

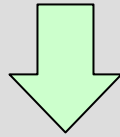
分科会用資料(2007年2月27日)

ボルト締結の有限要素法モデリング手法の有効性評価

東京大学 工学系研究科
機械工学専攻 酒井・泉研究室
中嶋 一裕

有限要素法による三次元接触・摩擦解析の発達

ねじ山の螺旋形状を再現したボルトのモデリング

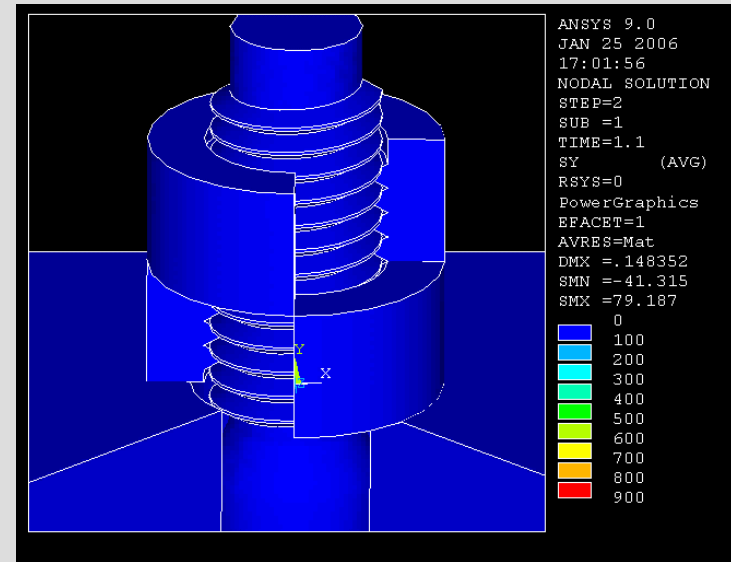
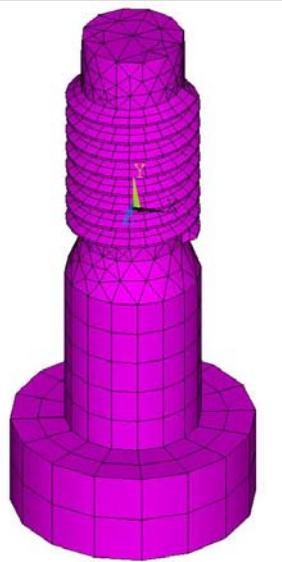


締付け工程・ゆるみ過程の再現
ゆるみ止め部品の性能評価

(例:ダブルナットの締付け解析※⇒)

単一のねじ締結体の力学挙動を
理論的に解明できる見通し

ただし、計算コストが非常に大きく
多数のボルト締結の解析には適用が難しい



※参照資料

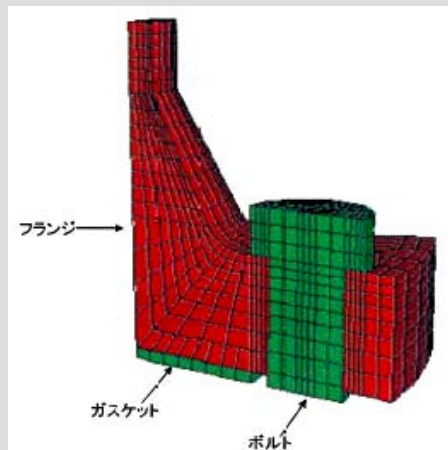
木村成竹, 泉聡志, 酒井信介, “三次元有限要素法によるダブルナットの締め付けおよびゆるみ挙動解析”, 日本機械学会論文集A編, 72-719(2006) pp.967-973.

緒言

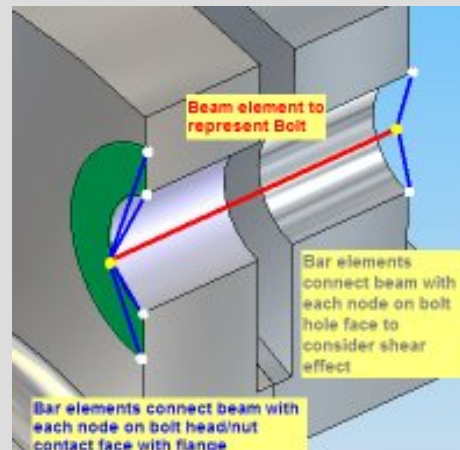
CAEによる設計の普及

一般の機械構造物は多数の締結より成る ⇒ ボルトを簡略化してモデリング

＜簡易モデリング手法例＞



ボルト・ナットを一体化



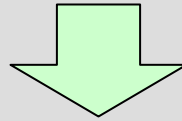
ビーム要素への置き換え

このような簡略化に伴う解析結果への影響は？

緒言

日本機械学会 機械材料・材料加工部門 分科会
「締結・接合・接着部のCAE用モデリング及び評価技術の構築」
ねじ締結 Working Group

<http://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/~izumi/Bolt/WG/> (ID: KIKAI , PASS: WG1)



