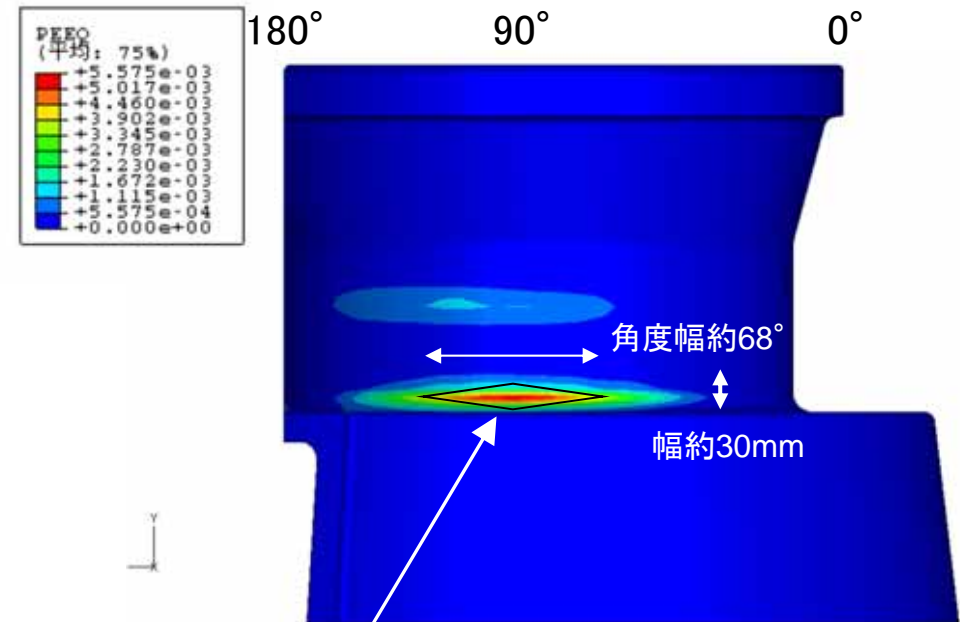
■ 下部ガイドにおけるひずみの発生状況

ひずみ範囲(0.2%超)は約60° ~ 約128°
最大幅約30mm



あり溝部におけるひずみのピーク値の発生箇所(約0.35%)

内表面



円筒付け根部におけるひずみのピーク値の発生箇所(約0.6%)

外表面

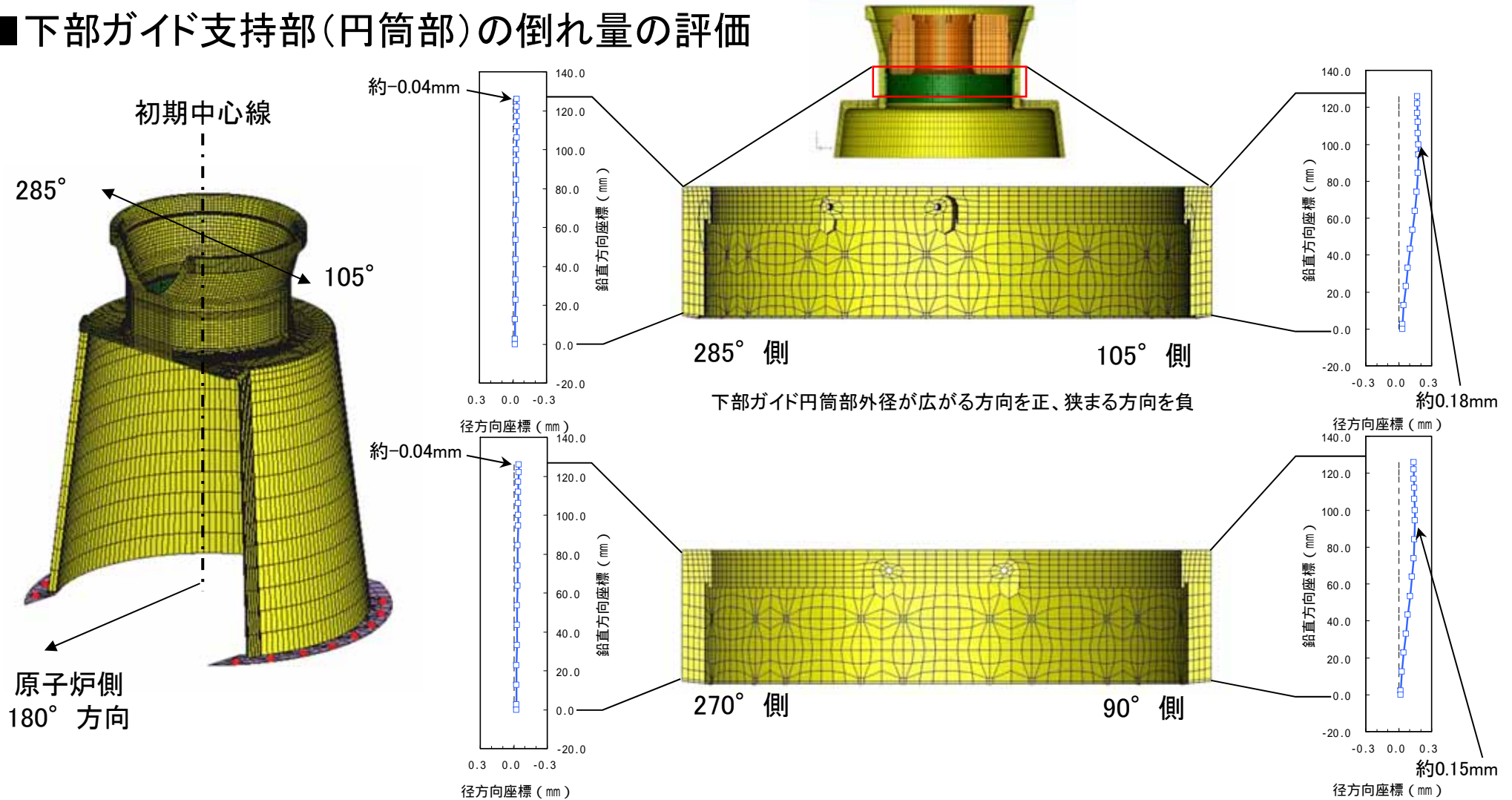
下部ガイドにおける相当塑性ひずみの発生状況

下部ガイド円筒付け根部(外表面)にごくわずかな塑性ひずみが発生

IVTM本体が下部ガイドに接触した際、下部ガイド円筒付け根部に局所的に降伏点を超える応力が発生し、円筒部付け根で約0.6%、ライナープレートあり溝部で約0.35%の塑性ひずみが発生している。

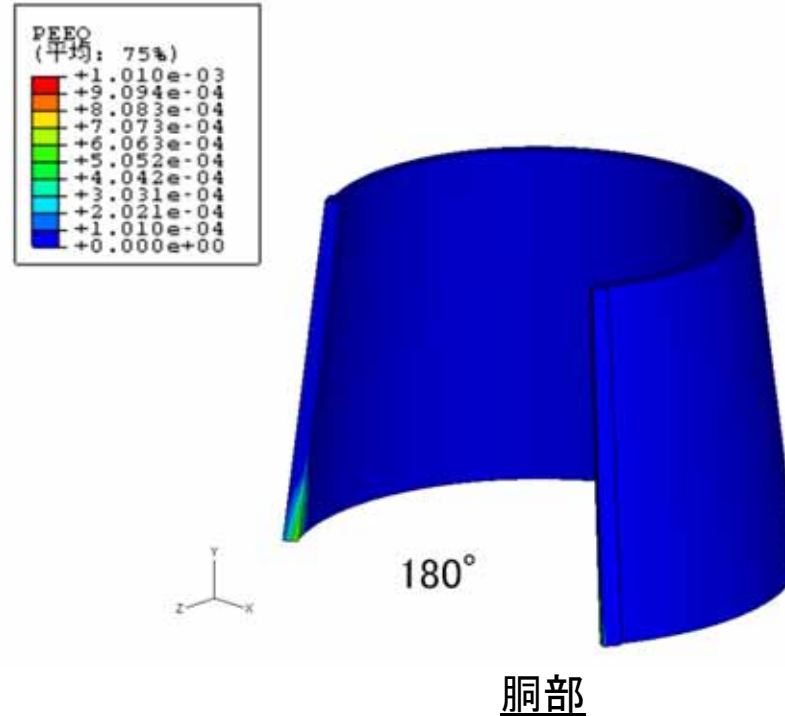
⇒ 次に、ひずみ量は微小であるが、ひずみによる円筒部の倒れがガイド機能及び支持機能に影響を与えないか確認を実施した。

■ 下部ガイド支持部(円筒部)の倒れ量の評価



初期位置からの倒れ量を下部ガイド支持部の外表面の変形量として評価した場合、回転ラック軸受台が下部ガイドの105° 方向に接触した影響から、下部ガイド支持部の外表面は初期位置より支持部上部と下部で若干の広がりを示す。ただし、変形量は下部ガイドの設計時の内径寸法公差を満足していることから、下部ガイドのガイド機能及び支持機能に影響は与えない。

■ 下部ガイド下端付近におけるひずみの発生状況



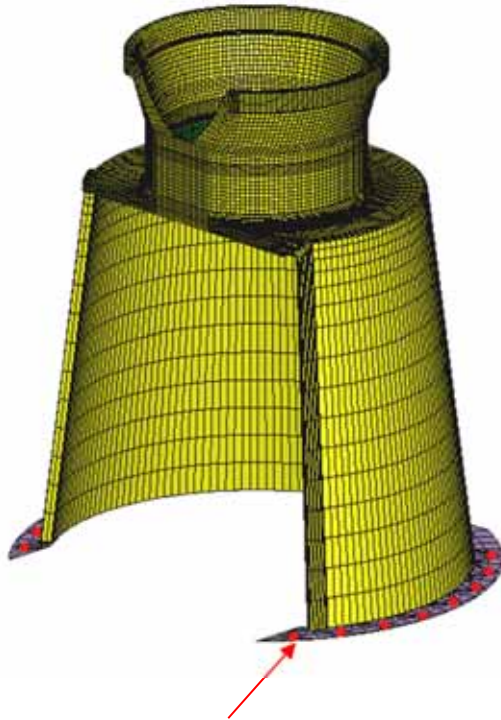
下部ガイド下端付近における相当塑性ひずみの発生状況

下部ガイド下端付近にごくわずかなひずみが発生

IVTM本体が下部ガイドに接触した際、下部ガイド胴付け根部の局所に、約0.1%のひずみが発生する。
ひずみは弾性範囲であり、下部ガイドの支持機能に影響はない。

■ 下部ガイドのスタッドボルト部における影響評価

下部ガイドへの影響評価解析の結果から据付ボルト部にかかる時刻歴荷重が得られており、スタッドボルト取付け位置を荷重支持点とした場合の鉛直方向最大荷重(引張り)を用いた評価を行う。



下部ガイド据付けボルト

- 据付ボルト(スタッドボルト)にかかる最大荷重
据付ボルトにかかる最大荷重 $P: 5.77 \times 10^4 \text{ N}$
- 評価基準値
 $1.2S_m = 154 \text{ (MPa)}$ S_m : 設計応力強さ
- スタッドボルトの評価
ボルト断面積 $A: 547 \text{ mm}^2 (\phi 26.4 \text{ mm})$

$$\text{発生応力: } \sigma = \frac{P}{A} \doteq 106 \text{ MPa}$$

下部ガイド下部には上部支持板に据付けるスタッドボルトがあるが、このボルトに発生する応力は約106MPaであり、評価基準値154MPaを満足し、強度上問題なく、IVTM本体接触の影響はない。

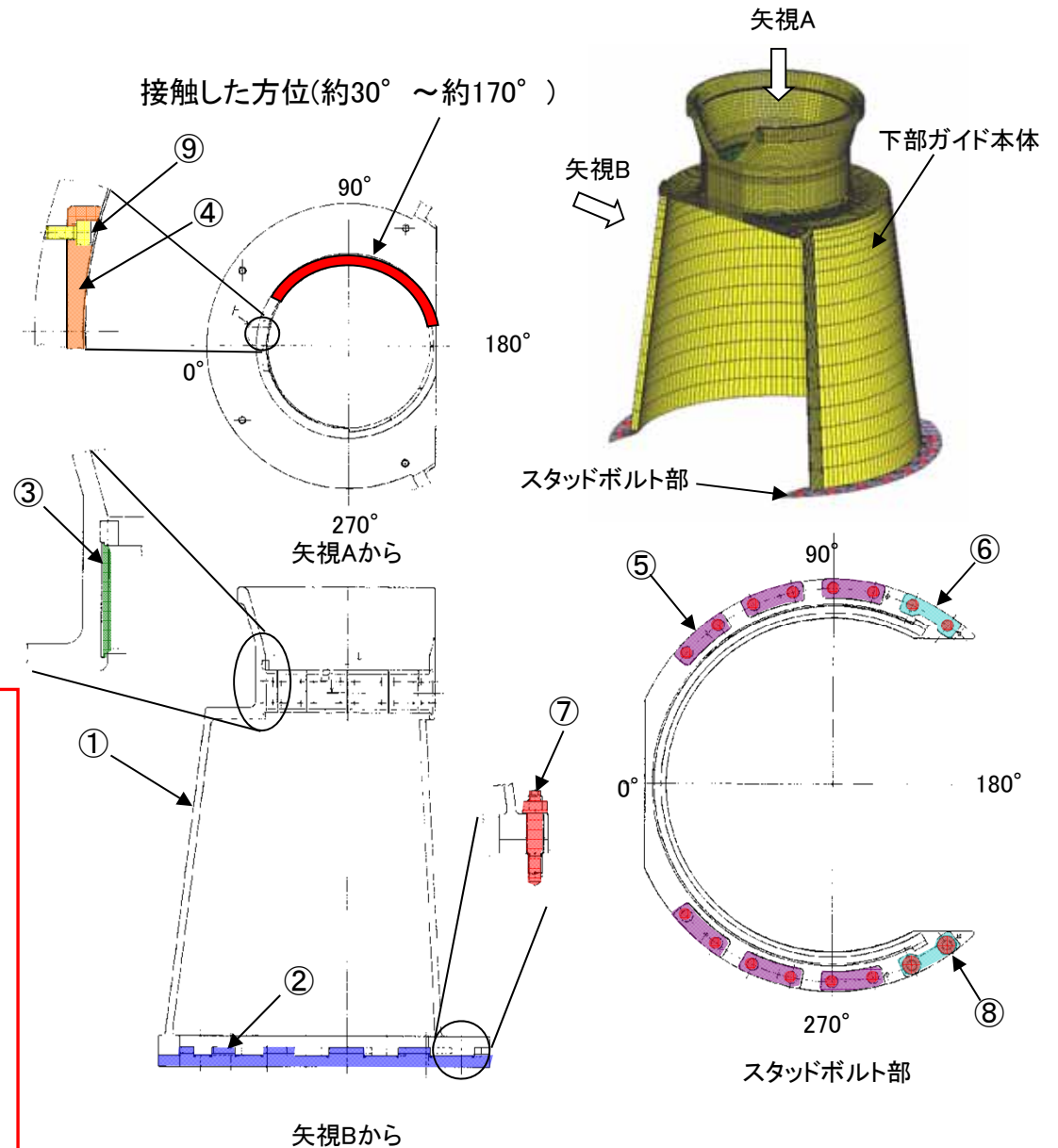
4. 下部ガイドのルースパーツ確認

■ 下部ガイドの部品リスト

No.	部品名称	形状[mm]	個数
①	下部ガイド本体	φ 1160 × H1315	1
②	ベースライナー	φ 1160 × t35	1
③	ライナープレート	127.5 × 124.1 × t8	12
④	ライナー押さえ	27.5 × 140 × t19.8	1
⑤	押さえ座金(1)	62.5 × 181.5 × t10	6
⑥	押さえ座金(2)	62.5 × 181.5 × t10	2
⑦	スタッドボルト	M30 × 184	16
⑧	六角ナット	M30	16
⑨	六角穴付ボルト	M8 × L17	2

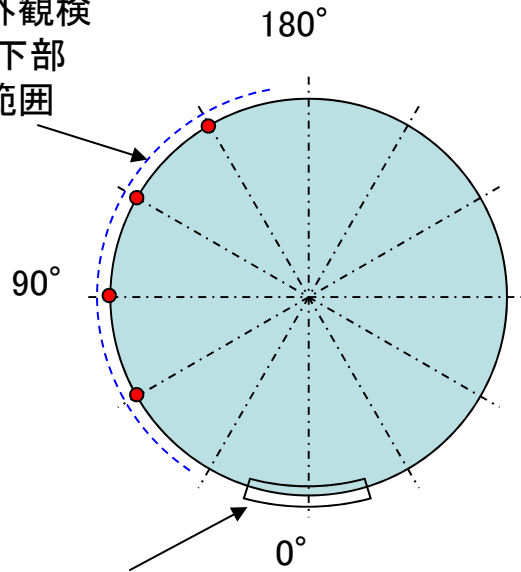
下部ガイドは、本体を含め57個の部品から構成される。

IVTM本体の引抜き後外観検査から、IVTM本体が下部ガイドに接触した方位は回転ラック軸受台に残された圧痕から約30° ~ 約170° と判明している。従って0° 方向に設置されている④ライナー押さえ及びそれを固定している⑨六角穴付ボルトには直接接触してしない。

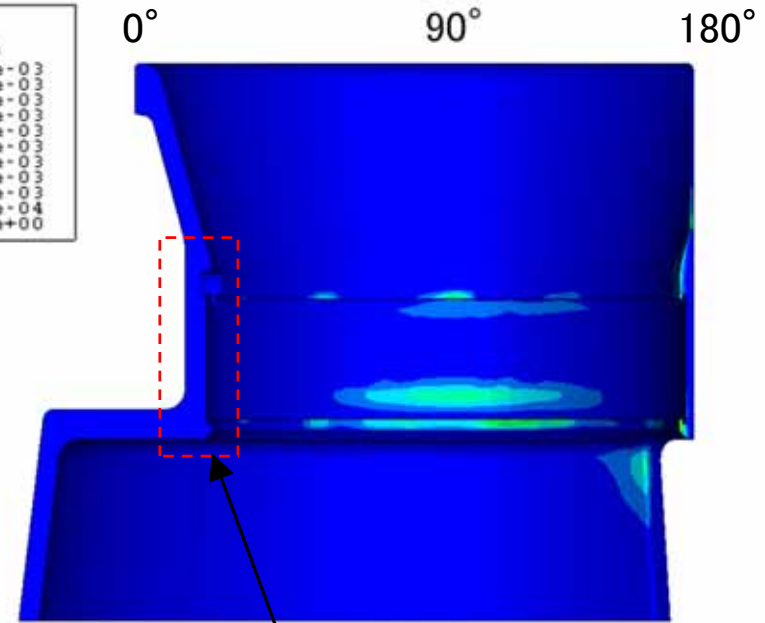
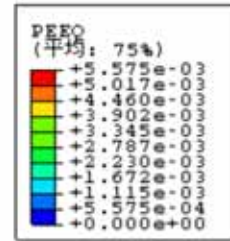


■ライナープレート及びライナー押さえ等の評価

IVTM本体の外観検査から得られた下部ガイドとの接触範囲



④ライナー押さえ(設置幅約35° 相当)

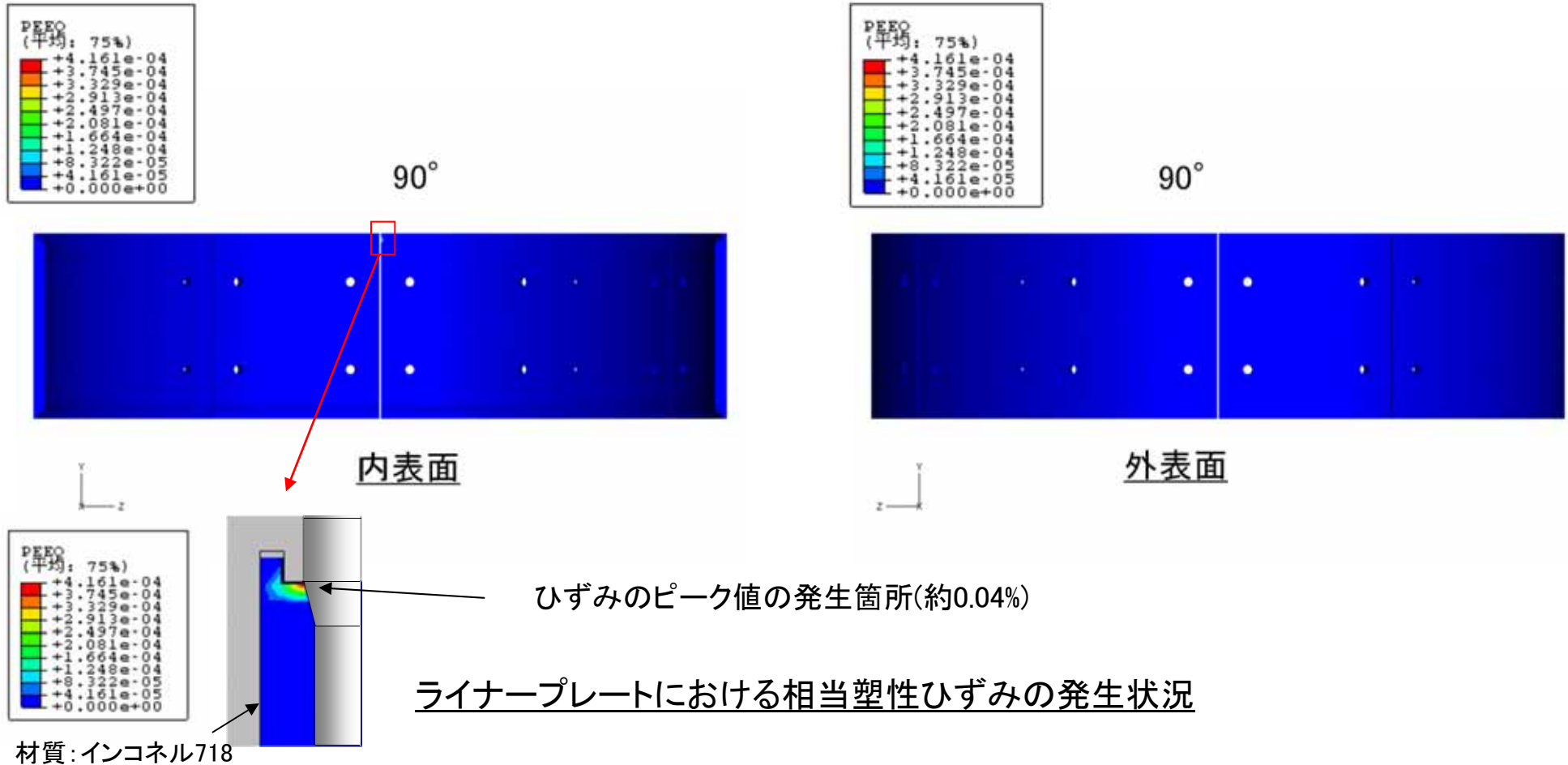


ライナー押さえの箇所には塑性ひずみは発生しない
内表面

IVTM本体の外観検査からライナー押さえ(6角穴付ボルトにより固定)に、IVTM本体は接触していない。下部ガイドの影響評価解析からみても当該部には塑性ひずみ等が発生していないことから、④ライナー押さえ、それを固定する⑨6角穴付ボルトがルースパーツとなっていないと判断した。

また、ライナープレートあり溝部で約0.35%の塑性ひずみが発生しているがメクレなどの破損が生じるようなひずみではないためライナープレートがルースパーツになっていないと判断した。