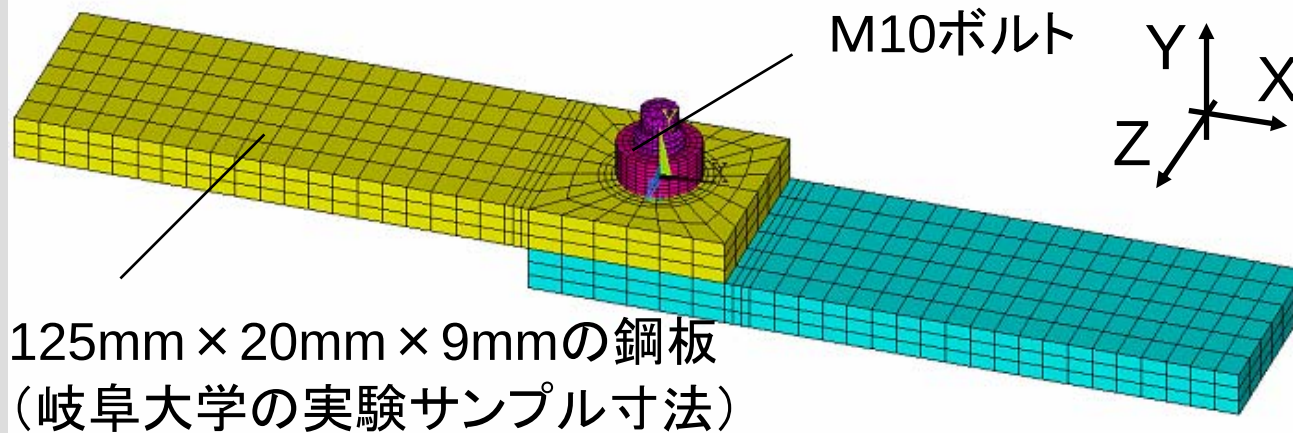
ねじ締結体をCAEでモデリングする際のガイドラインや
CAEによる評価技術(疲労やゆるみの設計手法)の作成を提案

どのような近似手法が締結体のモデリングに有効なのか？

本研究の位置付け

解析対象：2枚板のボルト締結

解析ソフト：ANSYS 9.0



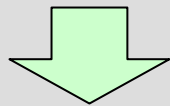
ヤング率：205 GPa

ポアソン比：0.3

摩擦係数：0.20
(全接触面で等しいとした)

初期締結力：8000 N

上図の締結部分に代表的な荷重を作用させる



- ・詳細なモデリング手法による挙動の確認
- ・簡易モデリング手法による剛性の比較 ⇒ 有効性の検討

目次

1. 解析に用いるモデリング手法の説明

- i. ねじ山モデル
- ii. リベットモデル
- iii. スパイダーボルトモデル
- iv. ボルト穴なしモデル

2. 作用させる荷重ごとの解析結果

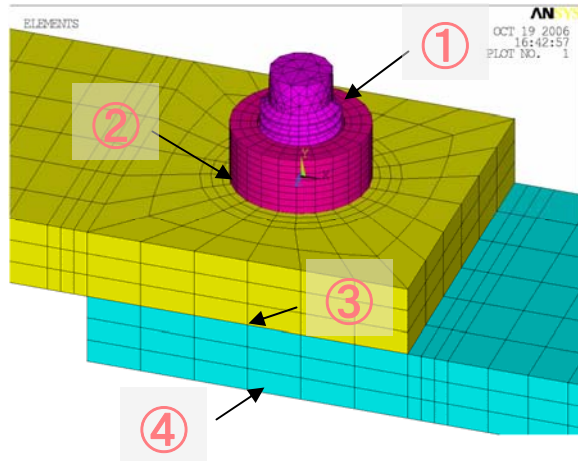
- ①並進方向荷重
- ②軸回りのねじり荷重
- ③軸方向の曲げ荷重
- ④偏心軸方向荷重