■ライナープレートにおけるひずみの発生状況

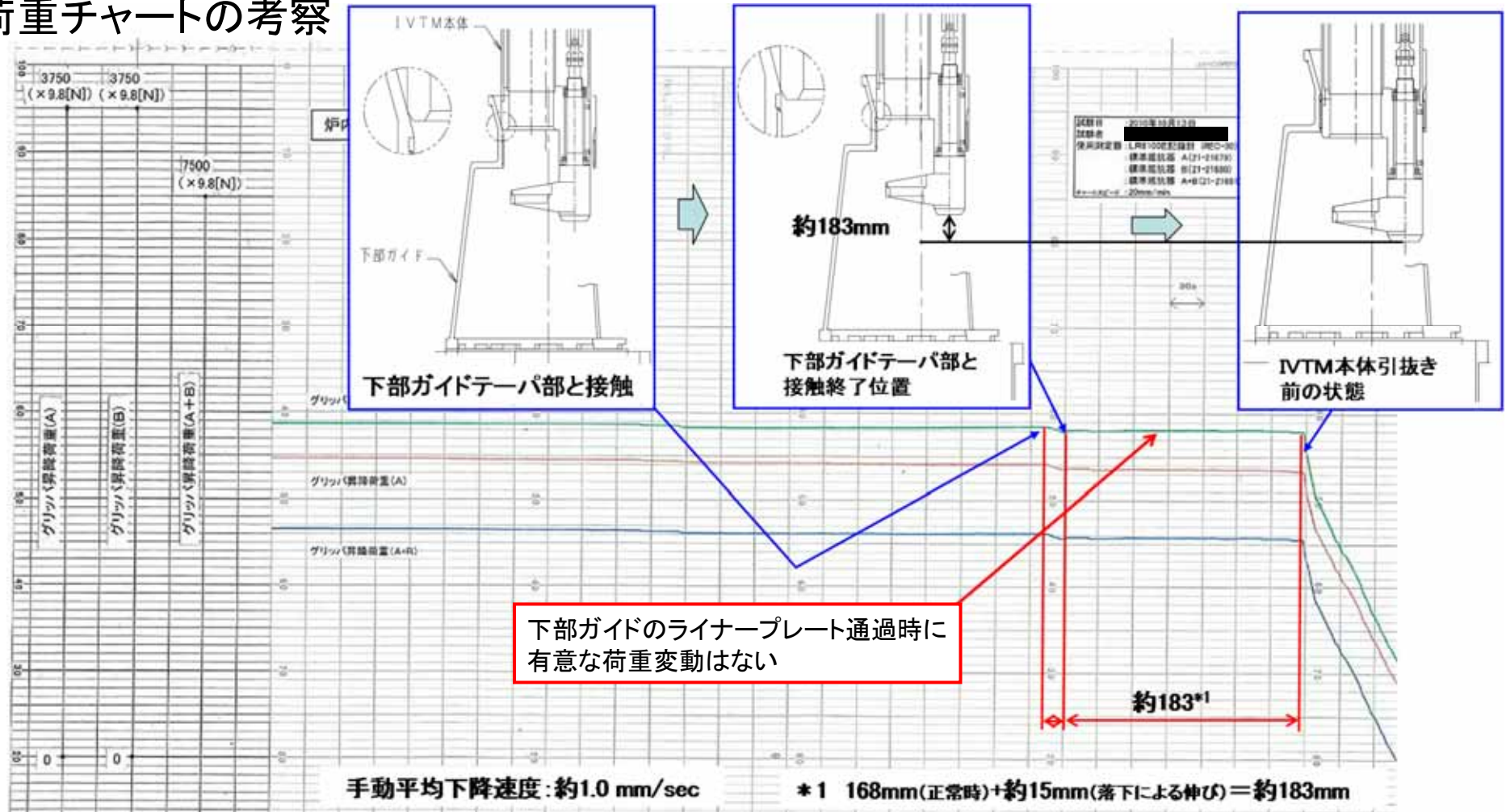


ライナープレートの上端エッジ部にごくわずかなひずみが発生

ライナープレートエッジ部に約0.04%のひずみが発生する。

ひずみは弾性範囲であり、ライナープレートに破損はなく、ルースパーツの発生はない。

■ 荷重チャートの考察



平成22年10月13日に実施したIVTM本体単独引抜き時の吊り荷重チャート(下降時)からIVTM本体の回転ラック軸受台及び軸部が下部ガイドを通過する領域を推定すると、荷重に有意な変動が見られない。従ってライナープレートの損傷やそれを支持する下部ガイド円筒部に大きな変形はなく、またルースパーツの発生はないと判断した。

■ 下部ガイドのルースパーツ確認のまとめ

① IVTM本体の外観検査及び下部ガイドの影響評価から

IVTM本体は下部ガイドの約 30° ～ 約 170° 方向に接触しており、下部ガイドの 0° 方向に設置されているライナー押さえ及び六角穴付ボルトの脱落はないと判断した。

② 下部ガイドの影響評価(解析)から

直接接触したライナープレート及びそれを支える下部ガイドあり溝部に発生する塑性ひずみは小さく、ライナープレートがルースパーツとなるような破損はなく、あり溝部からライナープレートが脱位するような変形はないと判断した。

また、スタッドボルトに発生する応力評価からボルトに発生する応力は変形を生じる目安値に対して小さく、スタッドボルト及びそのボルトにより固定された部品に脱落はないと判断した。

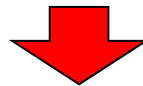
③ 荷重チャートの考察

吊り荷重チャートの分析からIVTM本体の回転ラック軸受台及び軸部が下部ガイドを通過する領域を推定すると、荷重変化がほとんど見られない。従ってライナープレートの損傷やそれを支持する下部ガイド円筒部に大きな変形はなく、脱落はないと判断した。



下部ガイドのライナープレート及びスタッドボルトで固定された構成部品等からの脱落は無い。

- IVTM本体に残る圧痕は、IVTM本体落下時にライナープレートのテーパ部と接触した際に付いたものと推定される。
- 試験片を用いた試験により、インコネル製の硬いプレートにステンレス鋼の試験片を押し付けると、実機と同様の圧痕が付くことを確認した。また、この試験結果を下部ガイドの構造解析で用いた解析コードで解析し、圧痕幅と押し付け荷重の関係を再現できることを確認した。
- 回転ラック軸受台に残る圧痕データに基づき、解析コードを用いて下部ガイドに発生する塑性ひずみを計算した。
- その結果、下部ガイド本体に残る変形量は、製作時の寸法公差内であり、下部ガイドの機能(ガイド機能・支持機能)が確保されていることを確認した。
- また、下部ガイドのライナープレートに発生するひずみ及び下部ガイドを据付けるスタッドボルトに発生する応力も許容値内であり、健全であることを確認した。



下部ガイドに要求されるガイド機能と支持機能は確保されており、下部ガイドの機能上再使用に問題は無い。

下部ガイドのライナープレート及びスタッドボルト部の健全性を確認し、これら構成部品の脱落は無い。

[参考-1: IVTM本体落下時に想定される最大の傾き](#)

[参考-2: IVTM本体下端部の点検・調査結果](#)

[参考-3: 構造解析による回転ラック軸受台の圧痕再現](#)

[参考-4: 試験片を用いた検証試験による回転ラック軸受台の圧痕再現と検証試験の解析](#)

[参考-5: 下部ガイド構造解析から求めた押付荷重と試験片を用いた検証試験から求めた押付荷重の比較](#)

[参考-6: 下部ガイドの解析条件](#)

[参考-7: 構造解析に用いた材料物性値](#)

[参考-8: 干渉量1.5mmとの解析結果の比較](#)

[参考-9: 下部ガイドの影響評価の結果](#)

落下事象の推定シーケンス

原子炉機器輸送ケーシンググリッパが
IVTM本体をつかむ

IVTM本体
吊上げ開始

IVTM本体
落下

爪開閉ロッド
90° 回転

爪先端がIVTM本体
ハンドリングヘッドに
かかる

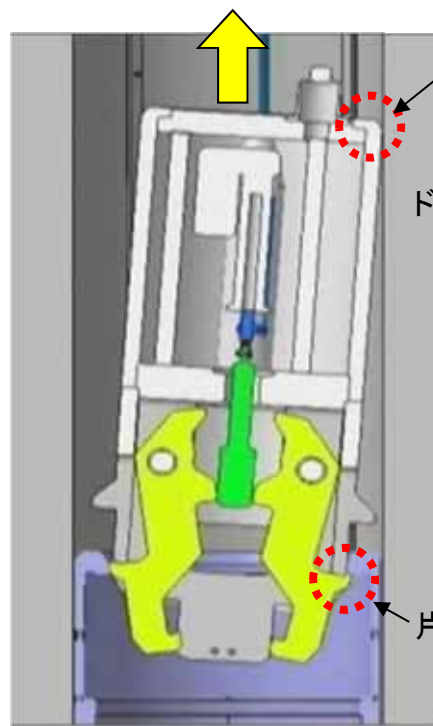
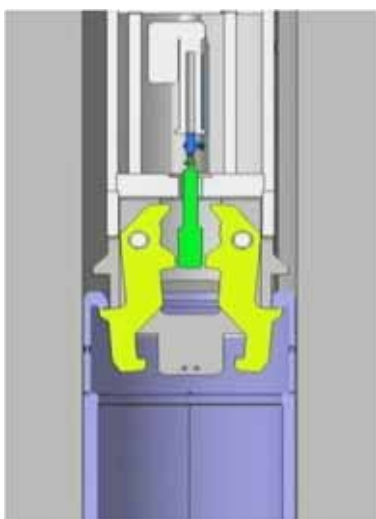
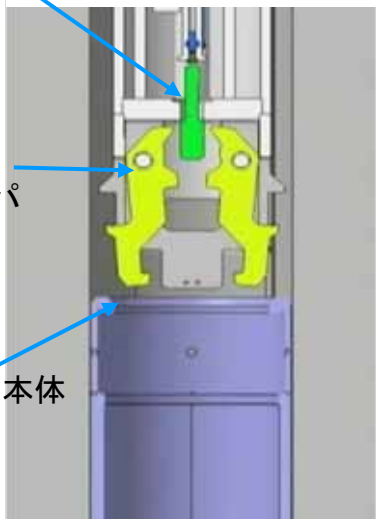
片吊りでの吊上げ

ドアバルブの空間で原子炉機器輸送
ケーシンググリッパの傾きが大きくなる

爪開閉ロッド

AHM
グリッパ

IVTM本体

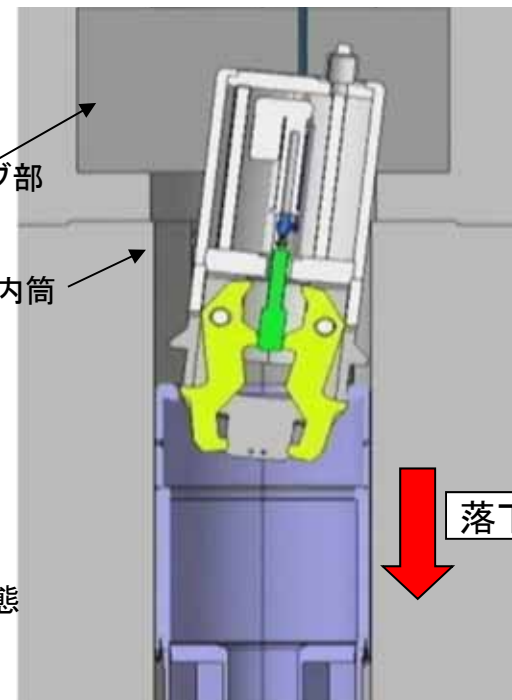


上部案内筒に
接触

ドアバルブ部

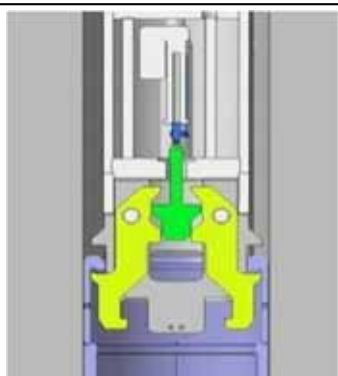
上部案内筒

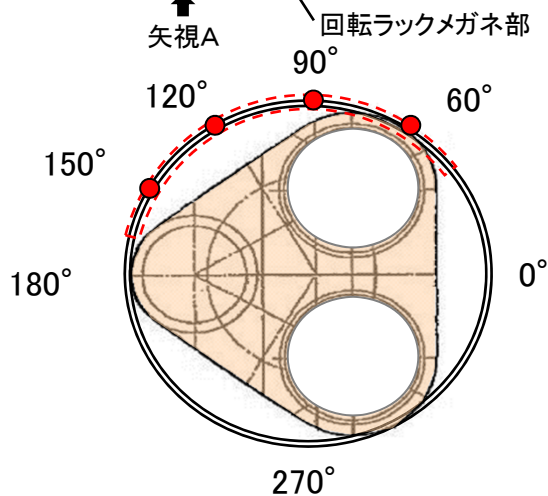
片吊り状態



落下

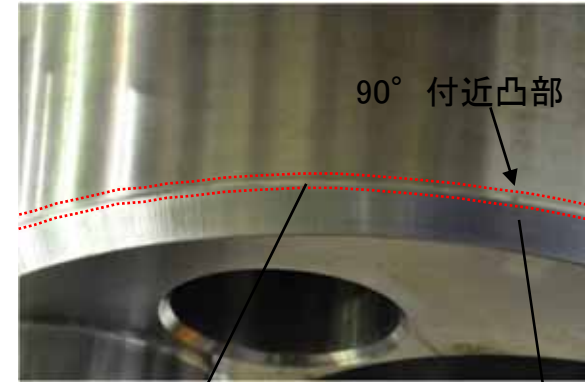
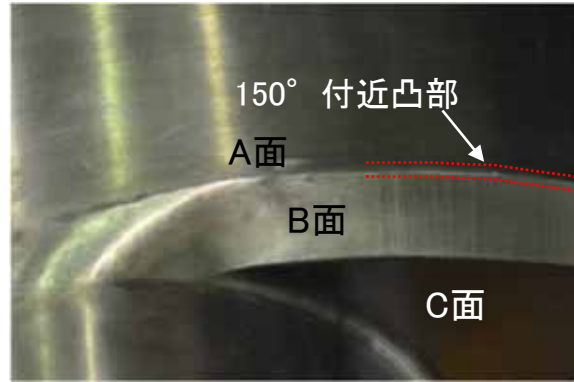
原子炉機器
輸送ケーシング
グリッパが
IVTM本体を
正常につかんだ
状態





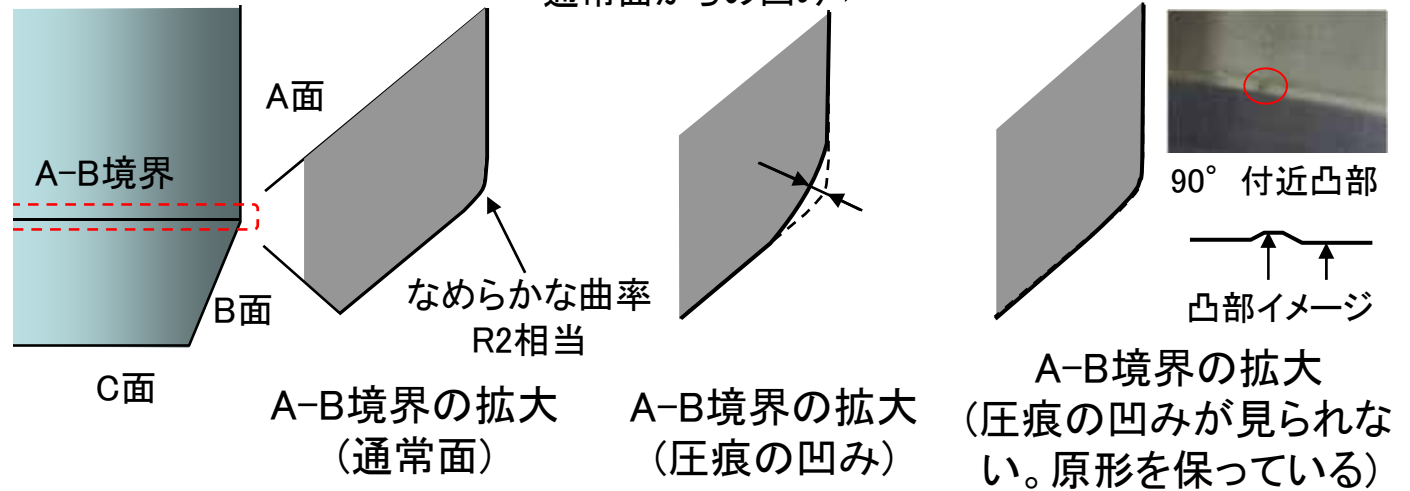
● 凸に見える(原形を保っている)部分
 〰 圧痕が確認された位置

回転ラック部の全景写真と方位
 (下方からの矢視A)



圧痕の写真

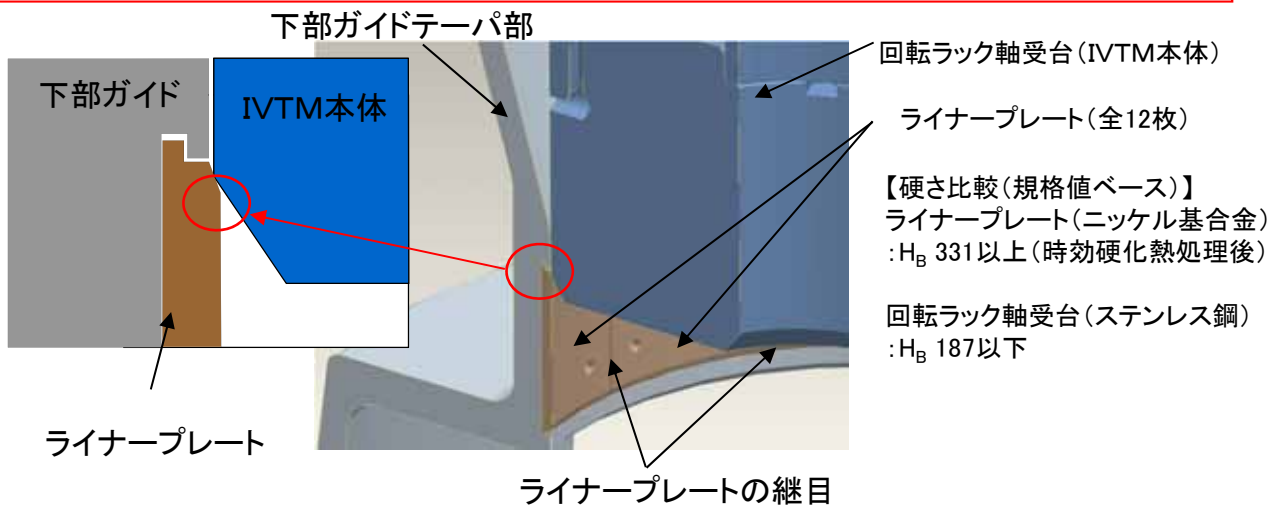
通常面からの凹み



確認された圧痕は、通常面と比較し角が取れるように凹んでいる。その範囲は約30° - 約170° である。またライナープレートの境界と符合する位置に凸に見える部分(原形を保っている)がある。

点検・調査の結果、IVTM本体下端部にはライナープレート継ぎ目位置が原形を保っている。
IVTM本体はテーパ部には接触せず、下部ガイドの硬いライナープレートに接触した際に、圧痕が残ったものと推定される。

回転ラック軸受台下端



ライナープレートの継ぎ目部には元の形状 (原形) が残っている



実機外観写真90° 方向に残る凸に見える部分



左記拡大写真

■ 回転ラック軸受台下端部の圧痕深さ及び圧痕幅の測定結果

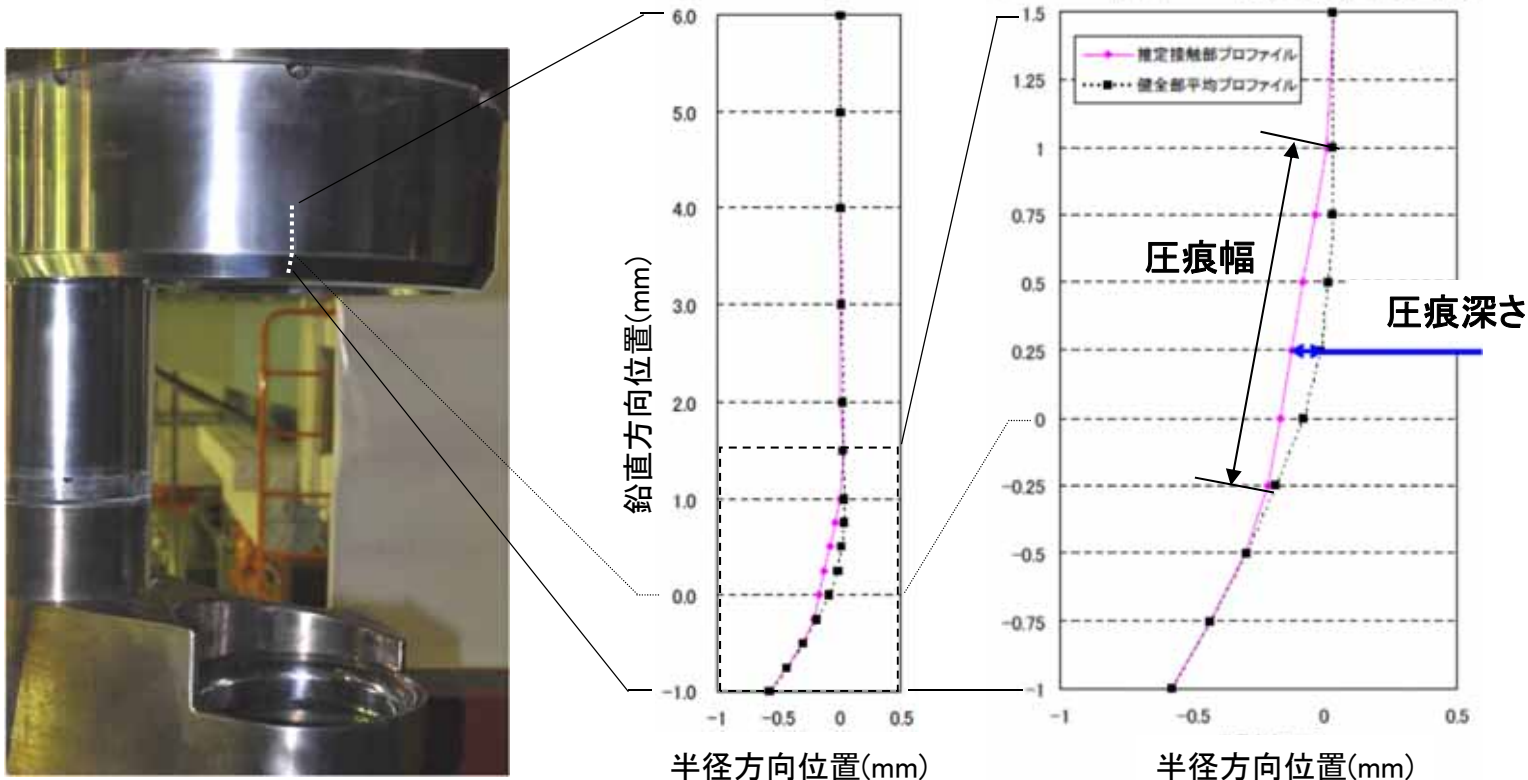
圧痕の状況をシリコン樹脂を用いて型取り(レプリカ)を圧痕範囲(約30° ~170° 方向)に実施し、圧痕深さ及び圧痕幅を調査した。

調査の結果接触範囲は約30° ~170° 方向であり、圧痕の最大深さは、約0.2mm、圧痕幅は、平均約2.6mmであった。



レプリカ採取状況

* : 最も値が大きいR部下端から0.25mm高さでの測定結果(下図参照)

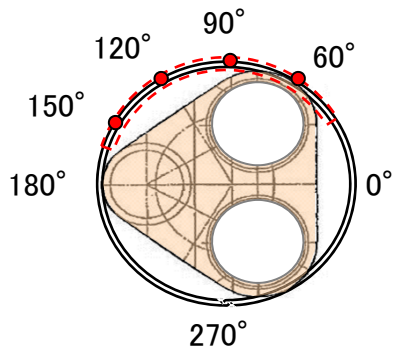
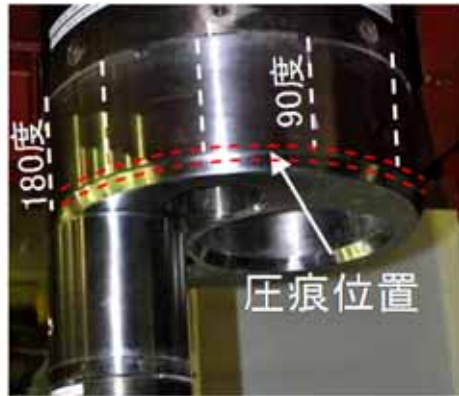


測定結果の例

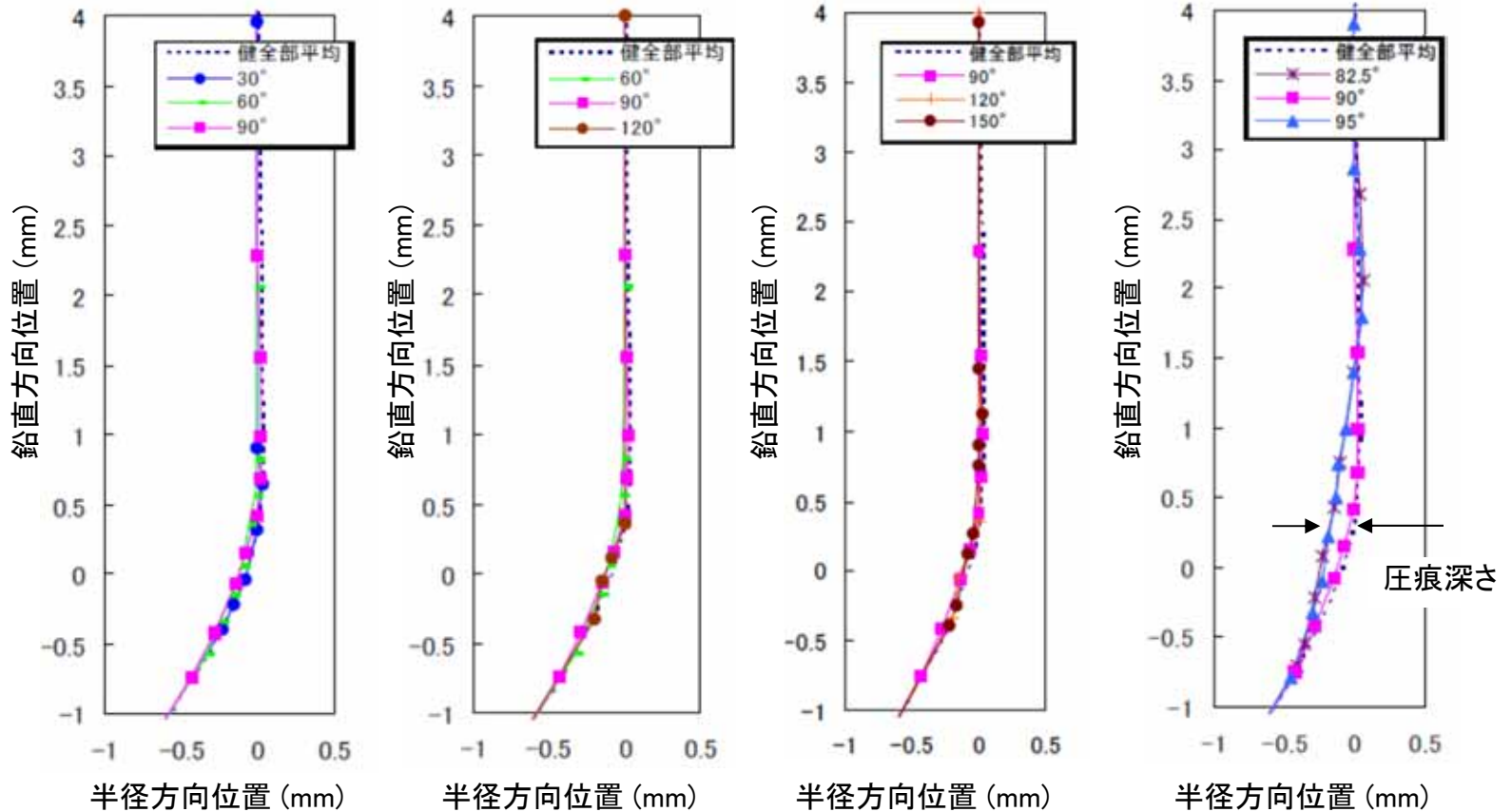


■ 60° 90° 120° 150° 方向に目視確認した凸状の圧痕の調査結果

レプリカによる調査の結果、30°、60°、90°、120°、150° は元の形状(原形)がそのまま残っている。82.5° と95° は下部ガイドとの接触により凹部となっている。



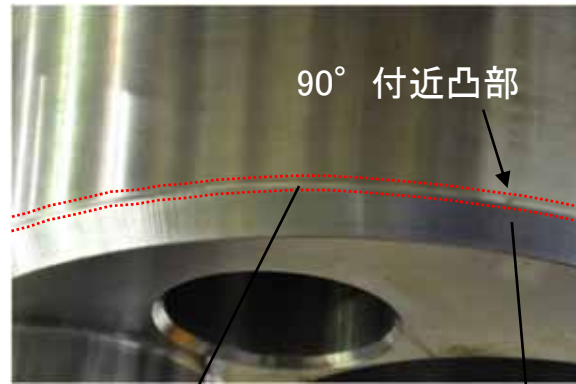
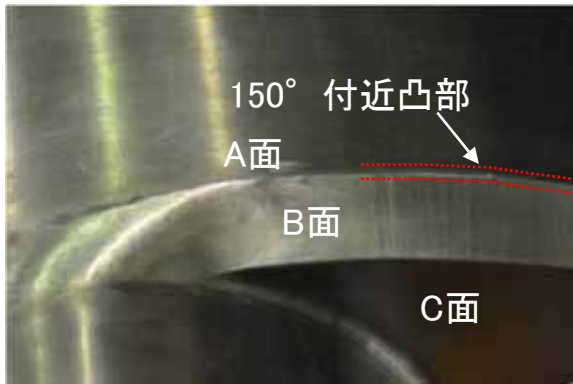
- 圧痕が確認された位置
- 凸に見える部分



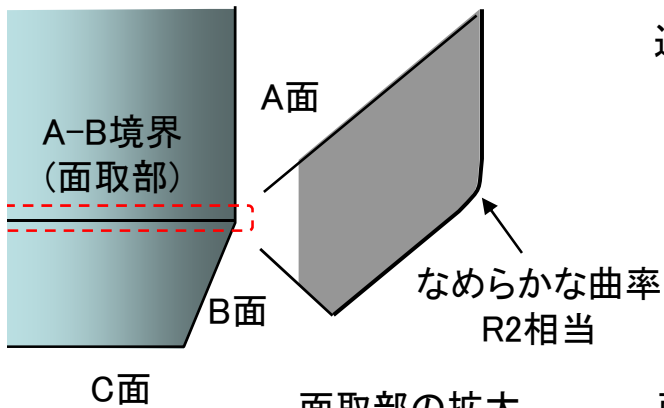
回転ラック軸受台部の凹凸部の形状比較

■ 構造解析の目的

点検・調査結果より得られたIVTM本体下端(回転ラック軸受台)に残る圧痕の深さ、幅、形状(凹凸)及び接触した範囲を入力条件として、構造解析によってIVTM本体側の圧痕(変形量)の再現と、下部ガイドが受ける影響(変形量)の評価を目的とする。

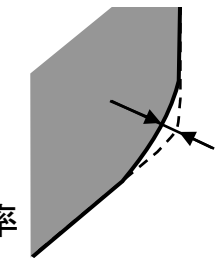


圧痕の写真

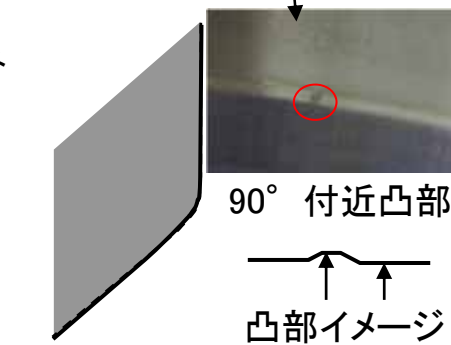


面取部の拡大
(通常面)

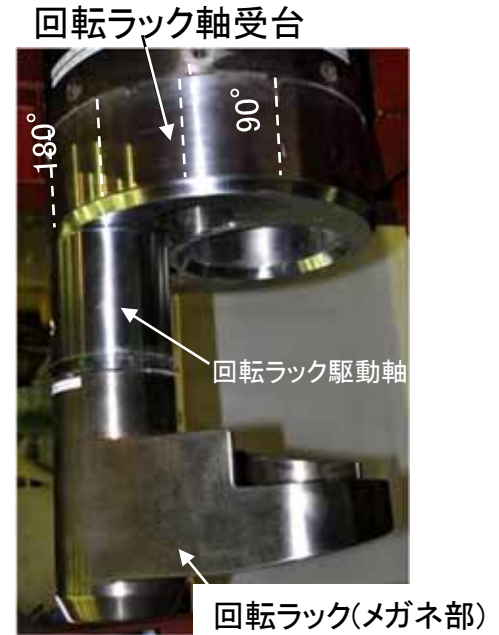
通常面からの凹み



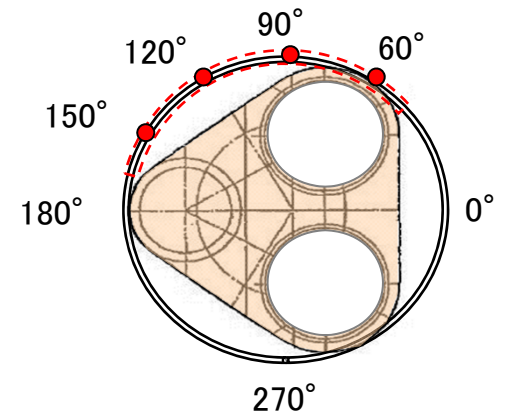
面取部の拡大
(圧痕の凹み)



面取部の拡大
圧痕の凹みが見られない、
原形が保たれていた

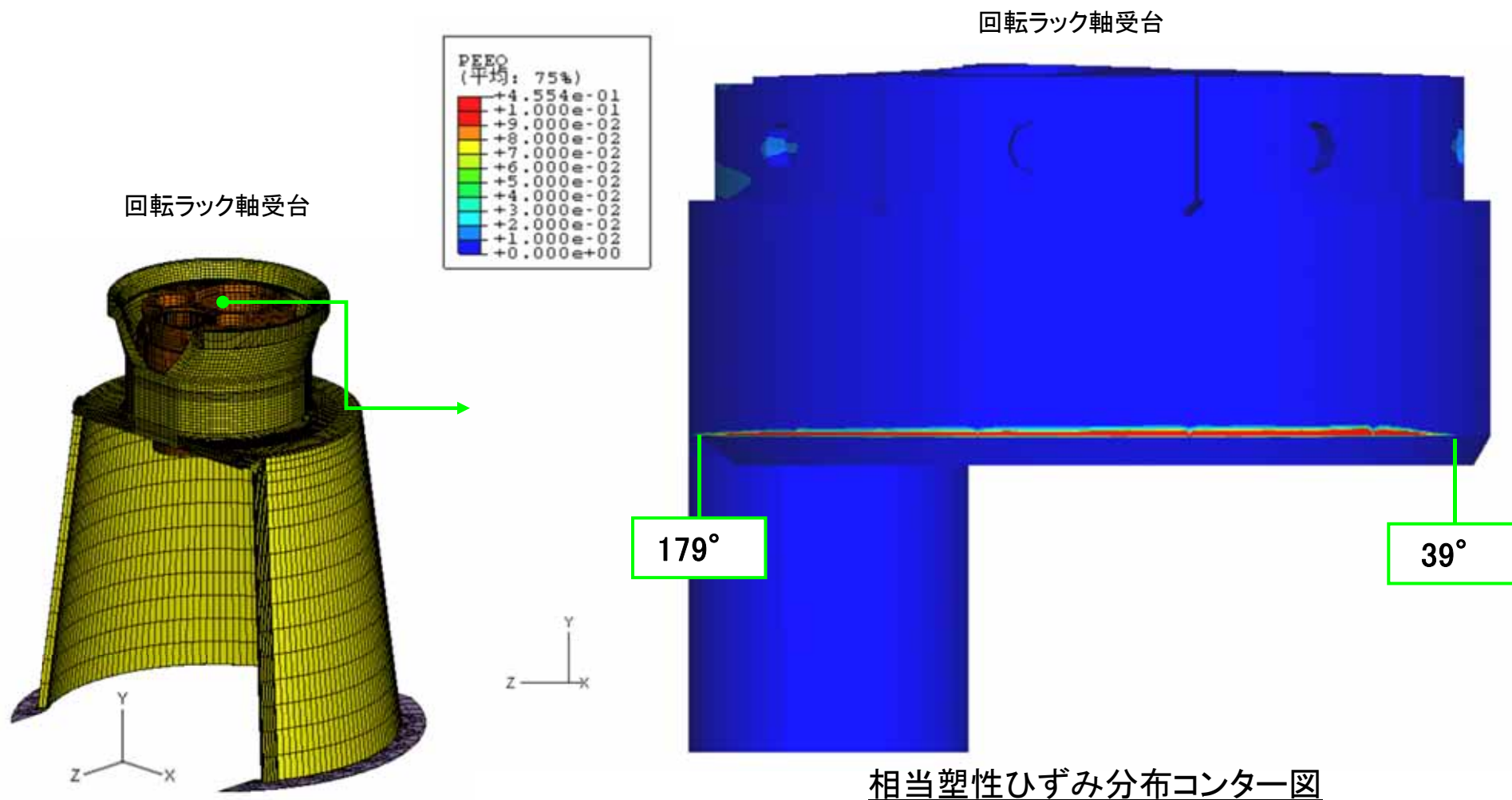


矢視A



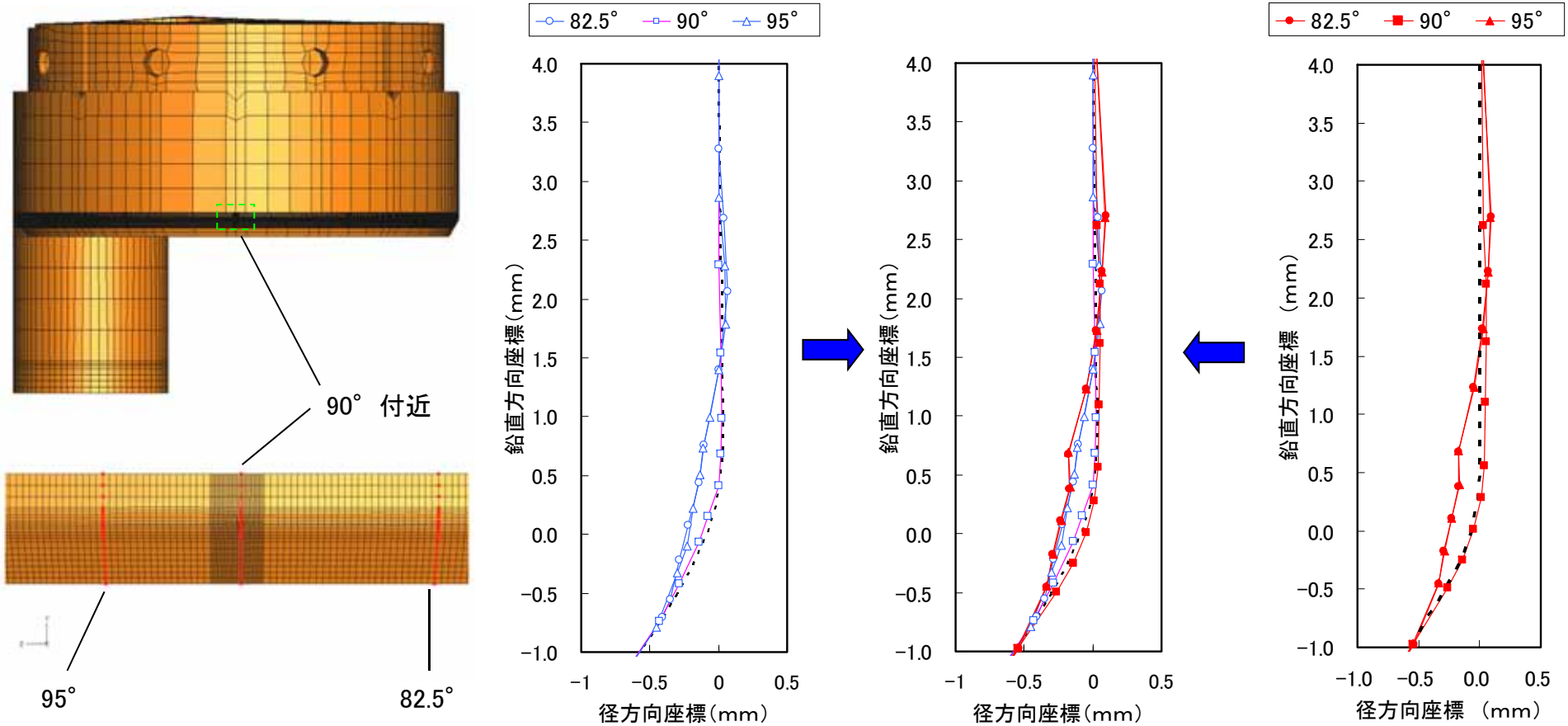
--- 圧痕が確認された位置
● 凸に見える(原形を保っている)部分
回転ラック部の全景写真と方位
(下方からの矢視A)

■ 回転ラック軸受台における接触範囲



構造解析の結果およそ 39° ~ 179° の範囲で圧痕が発生
 ⇒ 点検調査における圧痕範囲(約30° ~ 約170°)と概ね一致する

■ 構造解析とレプリカ調査における回転ラック軸受台圧痕の比較(干渉量1.0mm)



90° 方向の回転ラック表面

測定結果

重ね書き

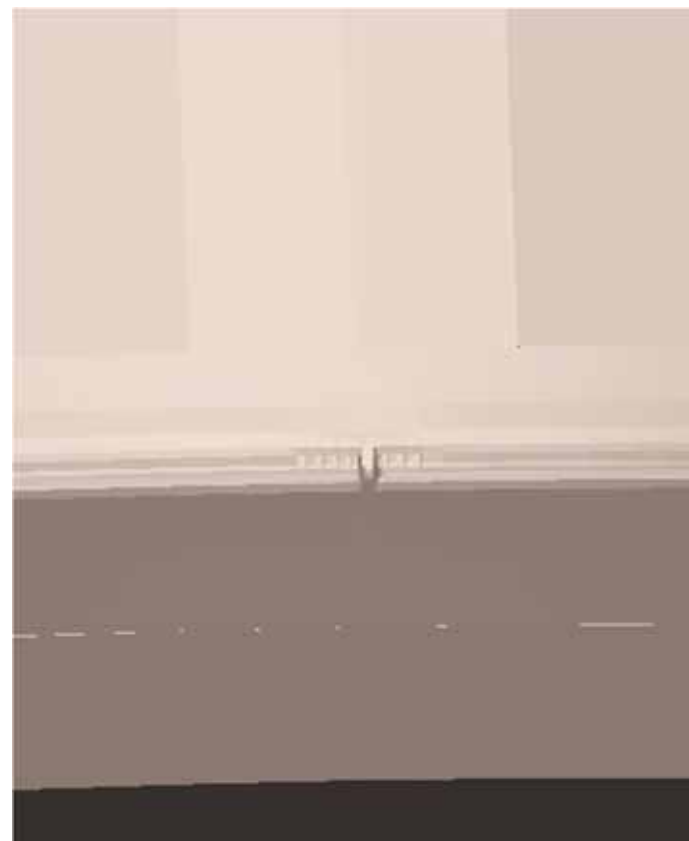
解析結果

構造解析の結果、深さ最大約0.2mm、幅平均約2.6mmで圧痕が発生
 ⇒点検調査における接触痕の形状(深さ、幅)とよく一致する

■ 構造解析と外観調査における回転ラック軸受台圧痕の比較



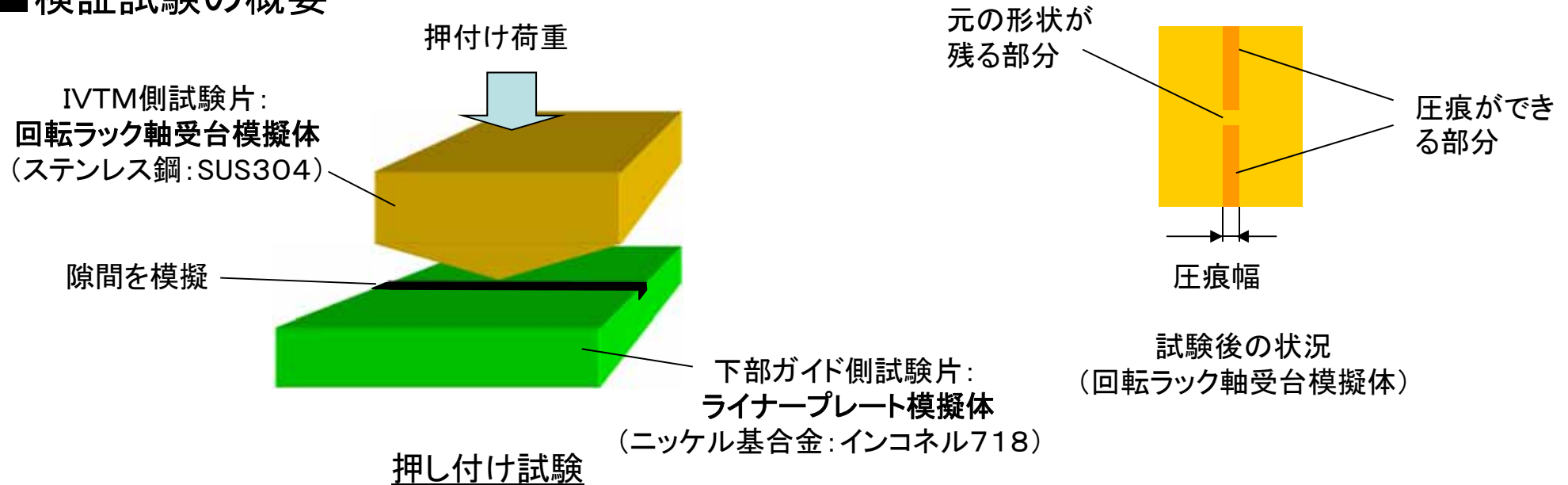
回転ラック軸受台 90° 方向(拡大)



解析結果(90° 方向)

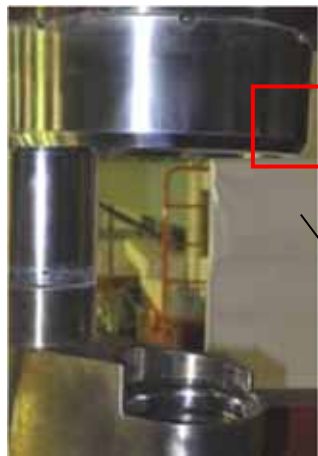
干渉量を1.0mmとした解析により、回転ラック軸受台接触部付近の変形状態(圧痕範囲、深さ、幅)及びライナープレートの継ぎ目により生じる凸部が再現できることを確認した。
 ⇒ 回転ラック部はテーパ部に接触せず直接ライナープレートに接触したことを裏付ける。

■ 検証試験の概要

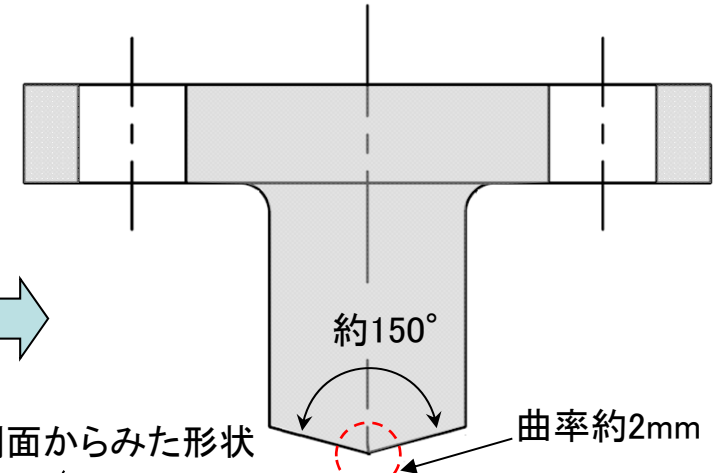
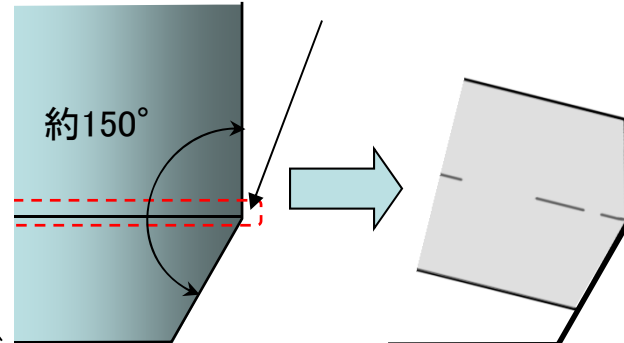


【検証試験の目的】

- 下部ガイドのライナープレートを模擬した試験片にIVTM本体を模擬した試験片を押し付け、硬いライナープレート側にはほとんど接触痕が残らず、IVTM側に引抜き後に認められたものと同様の圧痕が残ることを確認する。
- 次に、解析により試験結果が再現できることを確認し、解析コードの検証を行う。
- 圧痕幅と押し付け荷重の関係を求め、単位長さ当たりどの程度の押し付け荷重が加わると、引抜き後のIVTM本体に認められたような圧痕が残るかを定量的に確認する。



圧痕が確認された回転ラック下端部
(曲率約2mmのなめらかな角)

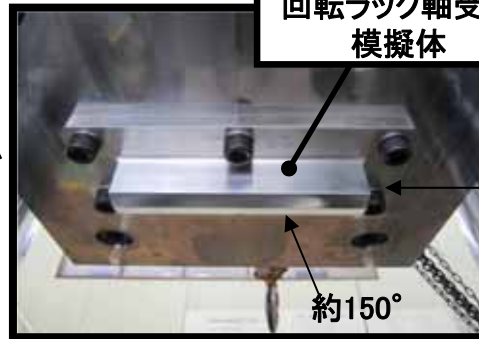
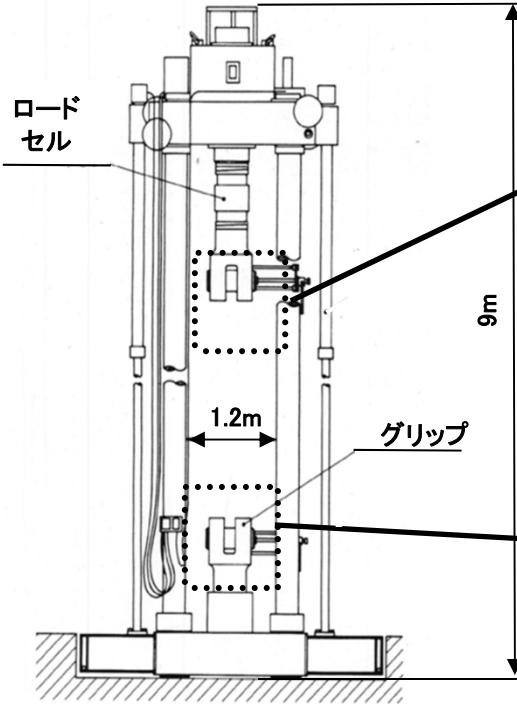