3. 各モデリング手法の有効性まとめ

1. 解析に用いるモデリング手法の説明

適用するモデリング手法

i. ねじ山モデル



- ・ねじ山の螺旋形状を再現
- ・ナットとボルトは分離
- ・実際の現象に最も近い結果

<接触定義箇所>

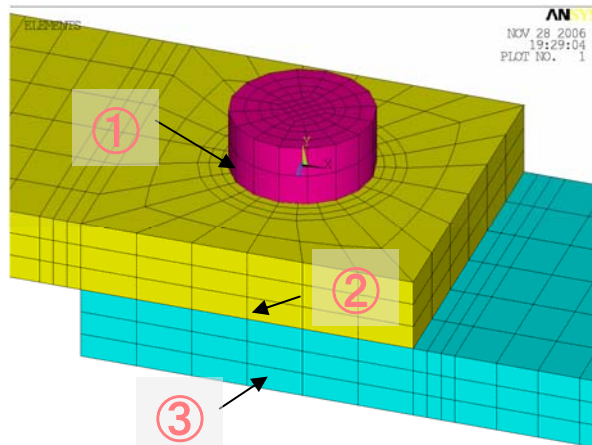
①ねじ面

②ナット座面

③板間

④ボルト座面

ii. リベットモデル



- ・ボルト・ナットを一体化 (リベット状)
- ・設計現場では一般的

<接触定義箇所>