回転ラック軸受台(実機)

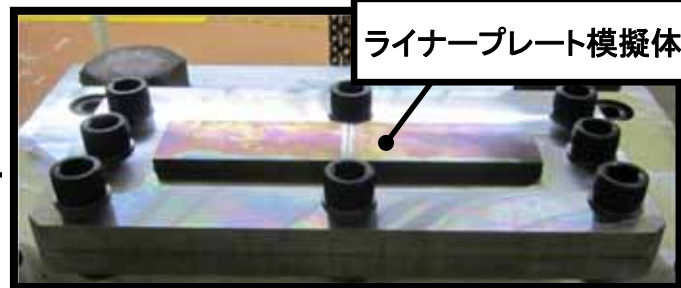
回転ラック軸受台
模擬体

回転ラック軸受台模擬体

検証試験条件



回転ラック軸受台模擬体取付け外観



ライナープレート模擬体取付け外観

試験 No.	押付け荷重 [kN]	雰囲気
1	700	気中 室温
2	600	
3	500	
4	300	
5	100	

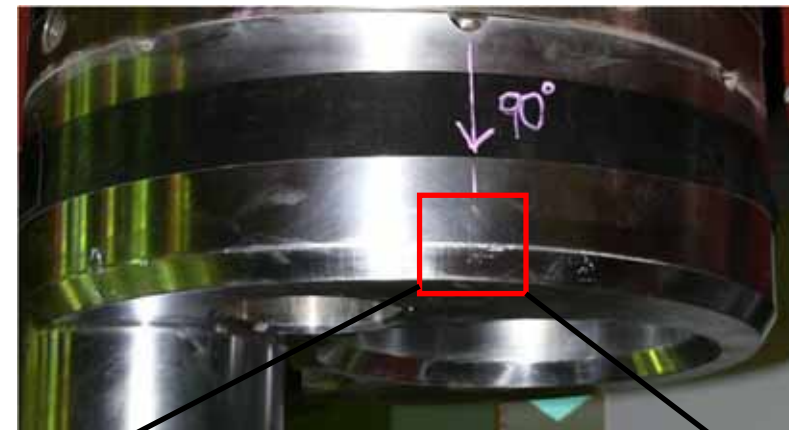
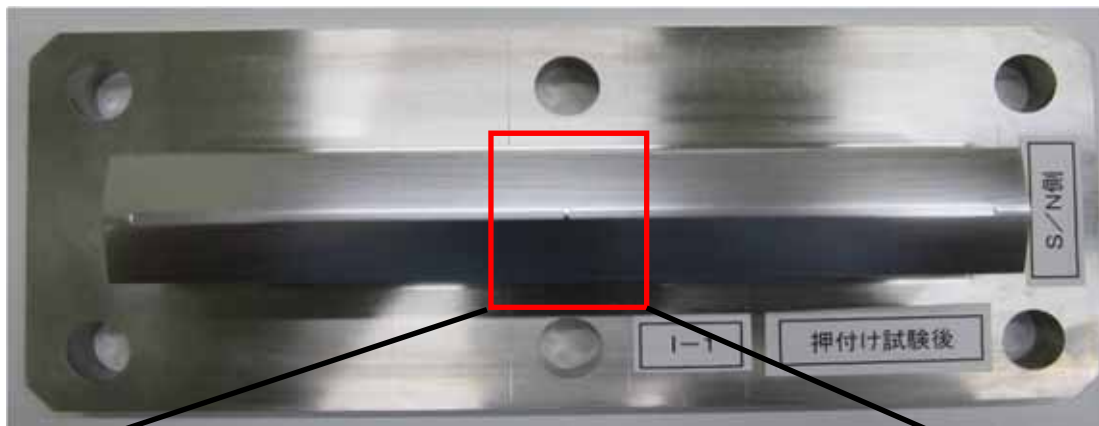
材質

回転ラック軸受台模擬体: SUS304

下部ガイドライナープレート模擬体: インコネル718

試験装置外観図

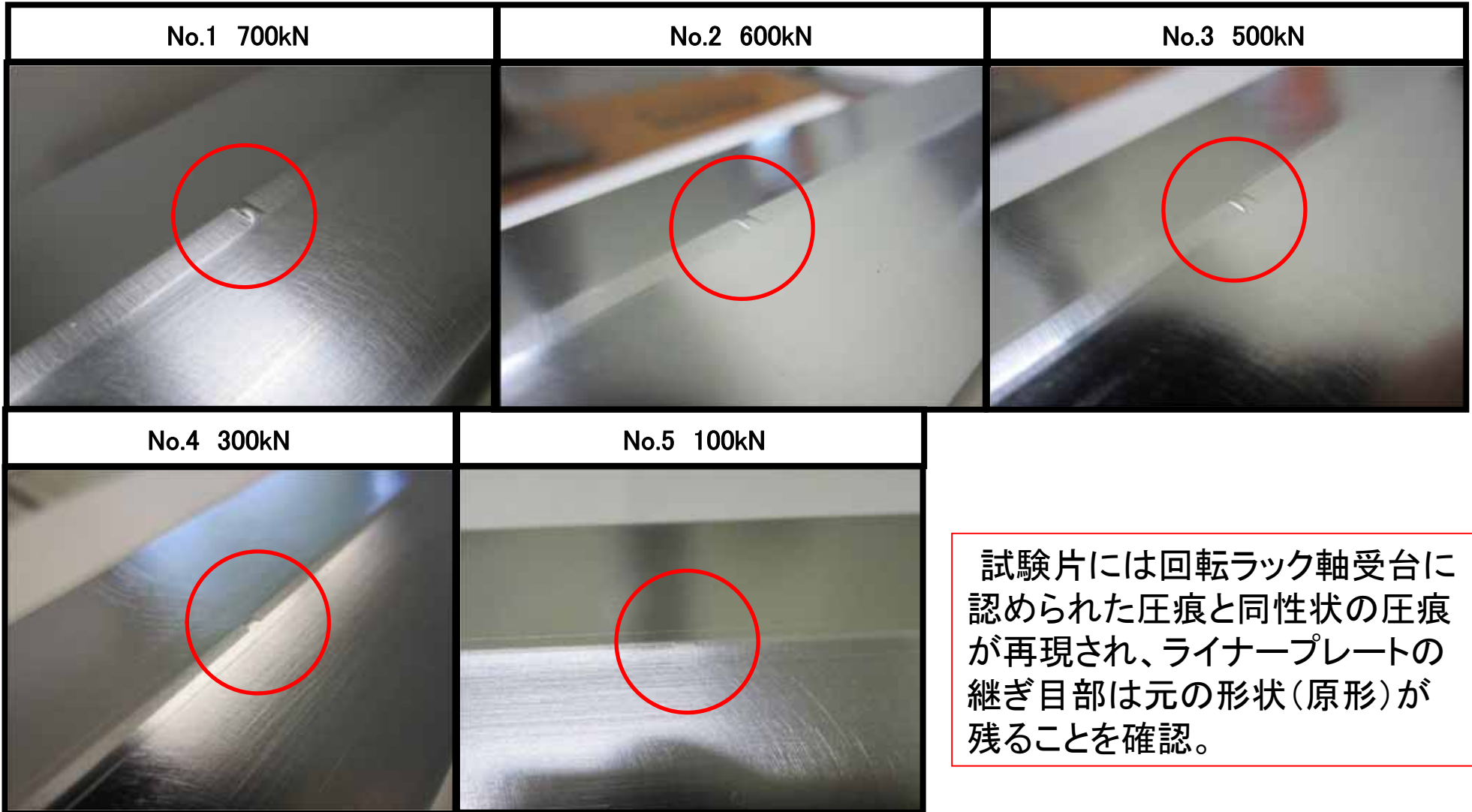
■ 検証試験と外観調査による回転ラック軸受台圧痕の比較



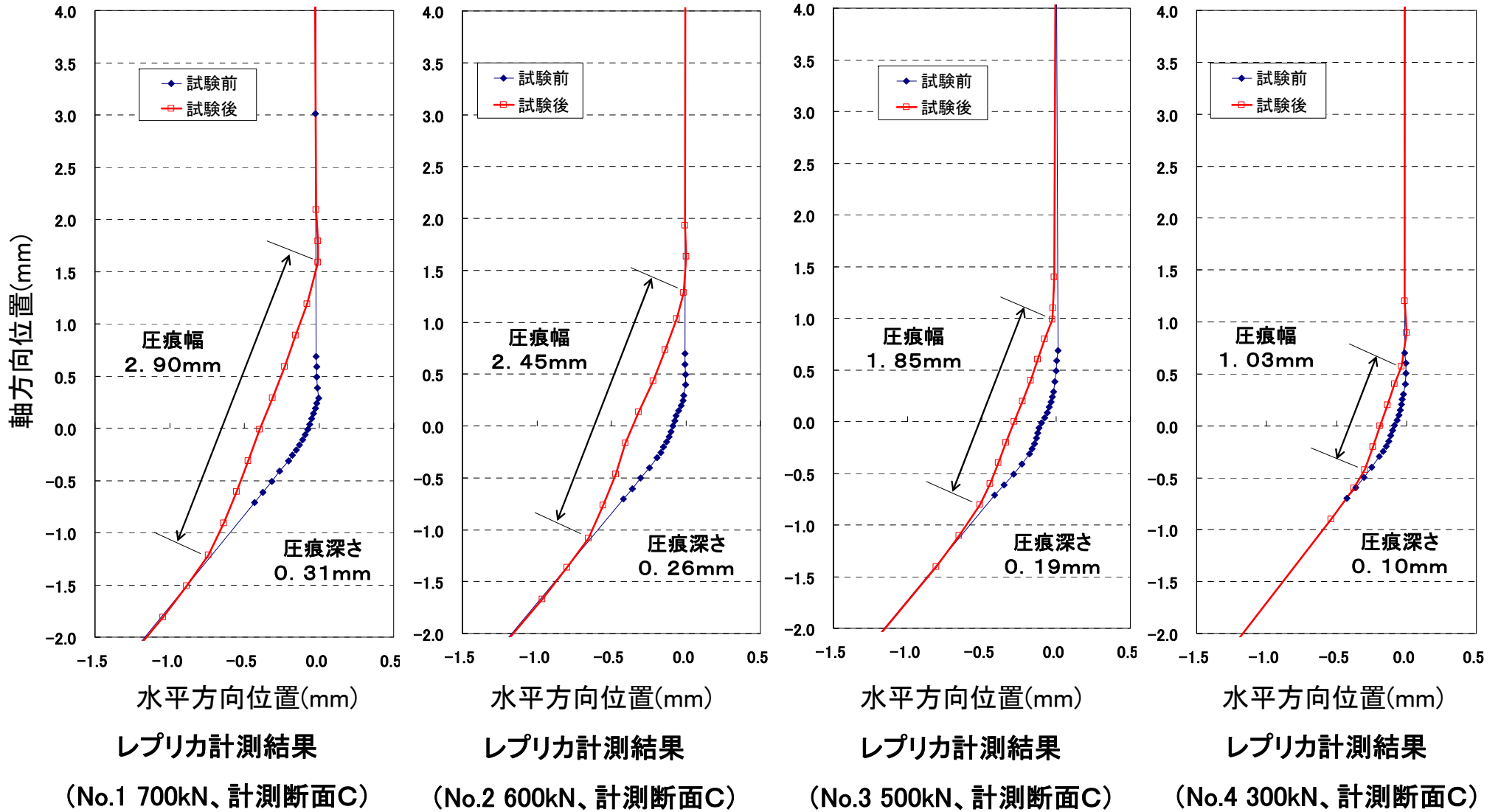
試験後外観写真(試験条件No.1:押付け荷重700kN)

回転ラック軸受台 外観写真(90°方位)

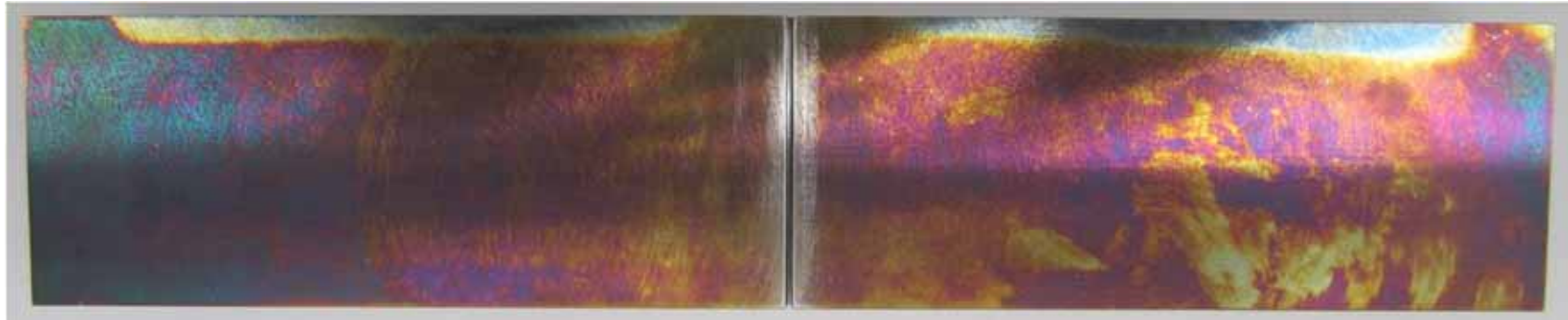
■ 押付け荷重をパラメータとした圧痕の再現



■ 試験片に付いた圧痕の計測

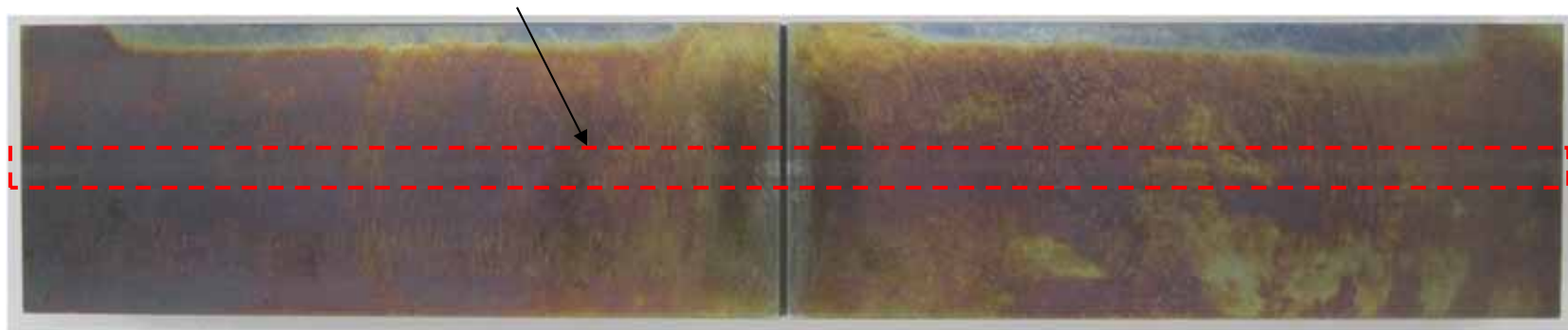


■下部ガイド ライナープレート模擬体への押付け荷重の影響確認(目視)



試験前外観写真

回転ラック軸受台模擬体との接触位置



試験後外観写真(700kN及び600kN試験後の状況)

目視による観察では下部ガイドライナープレートへの影響はない

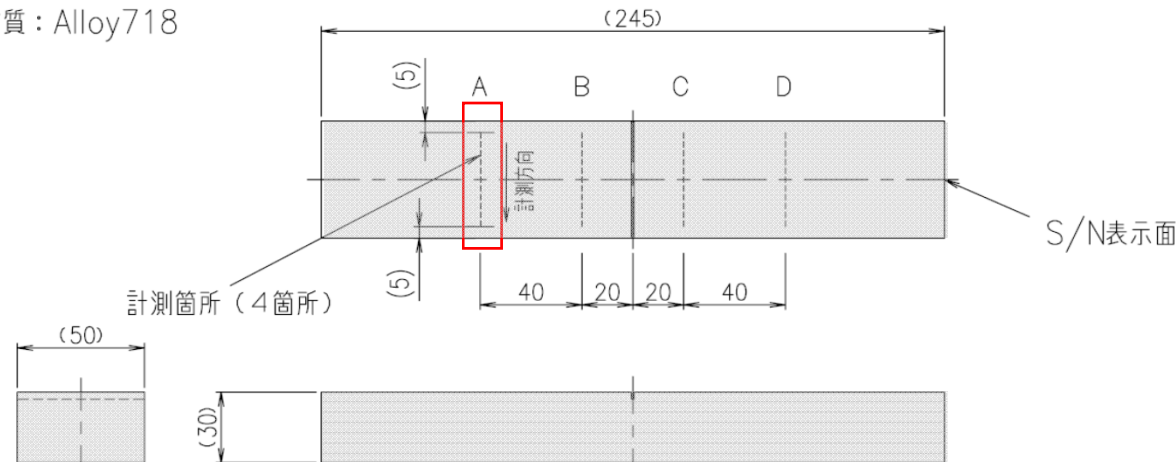
■ 下部ガイド ライナープレート模擬体への押付け荷重の影響確認(表面計測)

下部ガイド ライナープレート模擬体の表面形状を触針式表面粗さ計を用いた確認を実施

■ 下部ガイド ライナープレート模擬体 S/N L-1

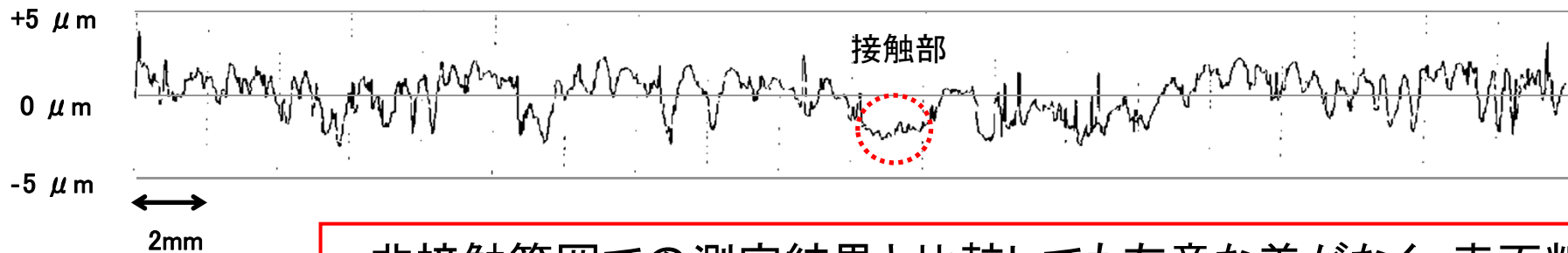
■ 模擬体試験履歴 押付け荷重条件700kN、600kNでの試験実施後に測定

材質: Alloy718



表面形状の測定位置

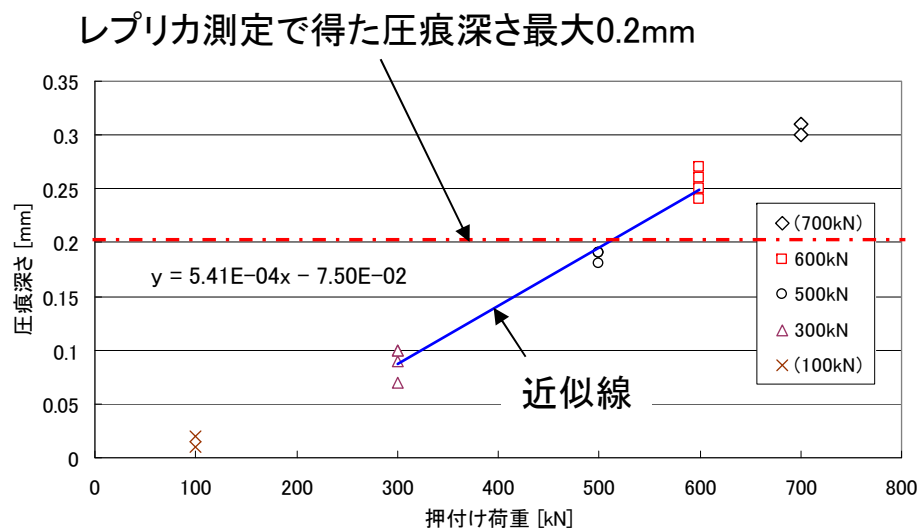
計測結果(計測位置A)



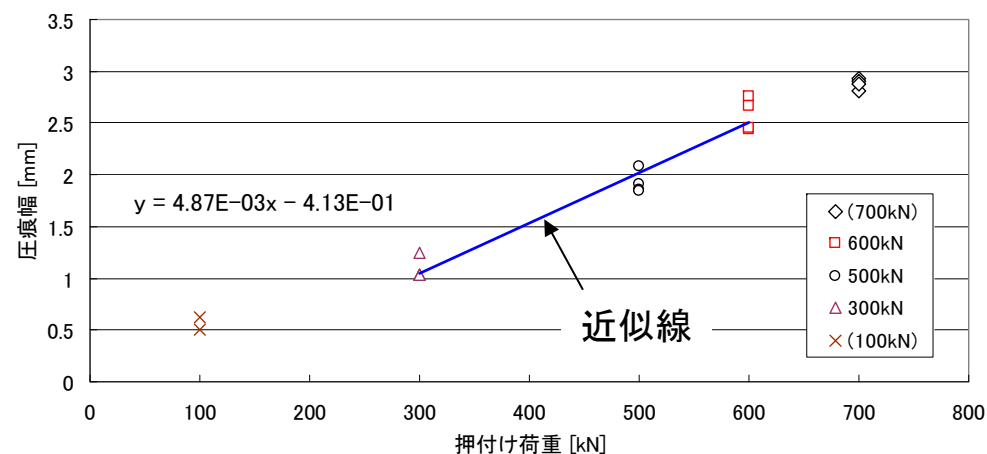
非接触範囲での測定結果と比較しても有意な差がなく、表面粗さ以下の接触痕しか残らないことを確認した。

■ 荷重と圧痕との関係

試験結果より、押付け荷重と圧痕深さ及び押付け荷重と圧痕幅の関係は下図の様に比例関係が確認できる。



荷重と圧痕深さの関係



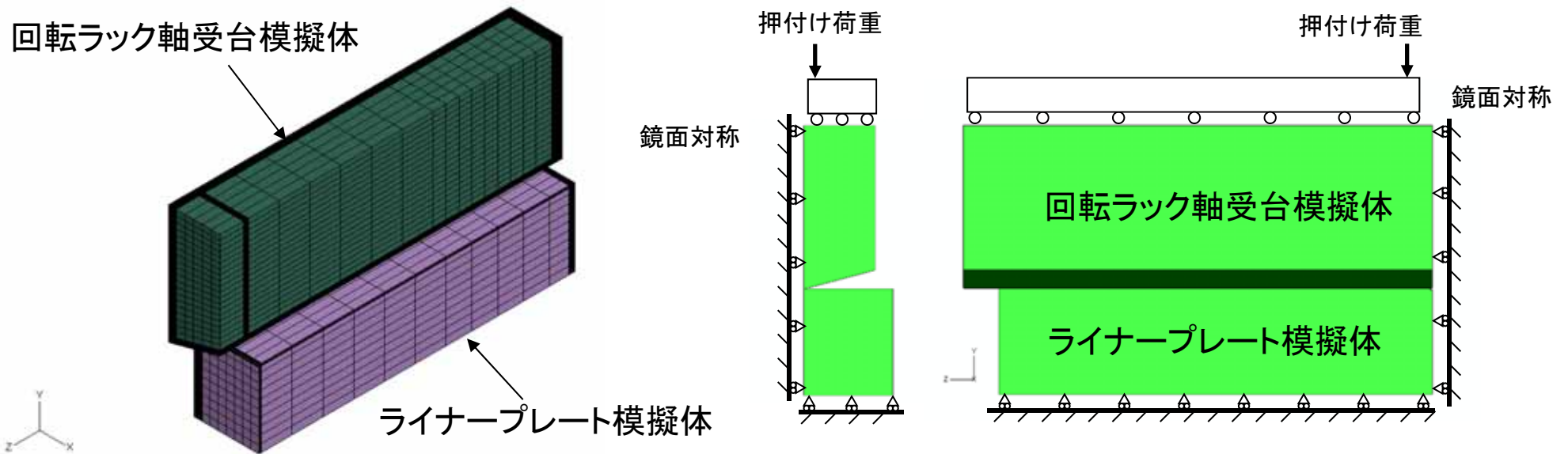
荷重と圧痕幅の関係

(注) 押付け荷重100kNでの試験は圧痕深さ／幅の値が小さく、回転ラック軸受台模擬体の接触部先端のR2形状が圧痕深さ／幅に与える影響が大きくなるため、参考データとする。

この試験によって得られたデータを基に検証試験片の解析結果との比較を実施。

■ 検証試験の解析の目的:

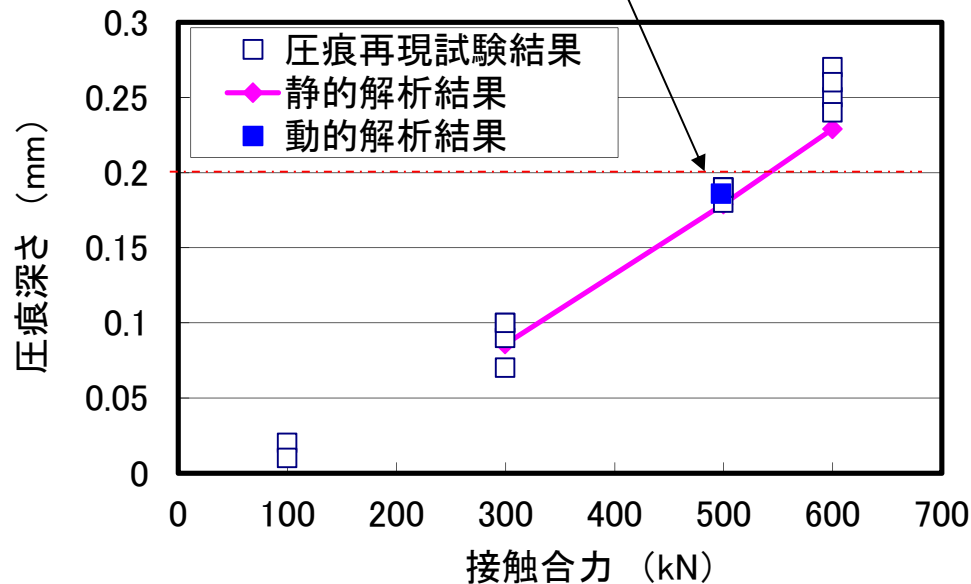
下部ガイドの構造解析と同じ解析コードを用いて解析を実施し、検証試験で得られた圧痕深さ、幅、荷重が再現できるか確認を行う。



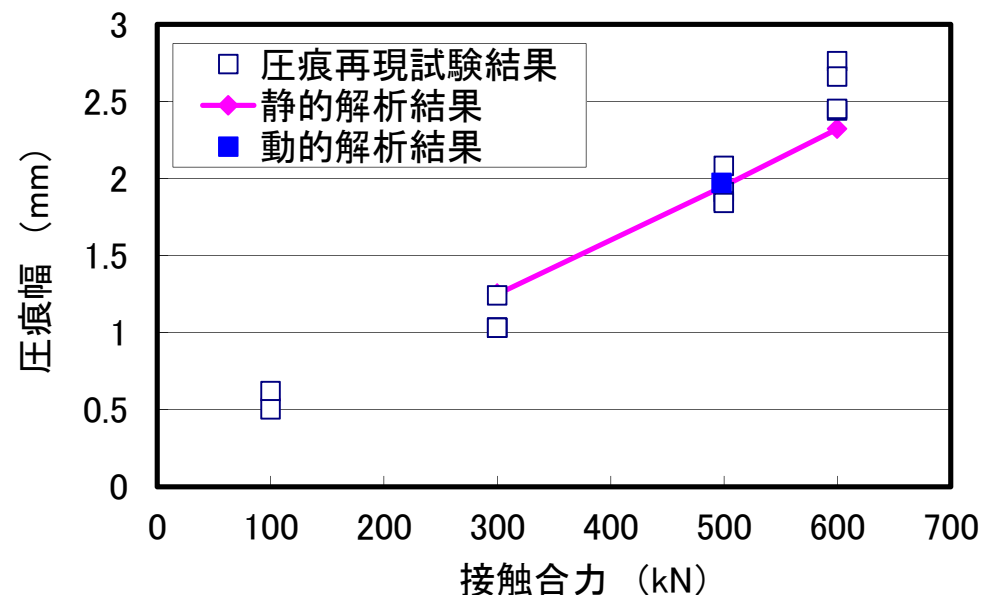
検証試験の解析モデル

■ 試験結果と解析の比較

レプリカ測定で得た圧痕深さ最大0.2mm



荷重と圧痕深さの関係

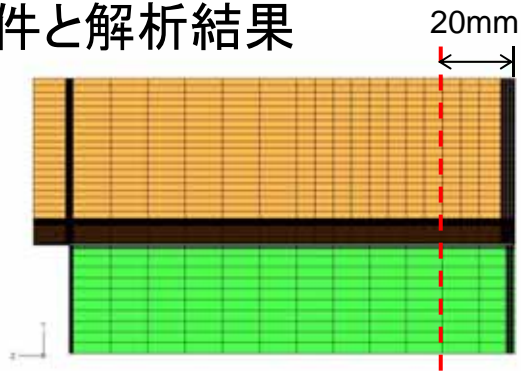


荷重と圧痕幅の関係

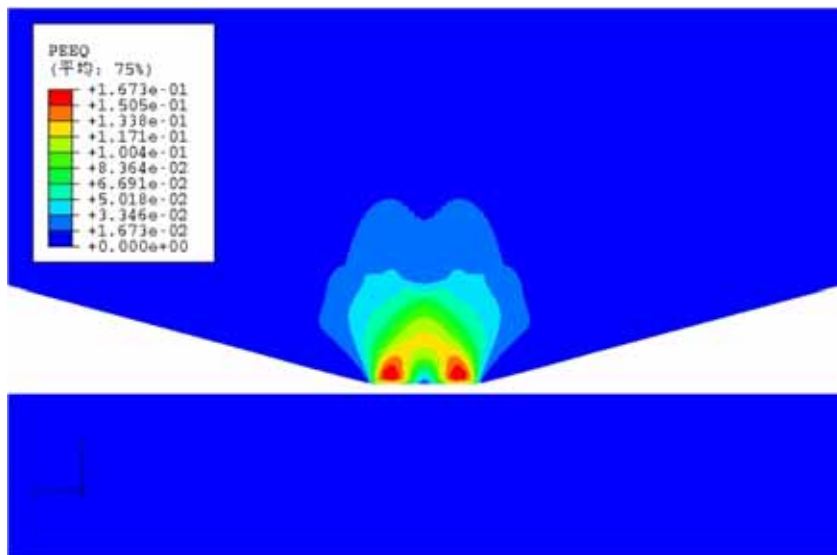
押付け速度を考慮した動的解析と静的解析は、試験の結果とほぼ同等の荷重と圧痕の関係が得られることが確認。

解析コードの妥当性を確認した。

解析条件と解析結果

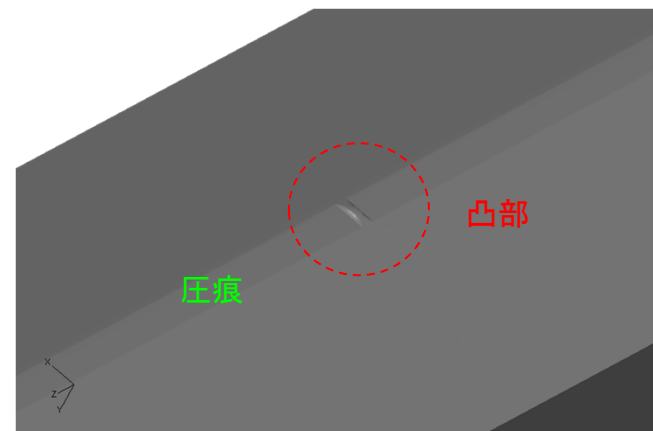
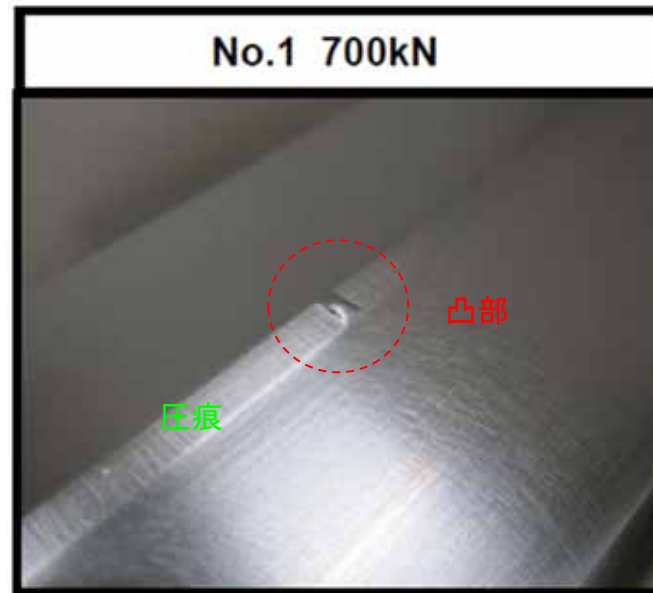


回転ラック軸受台模擬体

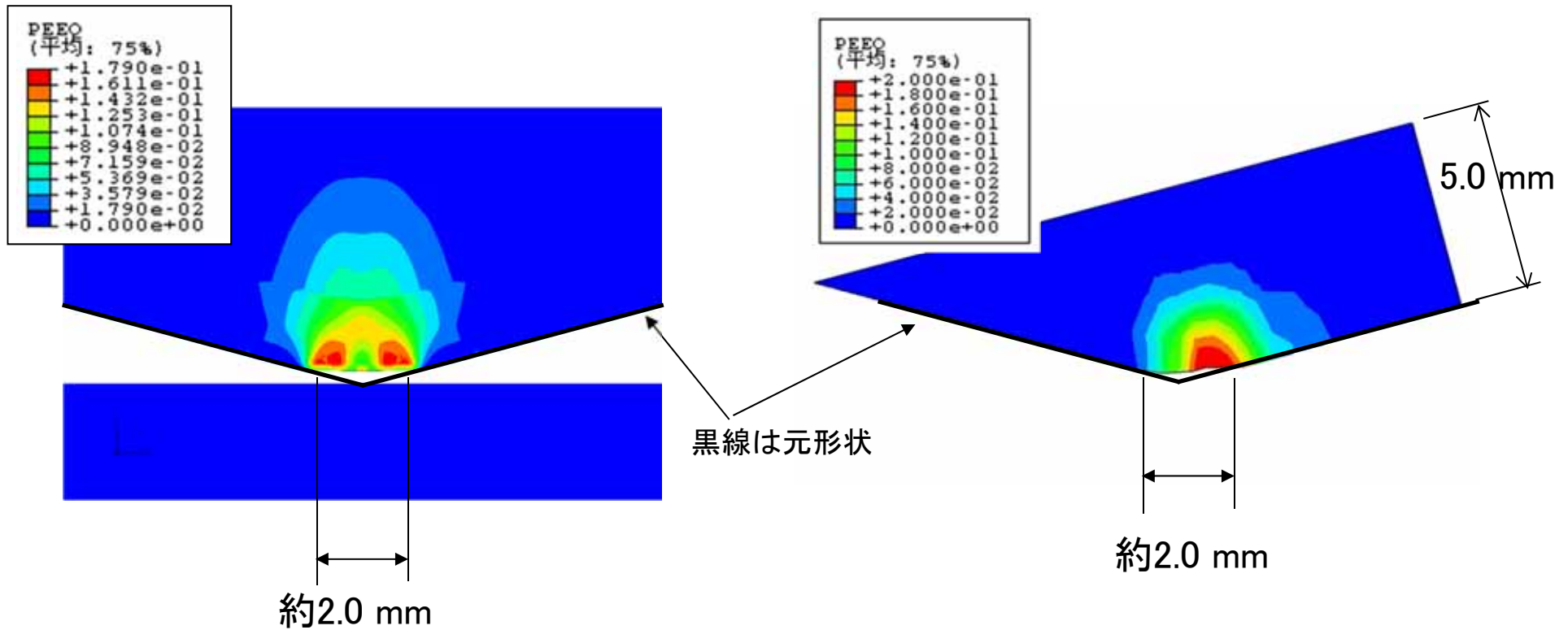


ライナープレート模擬体

相当塑性ひずみ分布(除荷後)



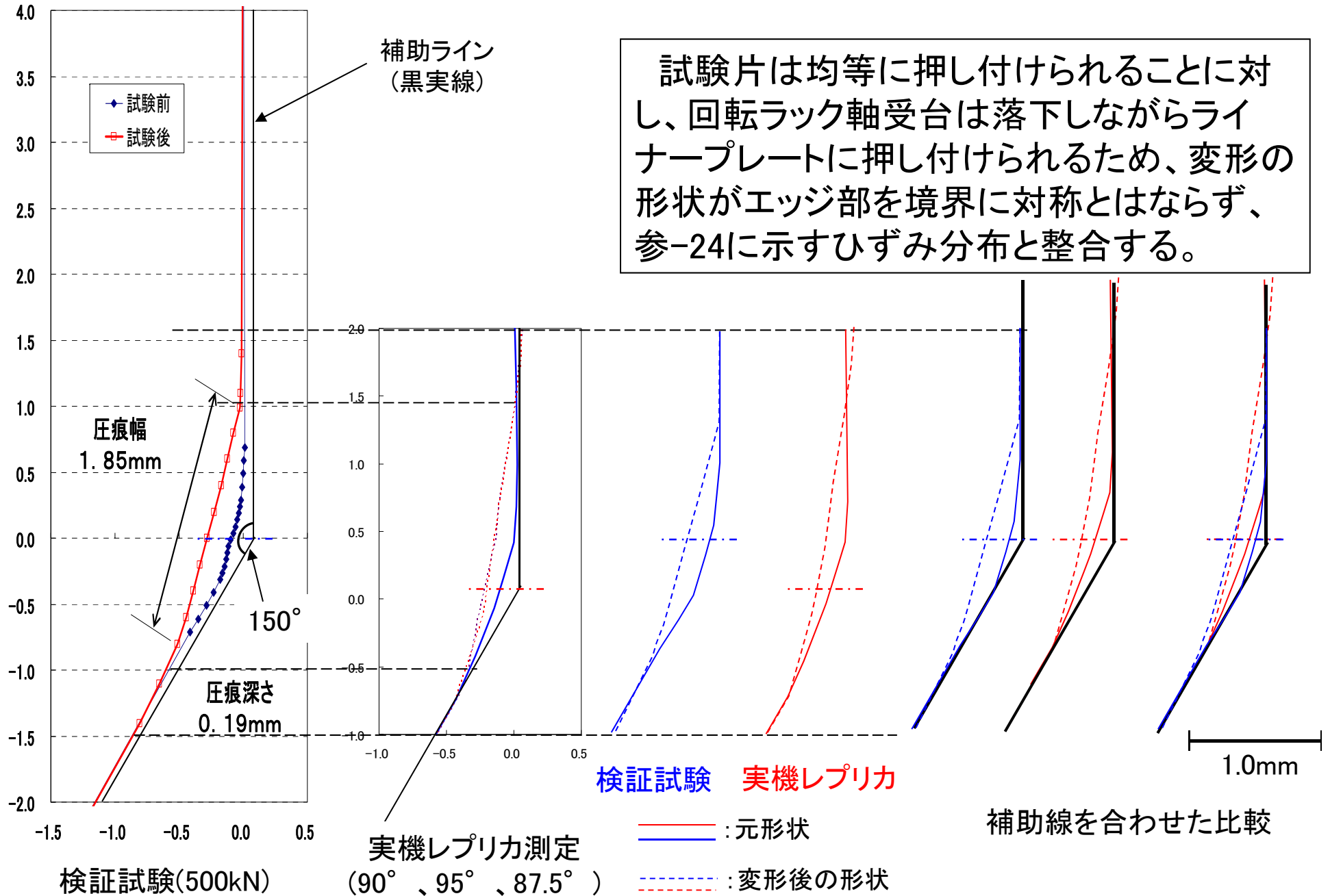
凸部近傍における試験体と解析結果の比較



検証試験片の解析

実機回転ラック軸受台の解析

試験片はエッジ部を対称にしてひずみが発生しているが、実機解析では接触が回転ラック軸受台が下方に落下していくため、回転ラック軸受台エッジ部の上方側にひずみが発生する。



■ 検証試験体系の動的解析の実施

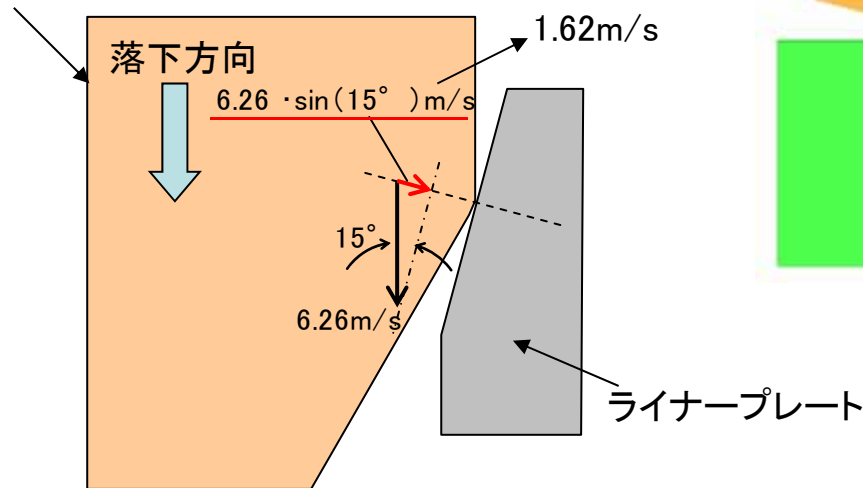
解析条件

- ・変位制御(約0.1msで約0.16mm)
- ・負荷速度 : 1.62 m/s
- ・減衰 : 5 %
- ・摩擦係数 : 0.1

解析結果

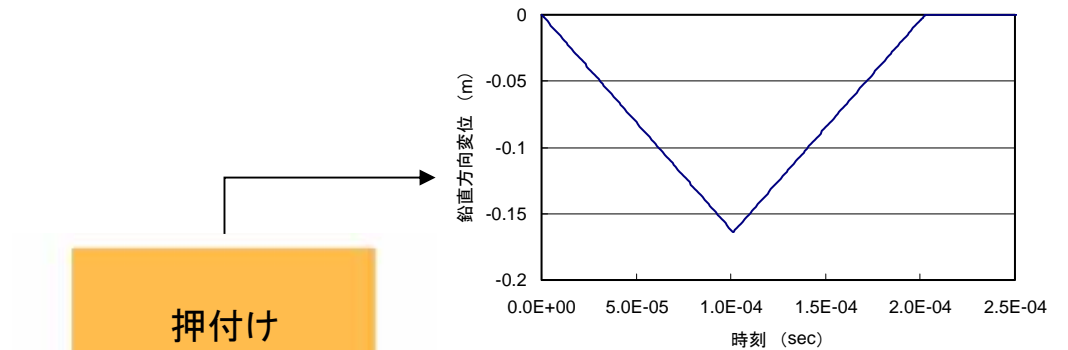
- ・最大発生荷重 : 約498kN
- ・圧痕深さ : 約0.19mm、幅 : 約2.0mm

回転ラック軸受台

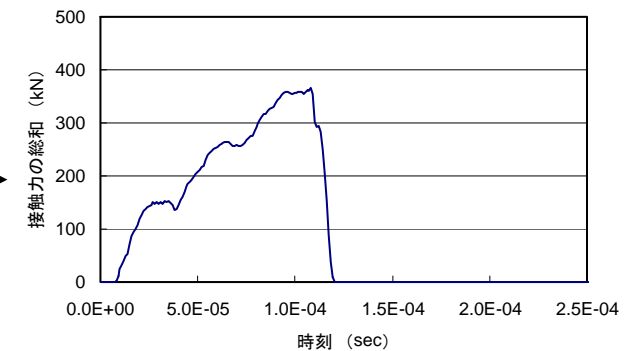
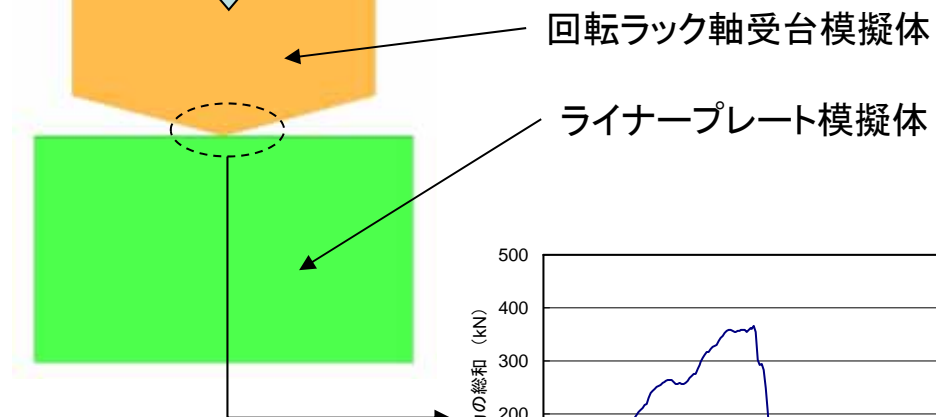


回転ラック軸受台とライナープレートの接触状態

回転ラック軸受台模擬体をライナープレート模擬体を実機を模擬した速度で押し付ける。0.1msで0.162mmの押し付けを変位で与える。



回転ラック軸受台模擬体の変位



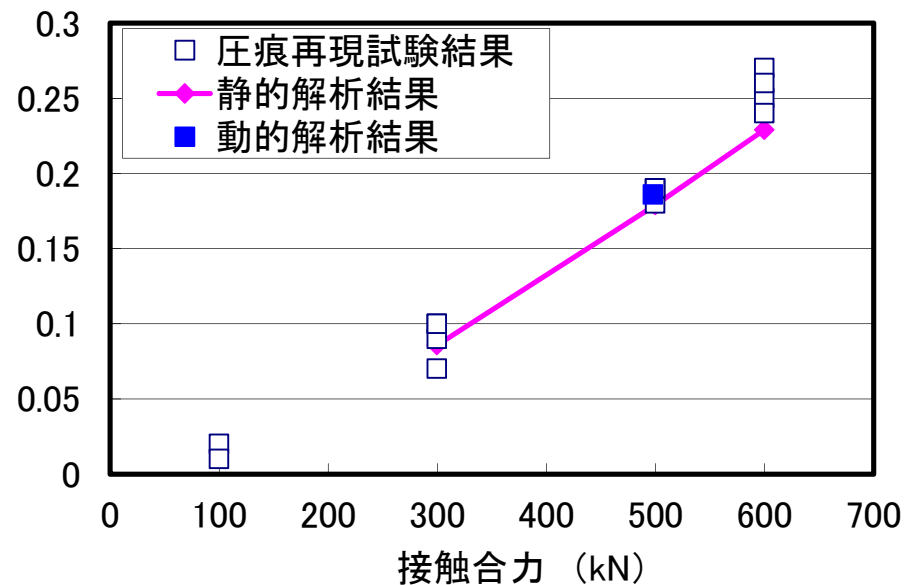
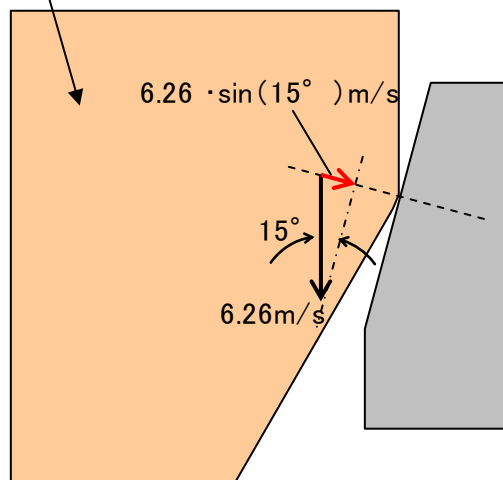
回転ラック軸受台模擬体に発生する荷重

■ 試験を模擬した解析と圧痕再現試験の比較

解析条件(動的)

- ・負荷速度 : 1.62 m/s
($2.33E-04$ m / $1.44E-04$ s)
- ・減衰 : 5 %
- ・摩擦係数 : 0.1

回転ラック軸受台



接触合力と圧痕深さの関係

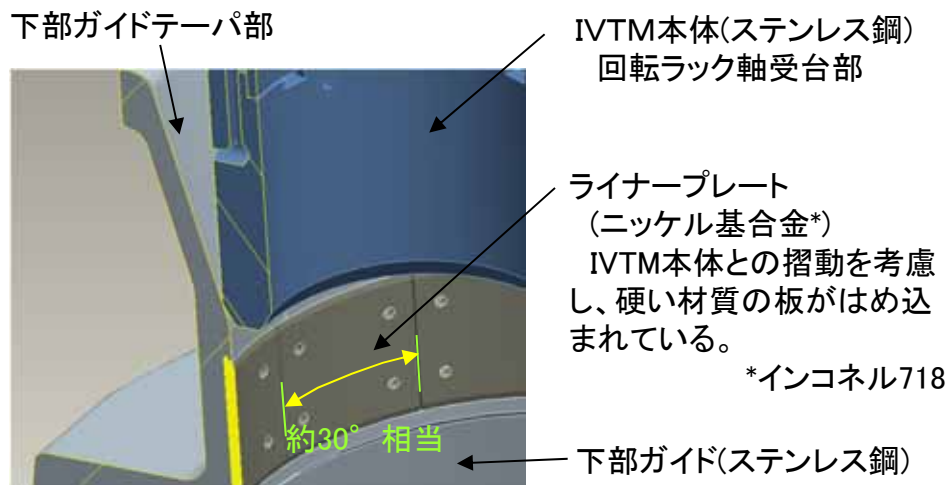
準静的試験で生じた変形と動的解析で生じた変形(圧痕深さ)は概ね一致する

解析評価において検証試験でIVTM本体回転ラック軸受台模擬体に圧痕をつけるのに要した荷重と下部ガイド構造解析においてIVTM本体回転ラック軸受台に圧痕をつけるのに要した荷重は変形量(圧痕深さ)が同一であれば、最大荷重も原理的に同一になると想定される。従って、圧痕から推定される荷重と解析から推定される荷重を比較する。