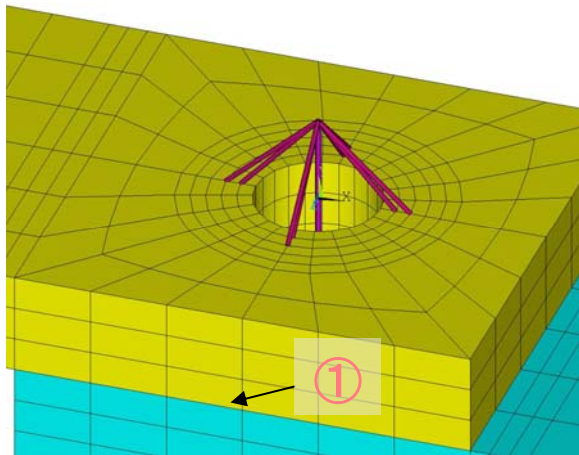
①ナット座面

②板間

③ボルト座面

適用するモデリング手法

iii. スパイダーボルトモデル

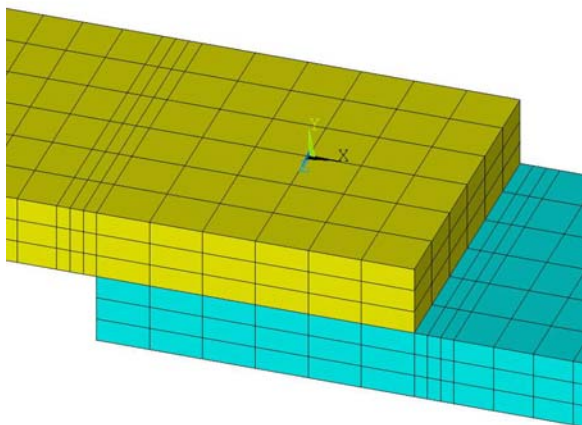


- ・ボルト軸はビーム要素
- ・両端を座面上の節点と接続
- ・ボルト自身の剛性を合わせ込んで使用

<接触定義箇所>

①板間

iv. ボルト穴なしモデル



- ・ボルト穴をモデリングしない
- ・接触要素を使用しない
- ・非線形ばね要素で剛性定義