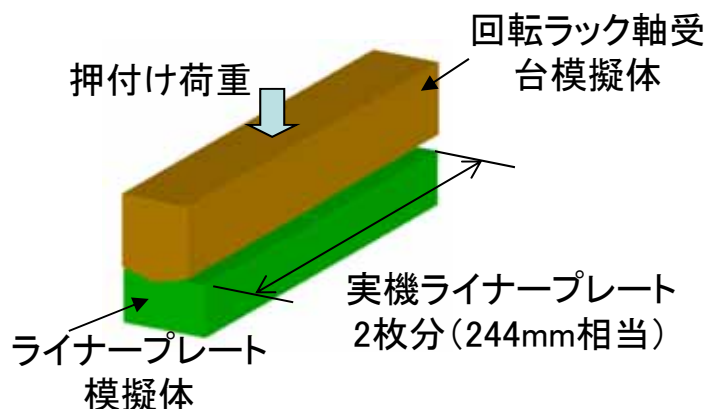
- 下部ガイドのライナープレートを模擬した試験片にIVTM本体を模擬した試験片を押し付けた結果、硬いライナープレート側にはほとんど接触痕が残らず、IVTM側に引抜き後に認められたものと同様の圧痕が残ることを確認した。
- 試験より試験片に残る圧痕幅と押し付け荷重の関係は、試験を実施した範囲においてほぼ比例関係にあり、深さ約0.2mmの圧痕を付けるのに必要な荷重は約2.08kN/mm(単位長さ当たりの荷重)であった。
- 解析により求めた圧痕の形状、圧痕幅と押し付け荷重の関係は、試験結果と整合し、解析コードによって試験片の変形が再現できることを確認した。
- 解析評価において検証試験でIVTM本体回転ラック軸受台模擬体に圧痕を付けるのに要した荷重と下部ガイド構造解析においてIVTM本体回転ラック軸受台に圧痕を付けるのに要した荷重は変形量(圧痕深さ)が同一であれば、最大荷重も原理的に同一になると想定される。

■ 検証試験(圧痕再現性試験)による、荷重-圧痕深さの換算式の導出

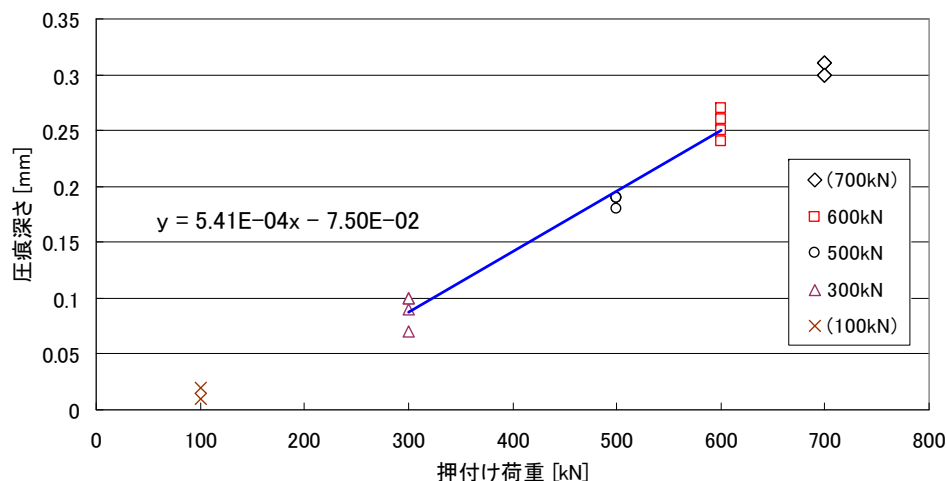
圧痕再現試験結果より、(押付け)荷重-圧痕深さ関係の換算式を作成した。圧痕再現試験体のライナープレート模擬体は、実機ライナープレート2枚分(244mm)であるため、244で除算することで回転ラック軸受台模擬体に発生する単位長さあたりの接触力に換算した。



ライナープレートの概要



圧痕再現試験の概要



圧痕再現試験結果の換算式

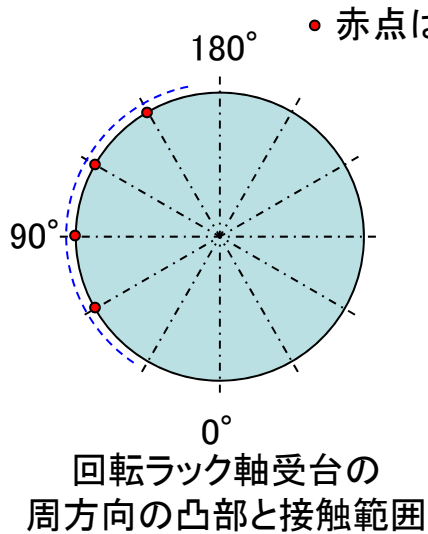
圧痕再現性試験から求めた回転ラック軸受台への押付け荷重と圧痕深さの関係式

$$\text{圧痕深さ(mm)} = 5.41 \times 10^{-4} \times \text{押付け荷重(kN)} - 7.50 \times 10^{-2}$$

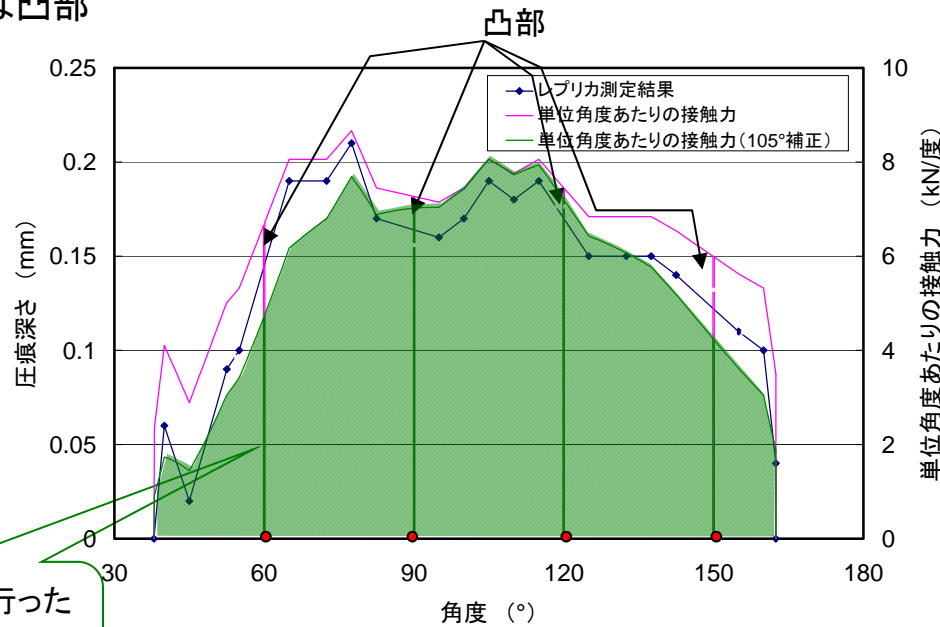
$$\text{押付け荷重(kN/mm)} = \frac{\text{圧痕深さ(mm)} + 7.50 \times 10^{-2}}{5.41 \times 10^{-4}} \times \frac{1}{244}$$

■レプリカ測定と検証試験(圧痕再現性試験)から、回転ラック軸受台(及び下部ガイド)に発生する荷重の推定

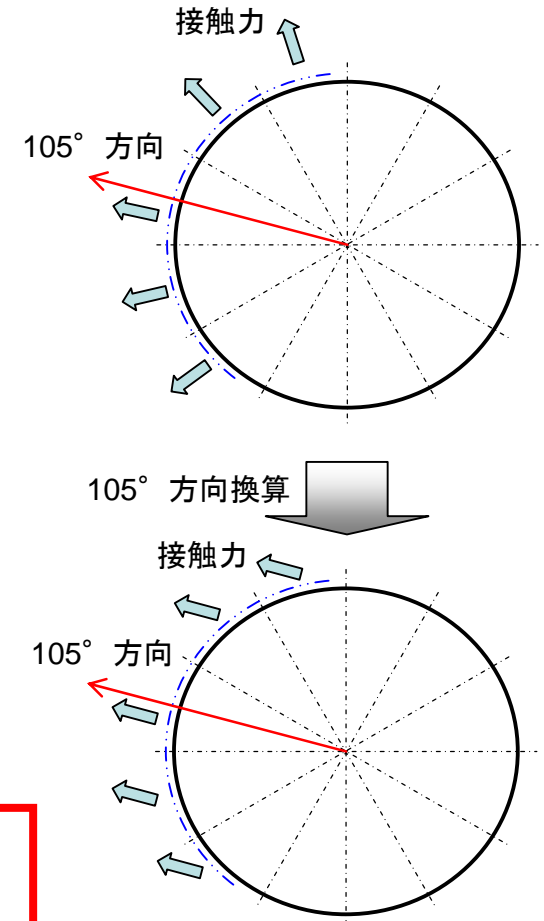
レプリカ計測結果における圧痕深さの分布に、押付け荷重-圧痕深さ関係式を用いて、想定接触方向(105°方向)で換算した接触力を算出する。さらに、得られた接触力の総和について温度補正(降伏応力の温度依存性)等を行い回転ラック軸受台に発生した荷重を推定する。



接触方向補正を行った接触力の総和;
693kN(色塗り部)



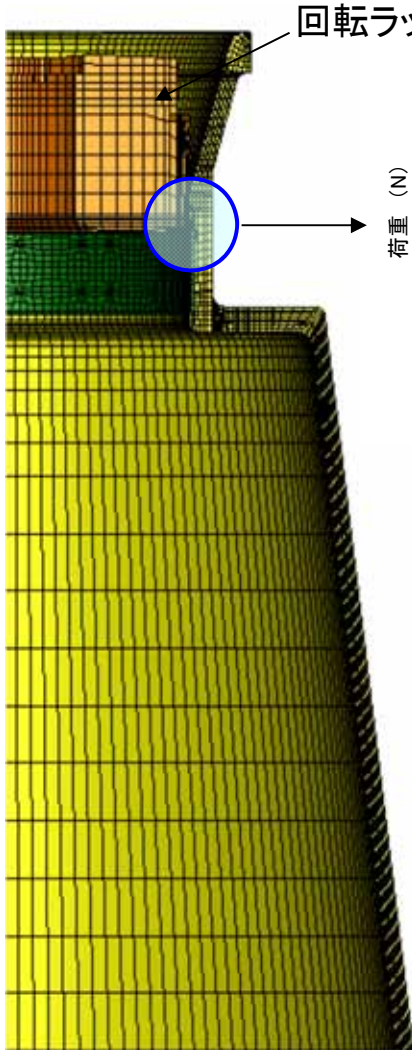
接触力の周方向分布



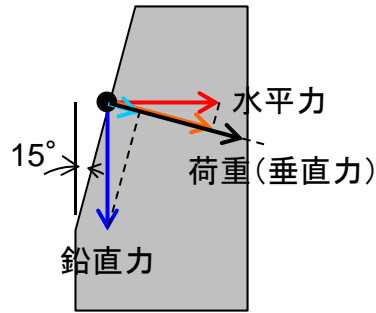
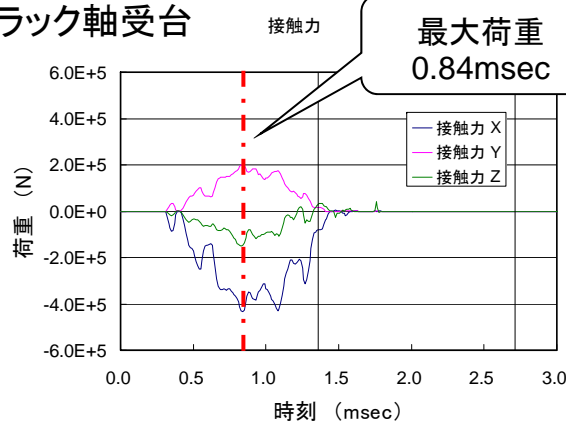
接触力は角度補正を実施

降伏応力を考慮した接触力の総和

$$= \text{接触力の総和} \times \frac{\text{解析での回転ラック軸受台の降伏応力}(200^{\circ}\text{C})}{\text{試験での回転ラック軸受台模擬体の降伏応力}(室温)} = 693 \times \frac{211}{246} = 594 \text{ kN}$$



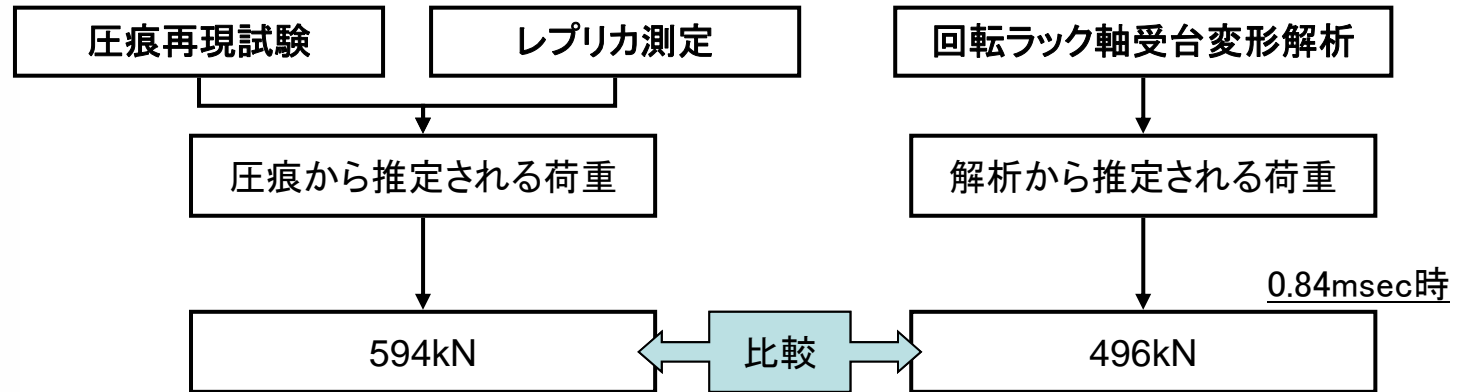
回転ラック軸受台



垂直力の換算

	荷重[kN]
X(水平90°)成分	-451
Y(鉛直)成分	146
Z(水平180°)成分	-147
水平力	474
鉛直力	146
荷重(垂直力)	496

回転ラック軸受台の変形解析から推定される回転ラック軸受台(及び下部ガイド)に発生した荷重



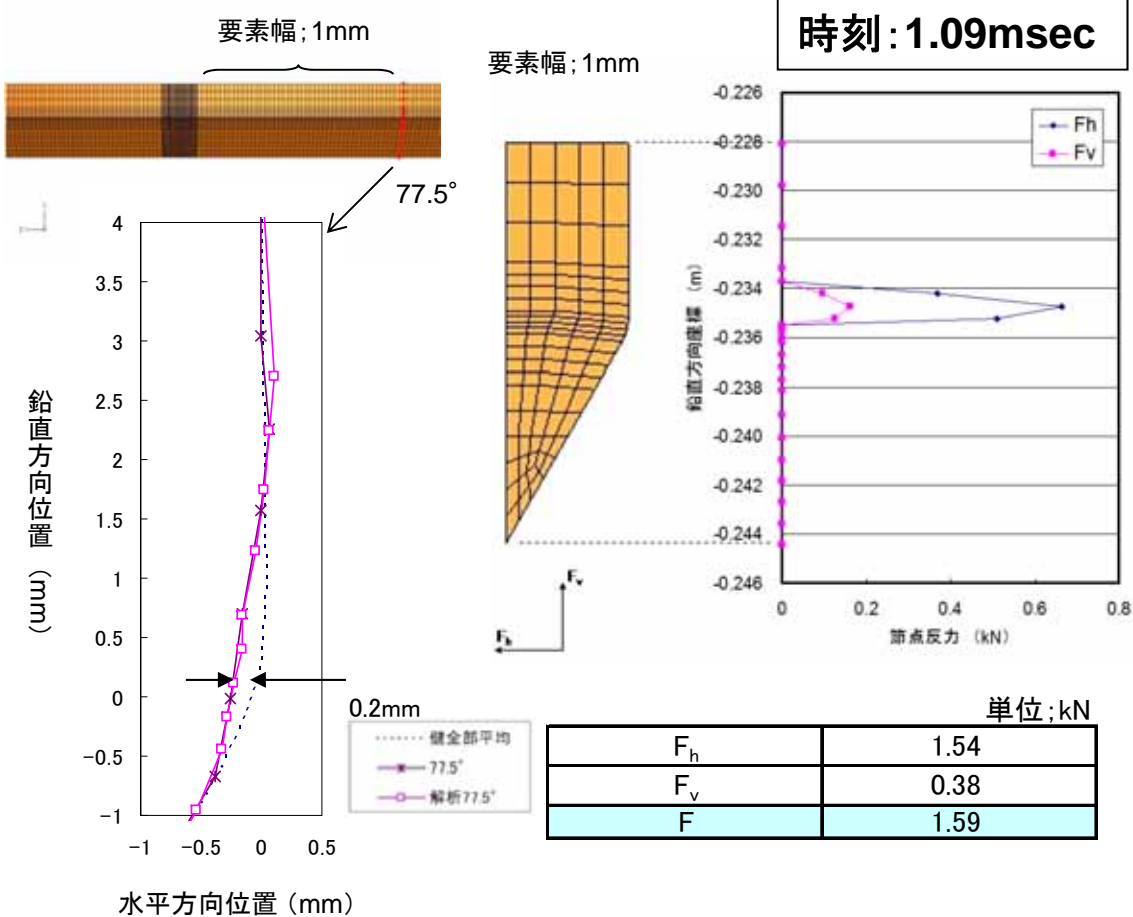
回転ラック軸受台(及び下部ガイド)に発生した荷重の比較

下部ガイド

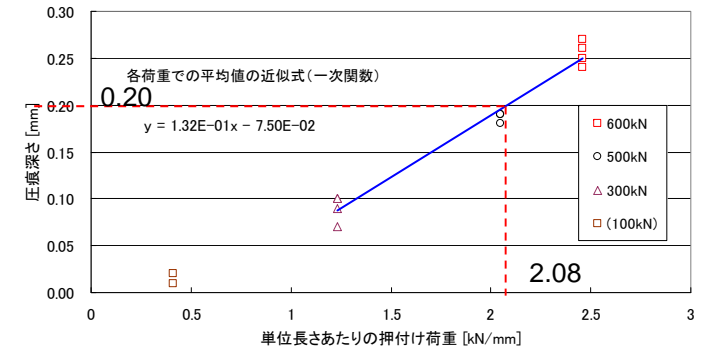
圧痕から推定される荷重と解析から推定される荷重の比較を行った。この結果は約20%の差異となる。その差異は回転ラック軸受台に残る圧痕が同時刻に発生せず、時間的な遅れがあることが要因と推定している。

■ 77.5° における圧痕再現性試験と回転ラック軸受台(及び下部ガイド)変形解析の比較

レプリカ計測結果及び回転ラック変形解析結果における軸受台の変形は概ね一致しており、解析結果より単位長さあたりの押付け荷重を推定した。77.5° 方向における節点反力は以下のグラフの通りであり、要素幅1mmを考慮して単位長さあたりの接触合力を算定した。



77.5° 方向における節点反力の総和(接触合力)



圧痕再現試験結果の近似式

降伏応力を考慮した単位長さあたりの押付け荷重

$$= \text{単位長さあたりの押付け荷重} \times \frac{\text{解析モデルの降伏応力}(200^\circ\text{C})}{\text{試験体の降伏応力}(室温)}$$

$$= 2.08 \times \frac{211}{246} = 1.78 \text{ kN/mm}$$

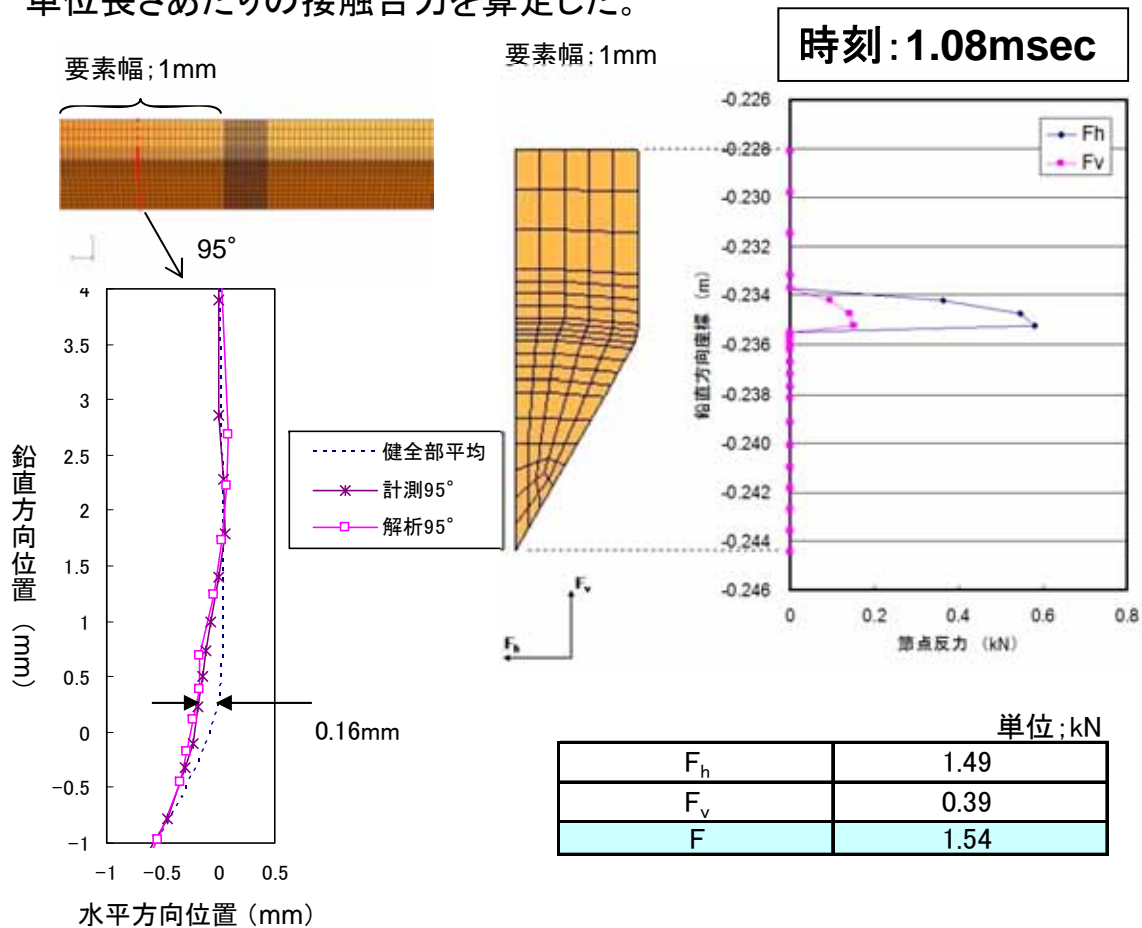
	圧痕再現試験	下部ガイド変形解析
単位長さあたりの荷重 (kN/mm)	1.78	1.59

試験結果と解析結果の荷重の比較

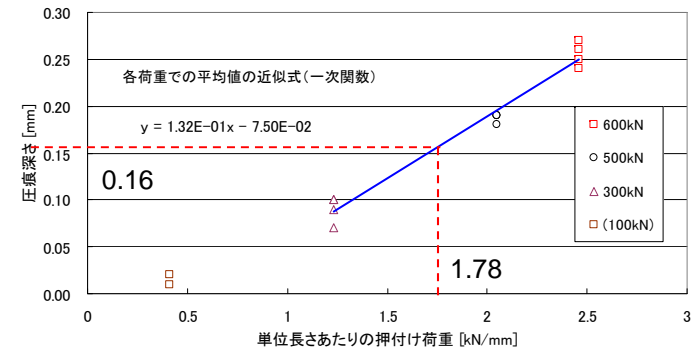
圧痕再現試験結果より求めた単位長さあたりの押付け荷重と解析結果より求めた接触合力は概ね一致する。