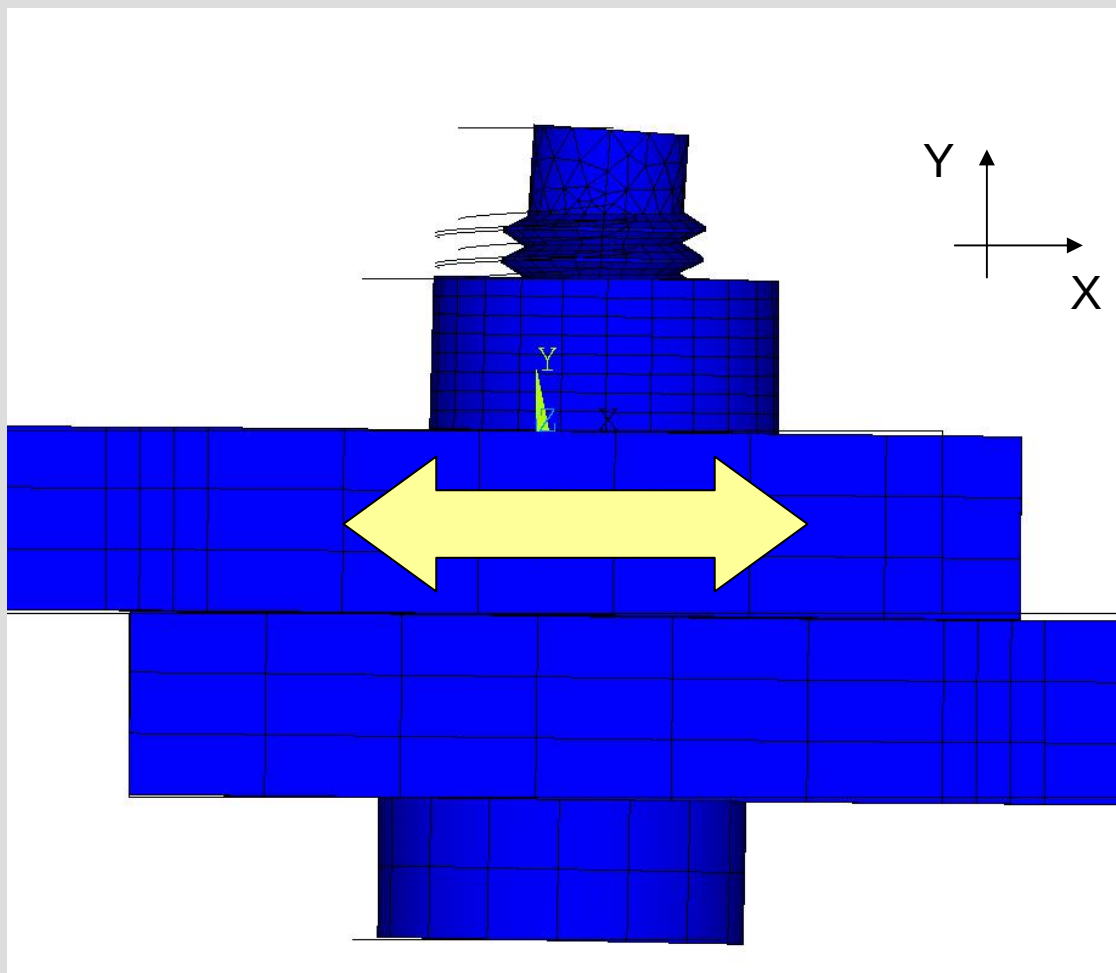
<接触定義箇所>

なし

計算コストを抑えて
どこまで再現できるか？

2. 作用させる荷重ごとの解析結果

①並進方向荷重の解析結果

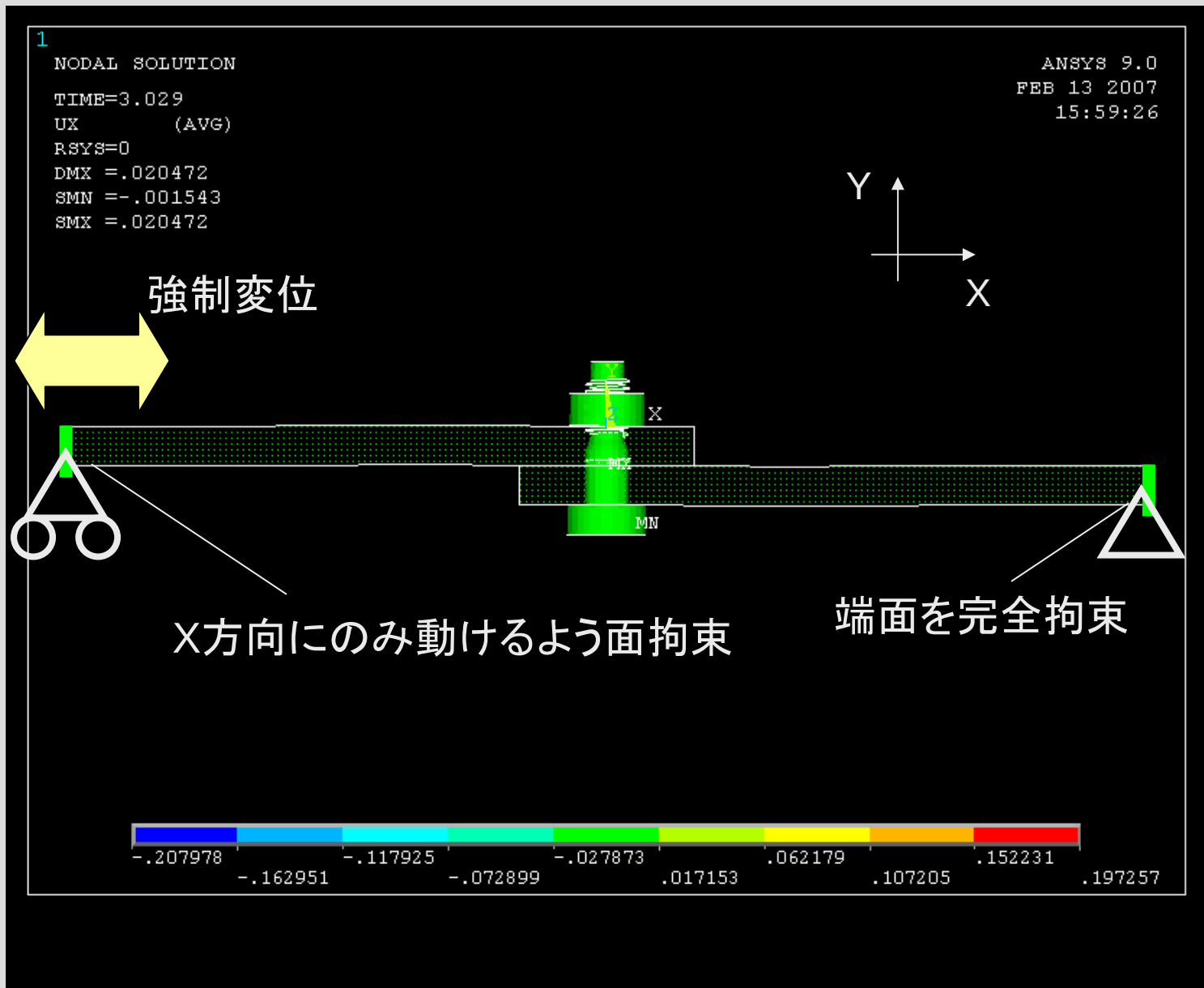


岐阜大学の実験結果と比較予定

加振アニメーション（並進方向変位コンター）

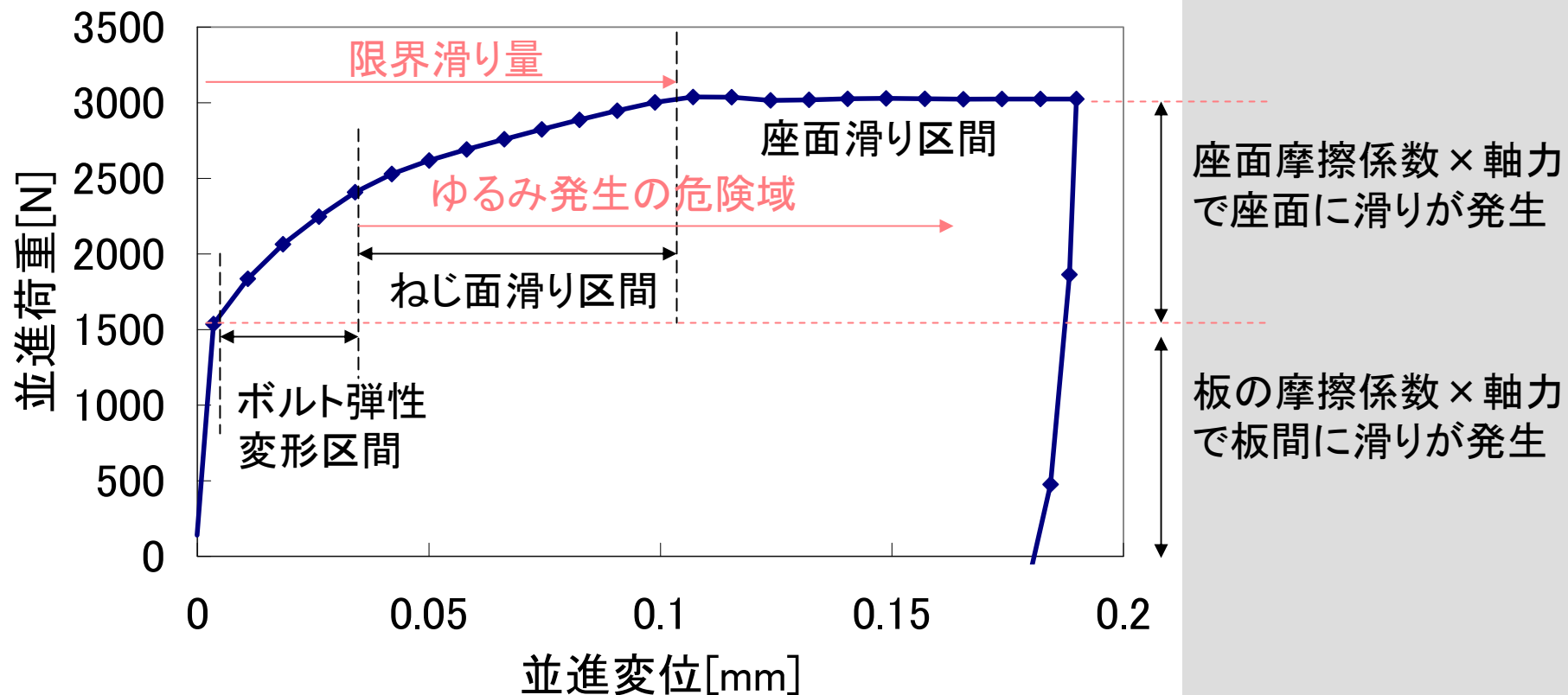
12

変位スケール × 30



ねじ山モデル解析結果