■95° における圧痕再現性試験と回転ラック軸受台(及び下部ガイド)変形解析の比較

レプリカ計測結果及び下部ガイド変形解析結果における軸受台の変形はよく一致しており、解析結果より単位長さあたりの押付け荷重を推定した。95°方向における節点反力は以下のグラフの通りであり、要素幅1mmを考慮して単位長さあたりの接触合力を算定した。



95° 方向における節点反力の総和(接触合力)



圧痕再現試験結果の近似式

降伏応力を考慮した単位長さあたりの押付け荷重

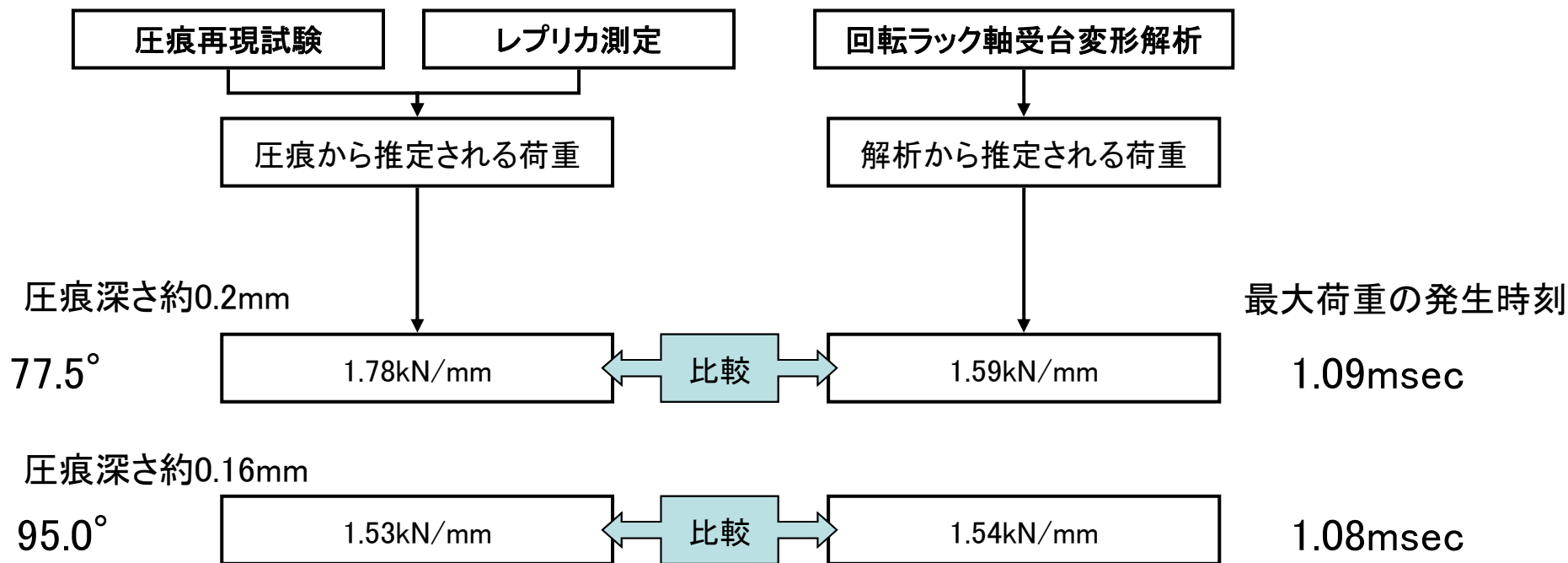
$$= \text{単位長さあたりの押付け荷重} \times \frac{\text{解析モデルの降伏応力}(200^\circ\text{C})}{\text{試験体の降伏応力}(室温)}$$

$$= 1.78 \times \frac{211}{246} = 1.53 \text{ kN/mm}$$

	圧痕再現試験	下部ガイド変形解析
単位長さあたりの荷重 (kN/mm)	1.53	1.54

試験結果と解析結果の荷重の比較

圧痕再現試験結果より求めた単位長さあたりの押付け荷重と解析結果より求めた接触合力は概ね一致する。



回転ラック軸受台(及び下部ガイド)に発生した荷重の比較

下部ガイドに残される圧痕とそれに対する最大荷重は、発生時刻が角度によって異なるため、2箇所代表角度を選定し、圧痕から推定される荷重と、解析から推定する荷重の比較を行った。

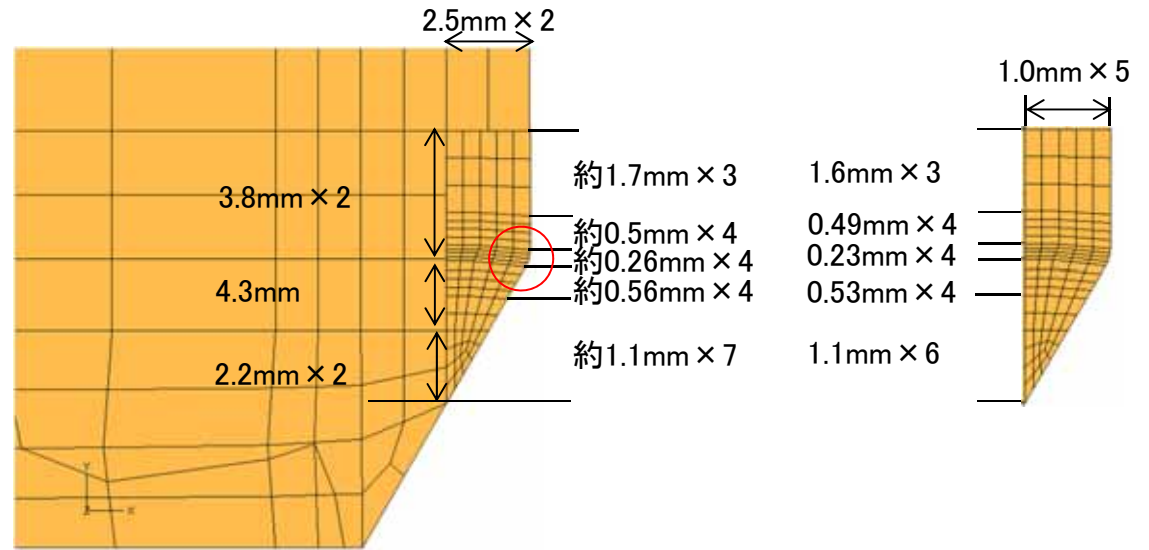
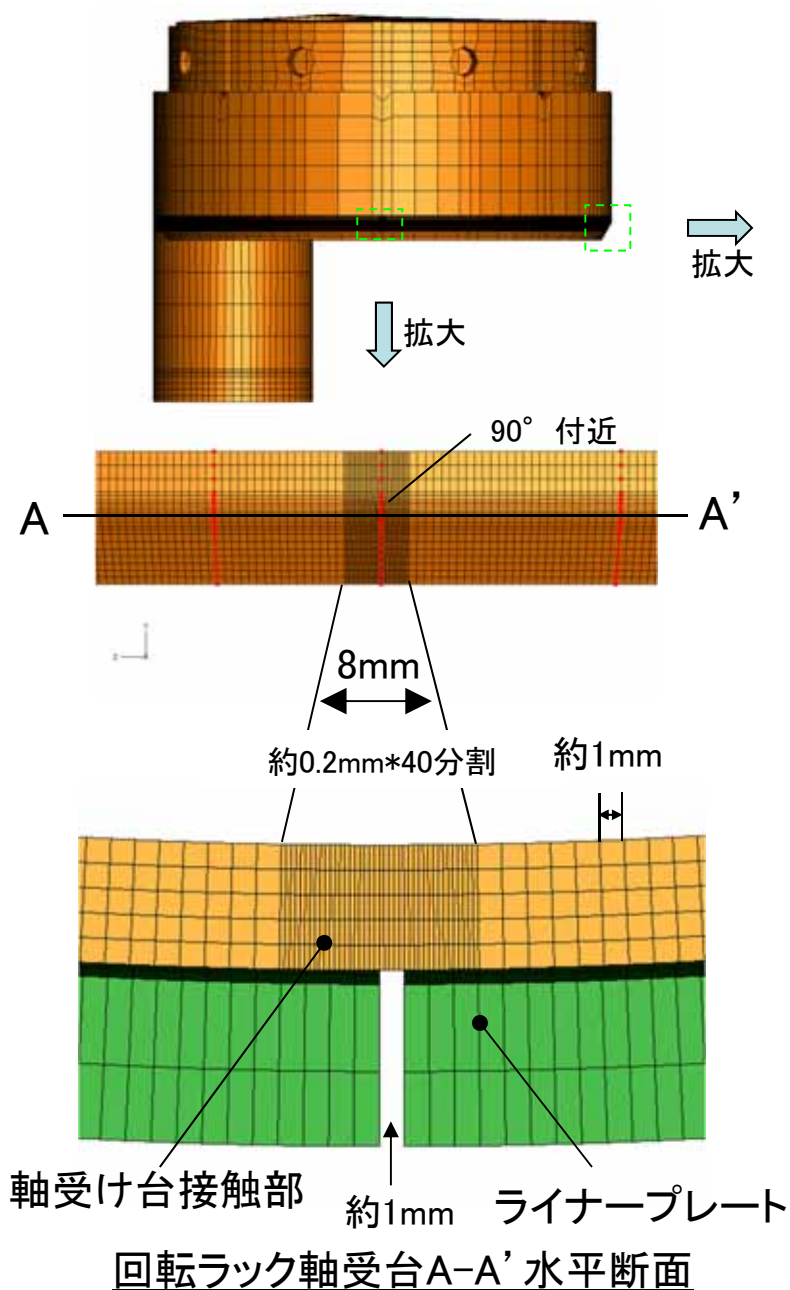
レプリカ測定から求められた最大圧痕深さ約0.2mmに相当する77.5°で比較すると試験から推定された荷重と解析から推定された荷重は、約10%の範囲で概ね一致することを確認した。

- 検証試験結果とレプリカ測定から、IVTM本体の接触痕に相当する接触荷重を求めると、約693kNであった。

材料物性の相違及び下部ガイドと接触した際のIVTM本体と下部ガイドは約200°Cのナトリウム中で接触が発生したことから、温度条件による材料物性値の差を考慮すると約594kNとなる。

- 一方、構造解析から、IVTM本体に発生する最大荷重は垂直力換算で求めると、約 496kNとなる。

検証試験と解析による荷重は約20%の差で整合する。(局所的に見た場合は約10%の差で整合する。)



○ 下部ガイドとの接触領域

回転ラック軸受台垂直断面

下部ガイド(ライナープレート)と接触する回転ラック軸受台下端部のメッシュ設定を以下に示す。

非接触領域は主に水平方向約1mm、垂直方向約2-3mmとし、接触領域及びその近傍は変形を再現できるように、詳細化を行った。接触領域は水平方向はライナープレートの間隙約1mmに対して約0.2mmで分割、垂直方向は変形の大きな領域を詳細に周囲を段階的に粗くなるよう設定し、再現性と計算負荷のバランスを調整した。

■ 下部ガイドの減衰率

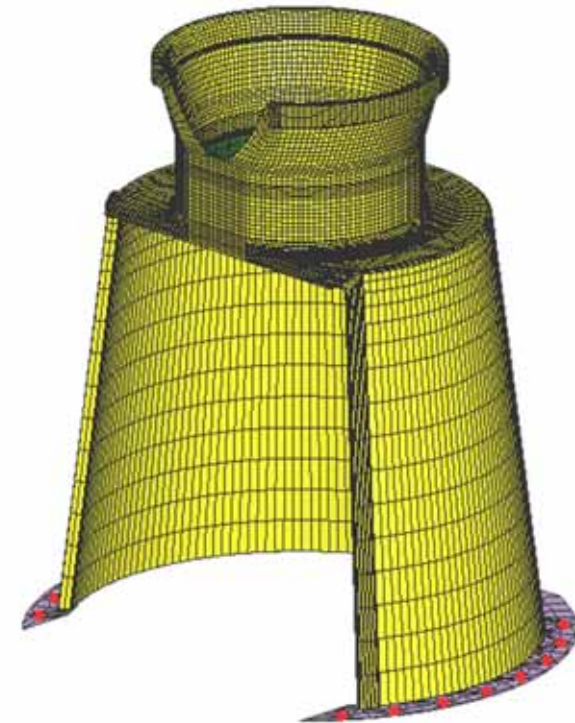
- 下部ガイドの減衰の設定には、原子力において用いられる規格等を調査し、ASME Sec IIIの減衰比に基づき5%に設定した。
- 具体的には、下部ガイドの減衰はBolted steel structuresとEquipmentの中間的な特性であるものと想定し、これらの中間となる5%を採用した。

2010 ASME B&PVC Sec. III Div.1 – Appendices

TABLE N-1230-1 DAMPING VALUES

Structure or Component	Percent of Critical Damping
Equipment	3
Piping systems	5
Welded steel structures	4
Bolted steel structures	7
Prestressed concrete structures	5
Reinforced concrete structures	7

*Safe Shutdown Earthquake



* 出典: 2010 ASME/BPVC SEC III Div.1 APPENDICES (2011年改訂版)

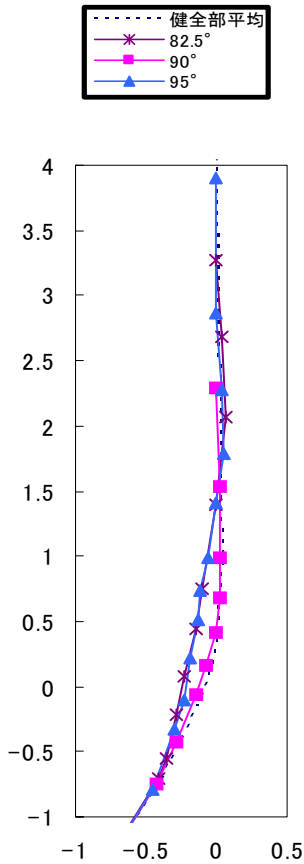
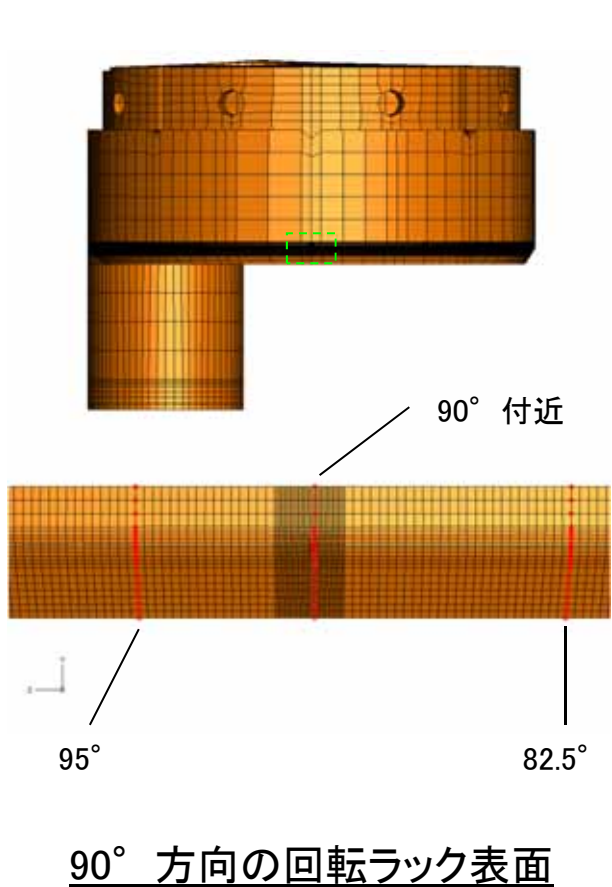
■ 摩擦係数の影響確認

- 下部ガイド落下解析において摩擦係数の感度解析を実施した結果、ベースモデル(摩擦係数:0.1)と摩擦係数:0.3の場合で、圧痕の大きさを支配すると考えられる垂直抗力の差は5%で程度である。
次に、プロフィールを比較(次頁)すると変形状態が実現現象より大きめに出ることになった。
このことから、実現現象を考慮した場合、摩擦係数は0.1が妥当であったと推測できる。

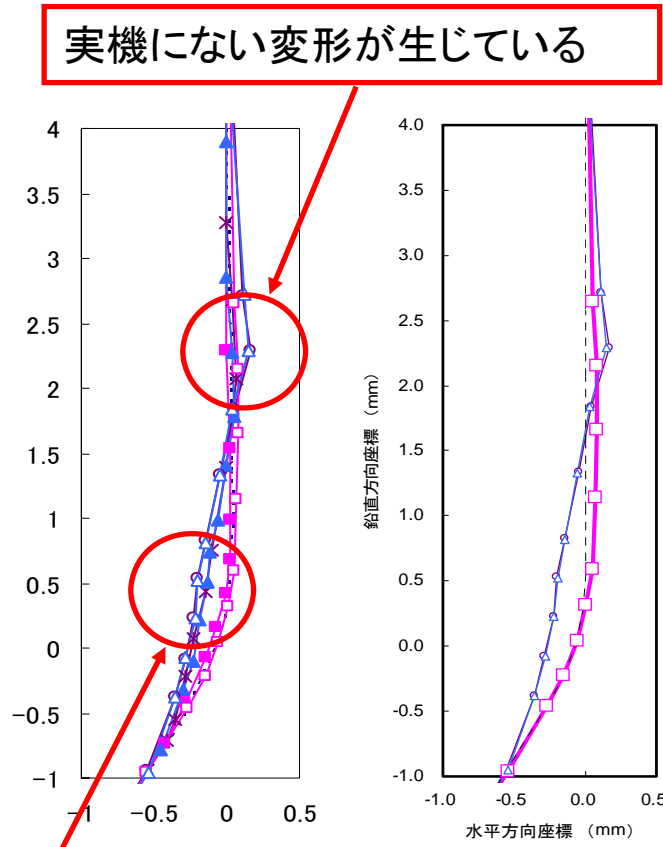
荷重	荷重(kN)		
	ベースモデル(摩擦係数:0.1)	感度解析(摩擦係数:0.3)	比率
X(水平90° 方向)成分	-451	-470	1.04
Y(鉛直方向)成分	146	153	1.05
Z(水平180° 方向)成分	-147	-147	1.00
水平力	474	492	1.04
鉛直力	146	153	1.05
荷重(垂直力)	496	515	1.04

■ 下部ガイド落下解析での摩擦係数の影響感度解析(摩擦係数:0.3)

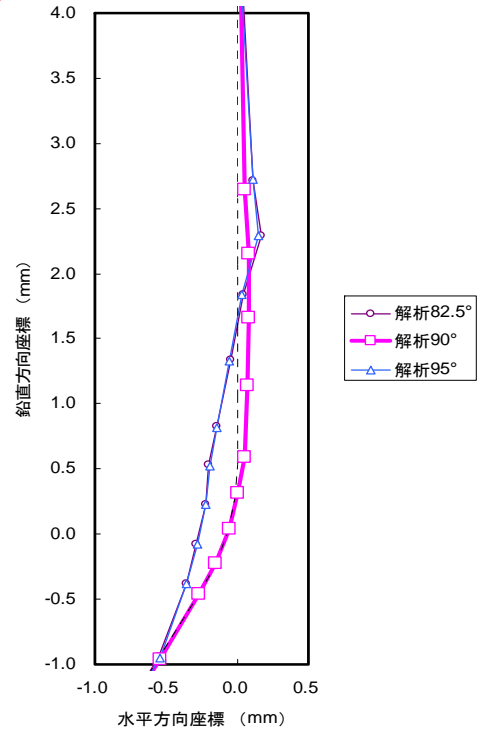
回転ラック軸受台における変形状況(8.5mm押し込み除荷後)



測定結果



重ね書き

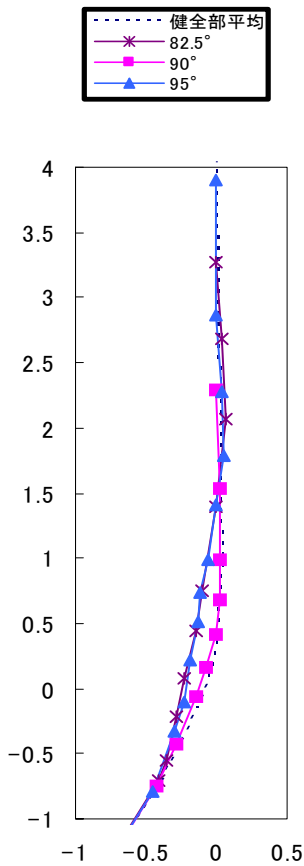
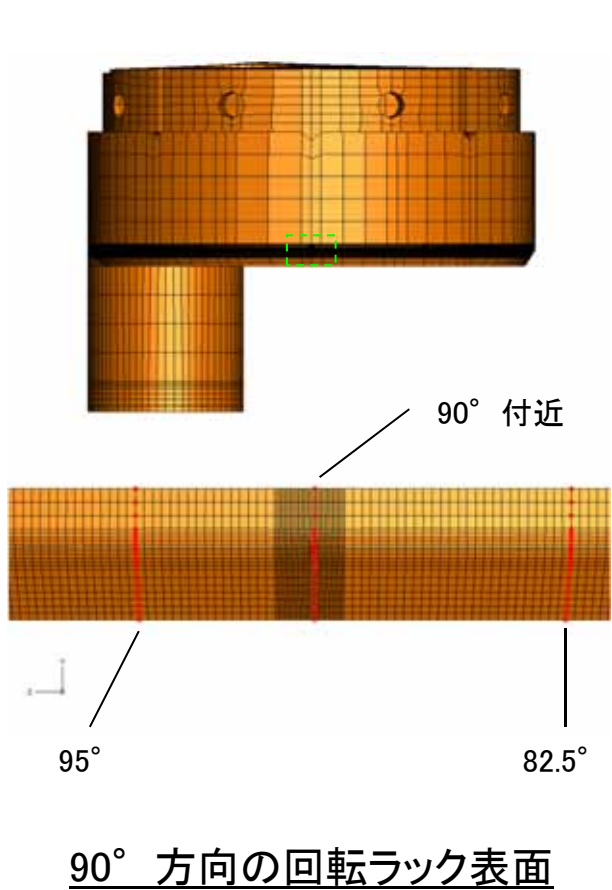


解析結果

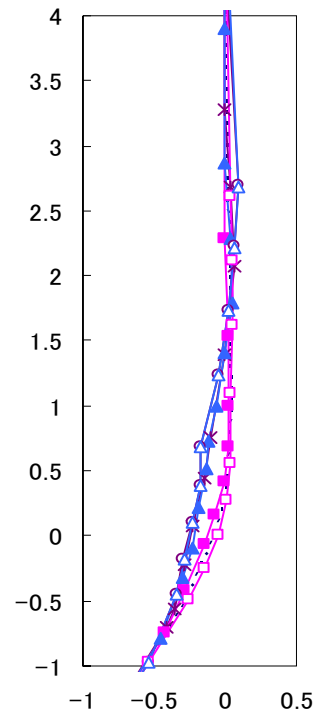
圧痕深さが大きくなっている

■ 下部ガイド落下解析での摩擦係数の影響ベースモデル(摩擦係数: 0.1)

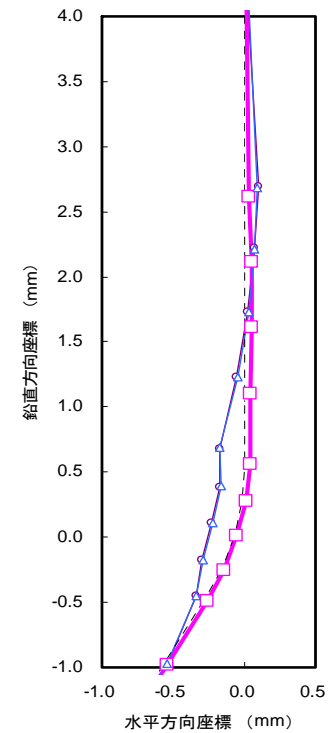
回転ラック軸受台における変形状況(8.5mm押し込み除荷後)