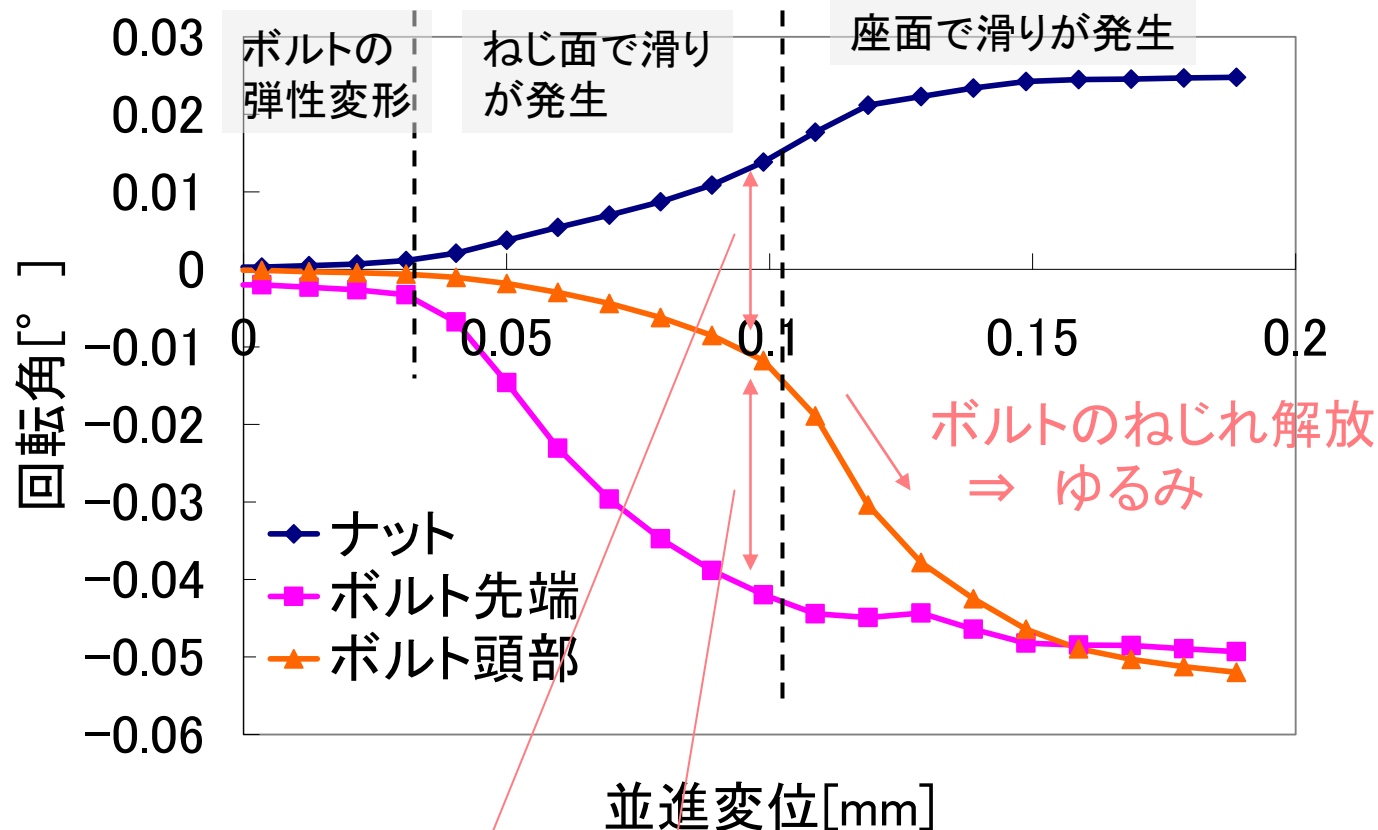
並進方向の剛性



板同士の相対変位が増加すると
接触面に滑りが発生し剛性の傾きに変化が生じる

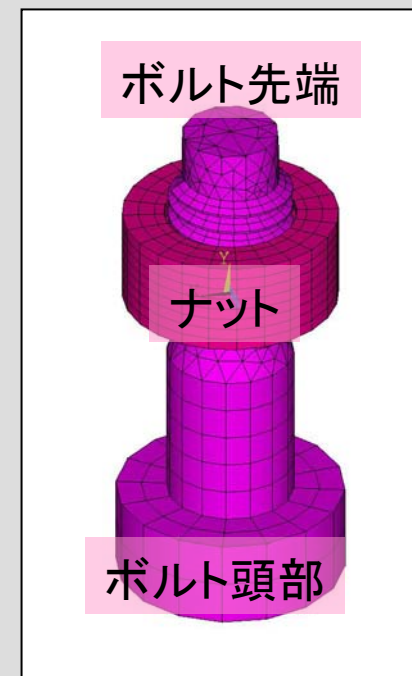
ねじ山モデル解析結果

ボルト・ナットの回転角



微小座面滑りによる
ゆるみの蓄積※

ボルトの弾性ねじれ

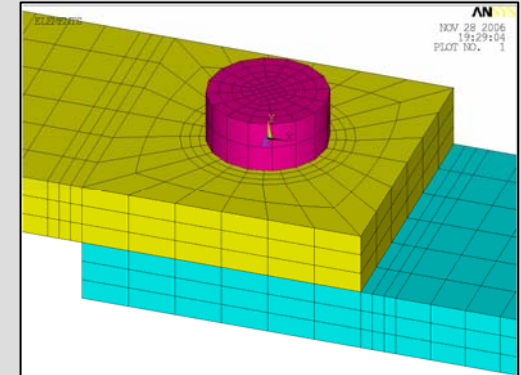
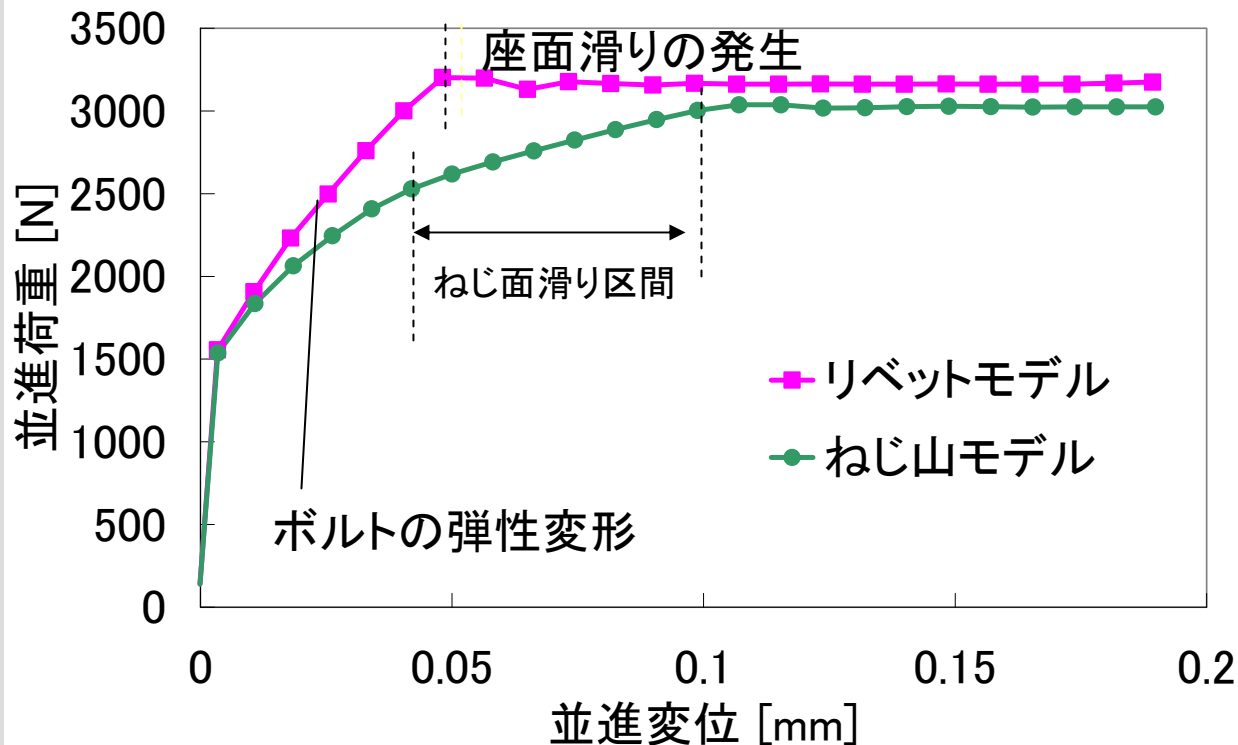


※参考文献

泉聡志, 木村成竹, 酒井 信介, “微小座面すべりに起因したボルト・ナット締結体の微小ゆるみ挙動に関する有限要素法解析”, 日本機械学会論文集A編, 72-717(2006)pp.780-786 .

リベットモデル解析結果

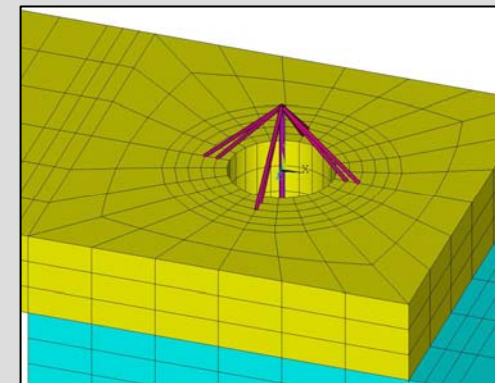
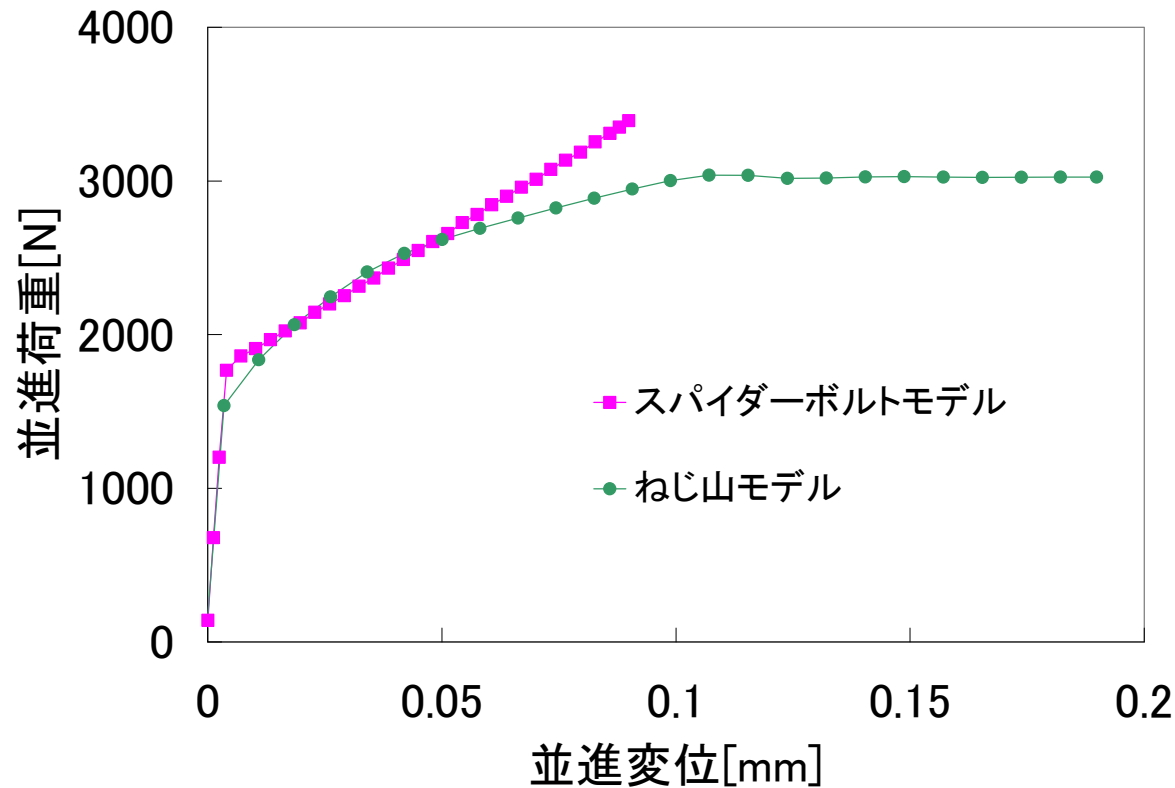
リベットモデルとねじ山モデルの剛性比較