測定結果



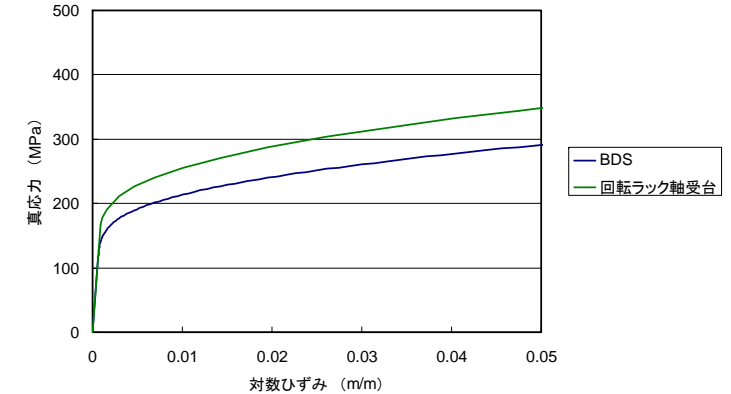
重ね書き



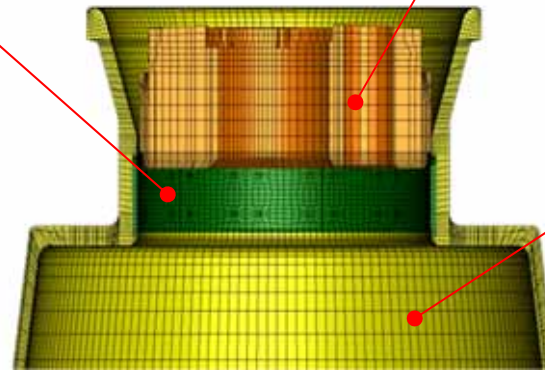
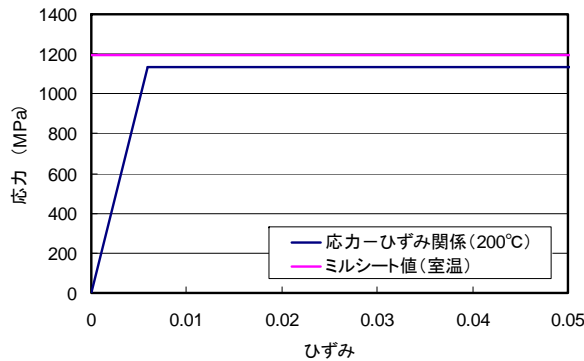
解析結果

■ 下部ガイド、回転ラック軸受台 及びライナープレートの材料物性値

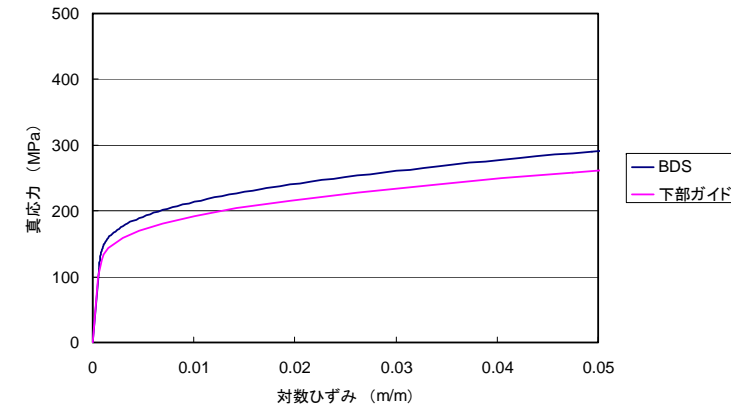
回転ラック軸受台: SUS304



ライナープレート: インコネル718



下部ガイド: SUS304



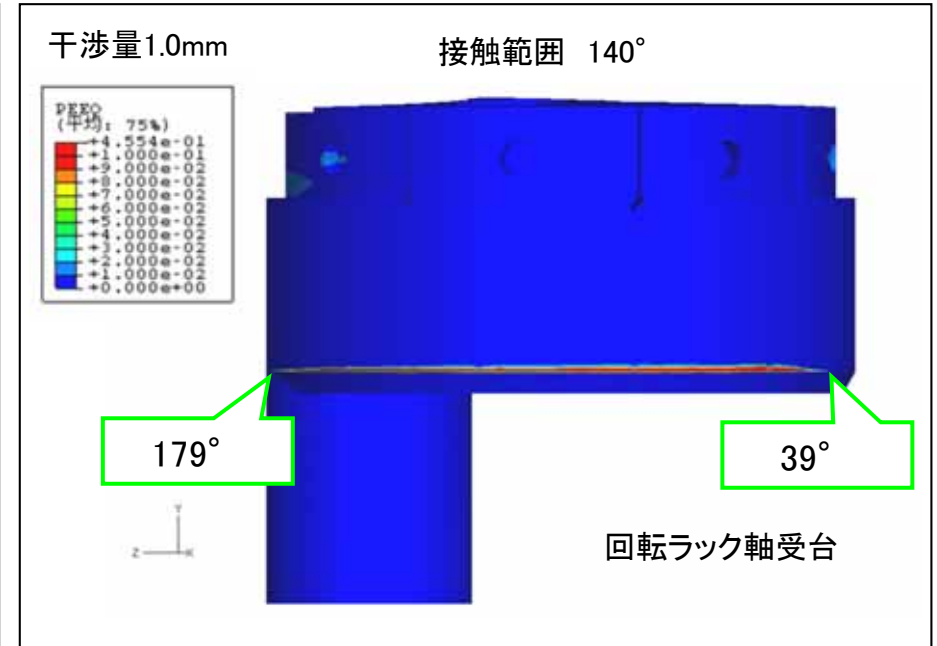
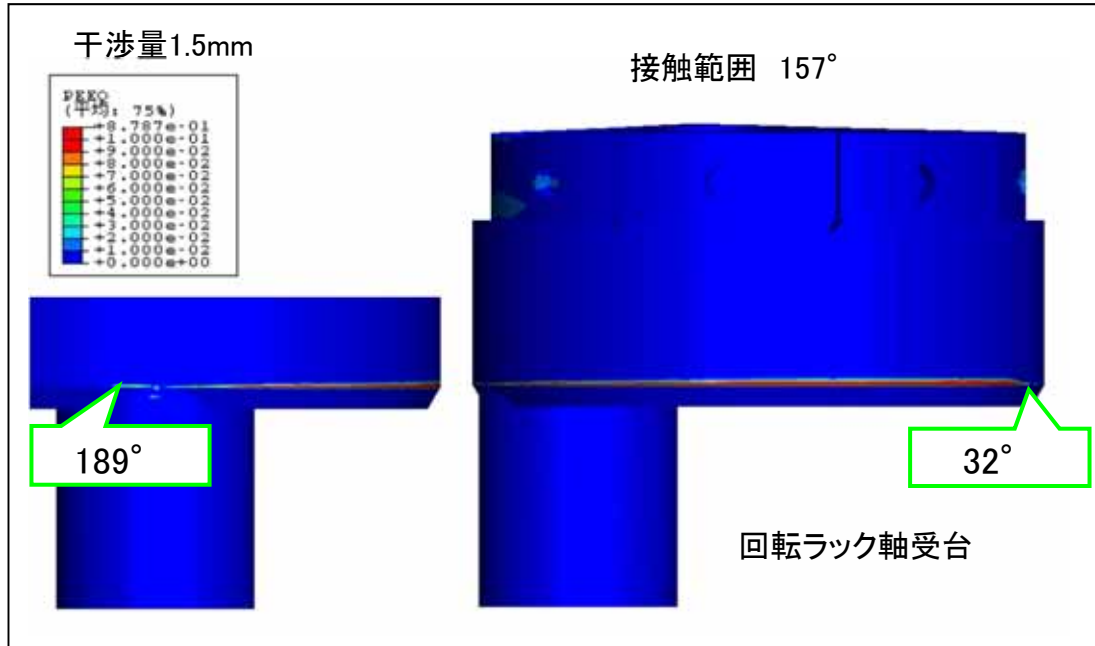
ライナープレートの応力-ひずみ関係*1
(200°Cにおける縦弾性係数*2, 降伏応力を使用*3)

- *1 弾完全塑性体として設定
- *2 発電用原子力設備規格 材料規格(2008年版)
- *3 インコネル718カタログ値

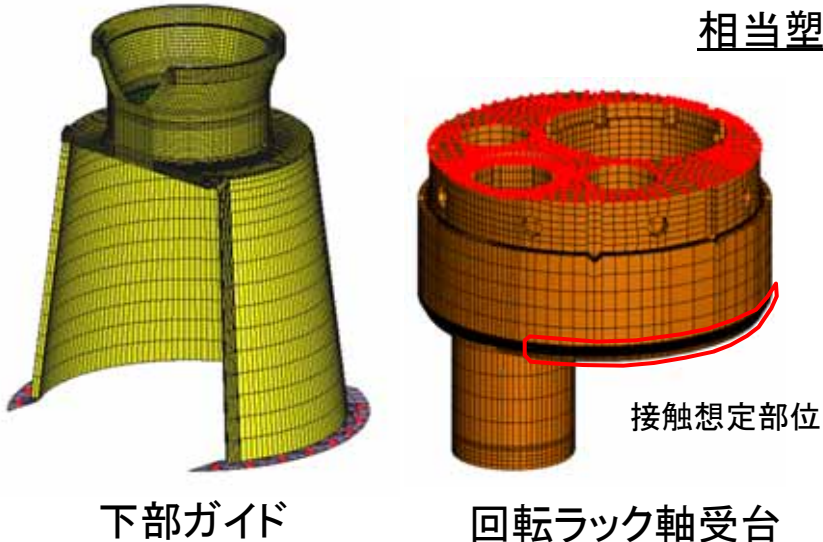
回転ラック軸受台及び下部ガイドの応力-ひずみ関係*1
(200°Cにおける縦弾性係数*2, 降伏応力を使用*3)

- *1 ミルシートに基づき応力-ひずみ評価式*4を用いて設定
- *2、*3 ミルシートに基づき発電用原子力施設規格 設計・建設規格(2005年版)を用いて設定
- *4 高速原型炉高温構造設計指針 材料強度等

■ 回転ラック軸受台における接触範囲

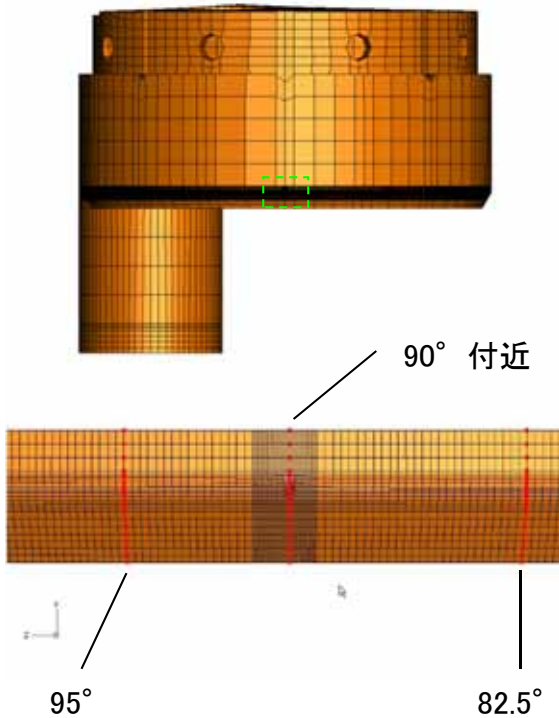


相当塑性ひずみ分布コンター図

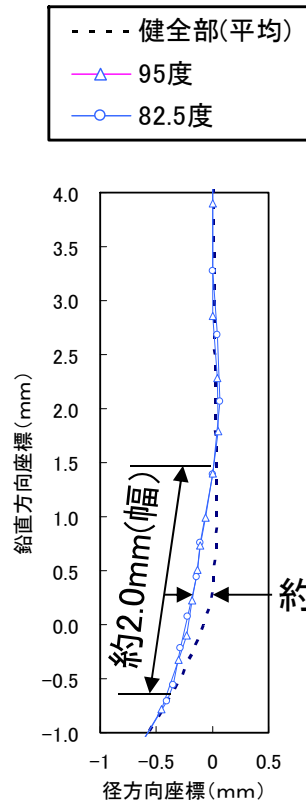


構造解析の結果およそ 32° ~ 189° の範囲で接触が発生

⇒ 干渉量1.0mmのほうが点検・調査における接触範囲(約30° ~ 約170°)と整合性がよい。



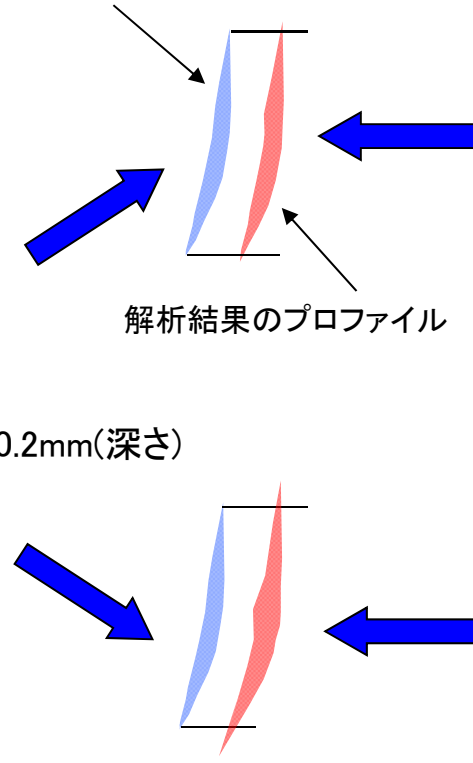
90° 方向の回転ラック表面



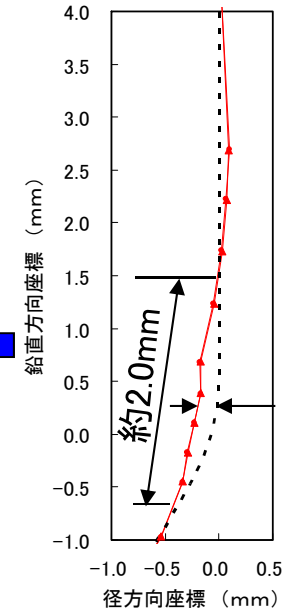
測定結果

点検調査におけるプロフィール

解析結果のプロファイル

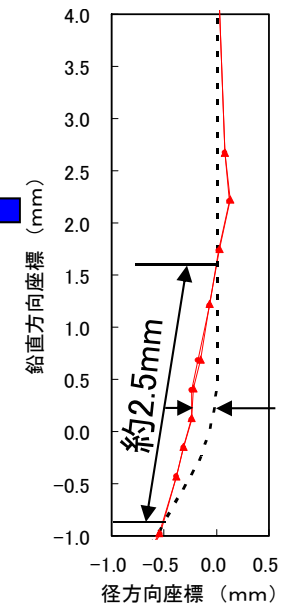


プロフィールの比較



干渉量1.0mm

約0.2mm

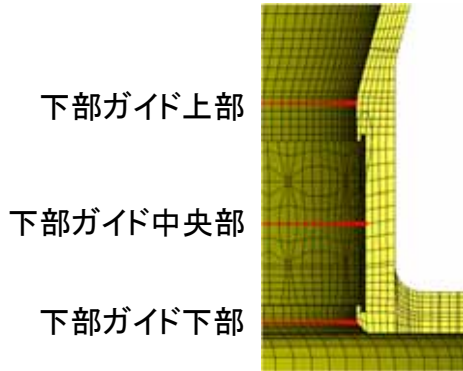


干渉量1.5mm

約0.25mm

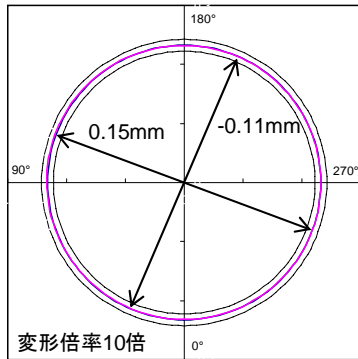
解析結果

干渉量1.0mmと1.5mmの解析結果比較において、干渉量1.0mmのほうが点検・調査におけるプロフィール(圧痕深さ、幅共)と整合性がよい。

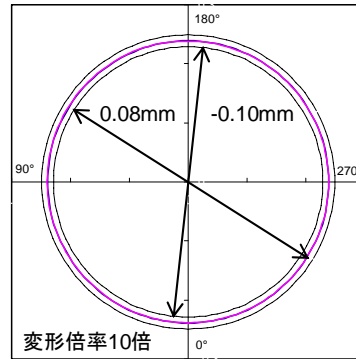


干渉量1.0mmと1.5mmにおける下部ガイド支持部(円筒部)の径の変化量比較を示す。干渉量1.5mmの方が変形量は大きくなるが、高々約0.25mmの変形量である。

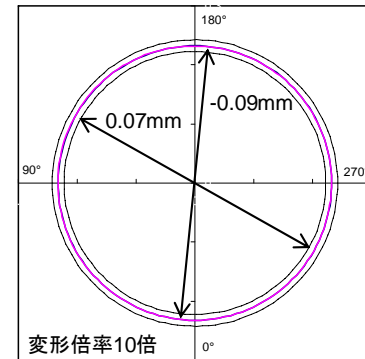
干渉量1.0mm



下部ガイド上部

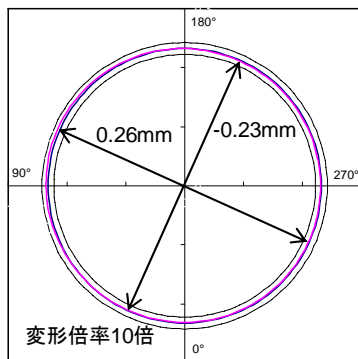


下部ガイド中央部

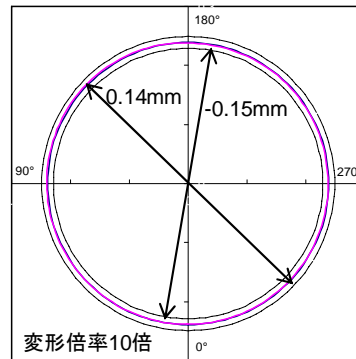


下部ガイド下部

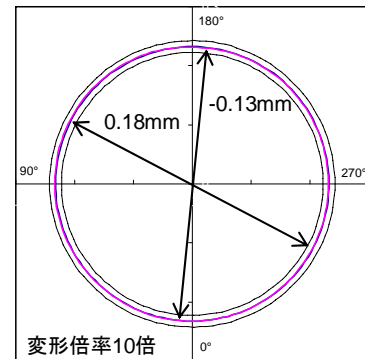
干渉量1.5mm



下部ガイド上部

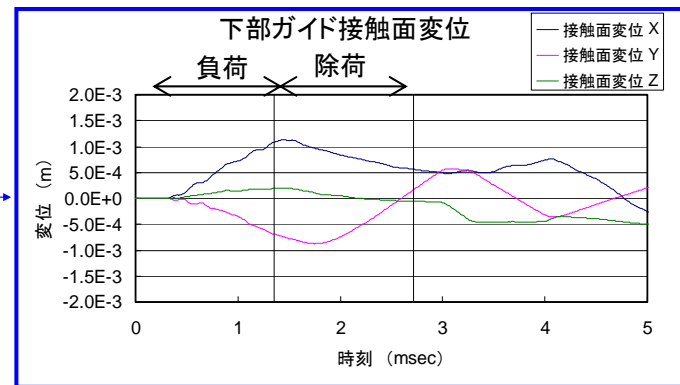
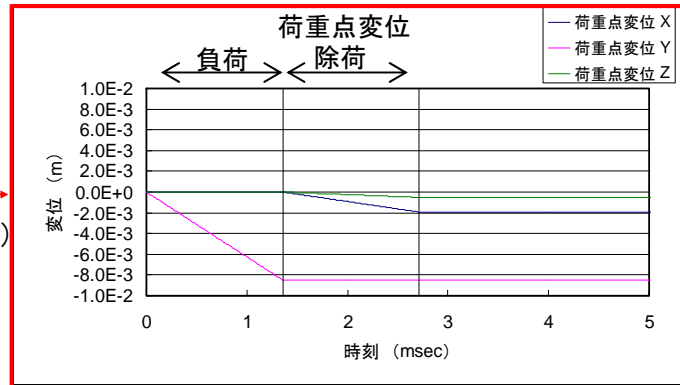
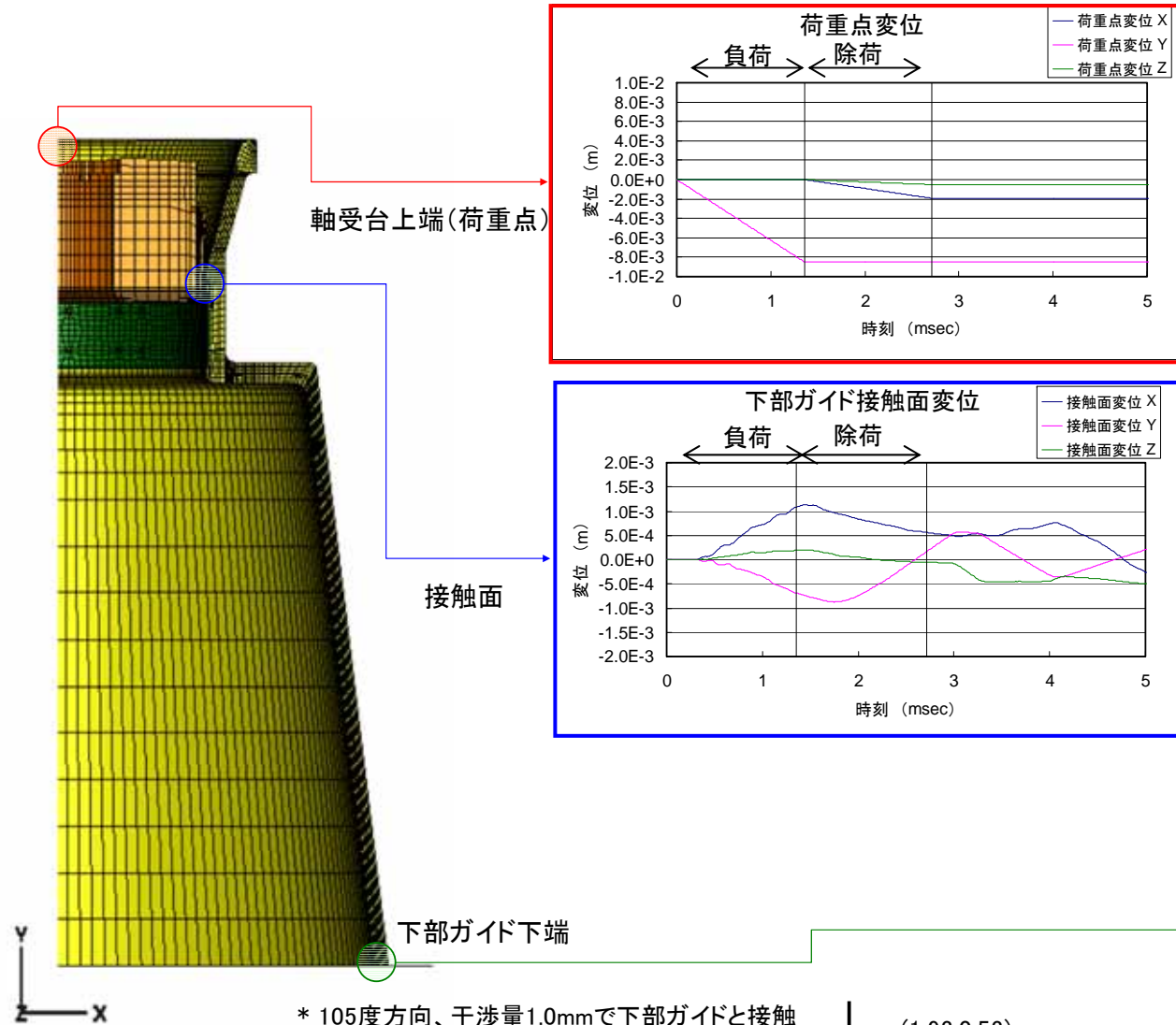


下部ガイド中央部

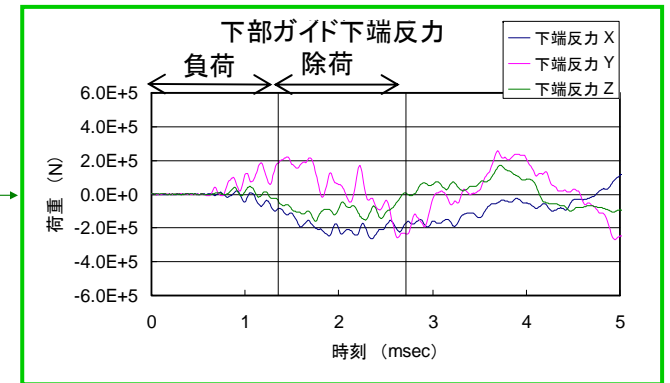
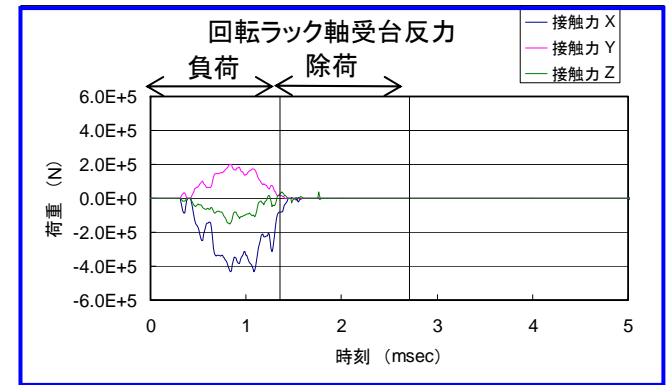


下部ガイド下部

■ 解析結果(各部の変位と反力) 8.5mm(時間1.357ms)まで押しこみ後、除荷*



除荷後、下部ガイドは振動するが、振動が収束した時点での下部ガイドの変形量(ひずみ量)を評価



* 105度方向、干渉量1.0mmで下部ガイドと接触させるため回転ラック軸受台の中心を移動

回転ラック軸受台の中心点