- ・ねじ面滑り区間(微小なゆるみの開始位置)は再現できない
- ・座面滑りは発生する
ただしねじ山モデルよりは限界滑り量は小さく見積もられる
- ・ボルトの弾性変形区間の剛性はやや大きい(ナットとボルトが完全に固着)

スパイダーボルトモデル解析結果

スパイダーボルトモデルとねじ山モデルの剛性比較



- ・ねじ面滑りと座面滑りは再現できずボルトの弾性変形が続く
- ・ボルト弾性変形区間の剛性を任意に合わせ込める

ボルト穴なしモデルによる等価剛性の再現

非線形ばね要素

(要素の自由度:UX)

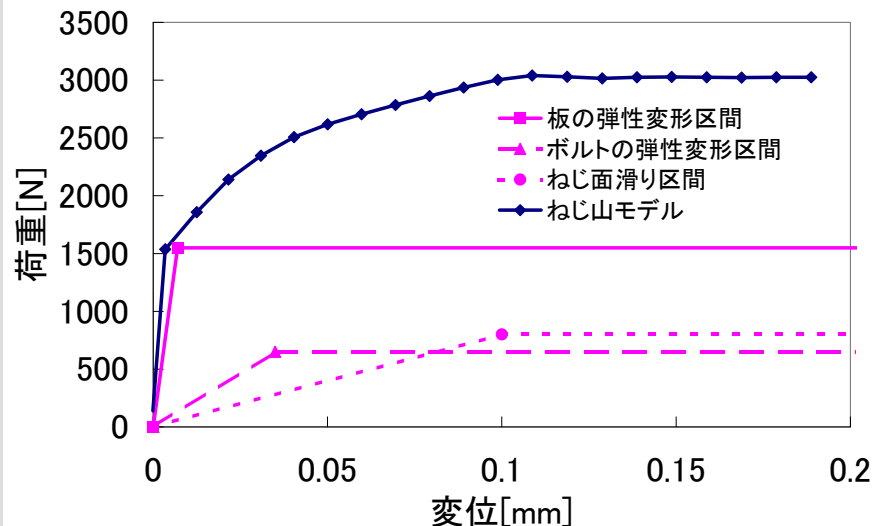
軸中心位置の節点を
X 方向(並進方向)に
カップリング拘束

上板

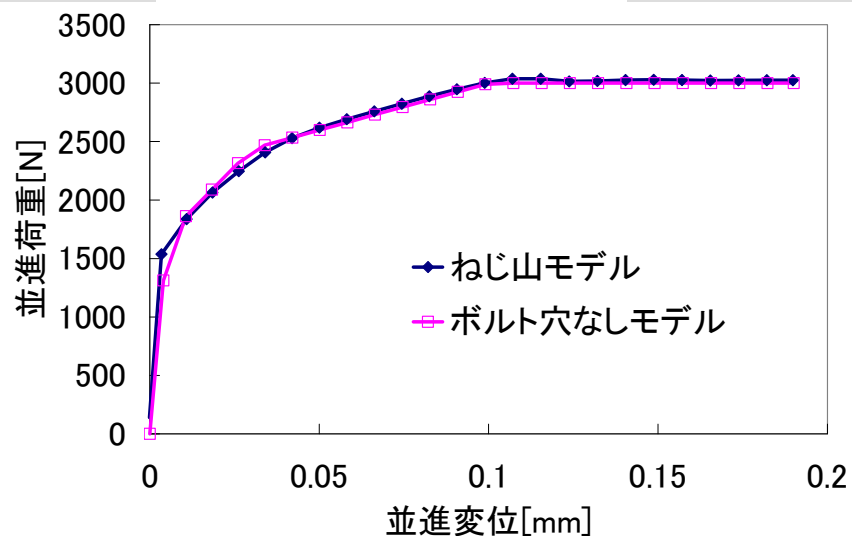
下板

ねじ山モデルの結果を参考に
非線形ばね要素の剛性を定義する

非線形ばね要素の剛性定義



合わせ込み後の剛性



並進方向荷重の解析結果まとめ

各モデリング手法による計算コストの比較表（ボルト弾性変形区間1サイクル）

	Node number	Element number	Contact element number	Computational time[s]
Thread model	24015	7764	4	8173 (100%)
Rivet model	13639	3329	3	3722 (46%)
Spider-bolt model	10221	2227	1	3940 (49%)
No-hole model	6006	1046	0	686 (9%)

ねじ山モデル

軸直角方向荷重によるゆるみの再現が可能

リベットモデル

ゆるみの評価は不可能

⇒ ボルト弾性変形区間までの使用（やや剛性は高い）

計算時間はねじ山モデルの半分程度

スパイダーボルトモデル

ゆるみの評価は不可能

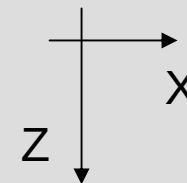
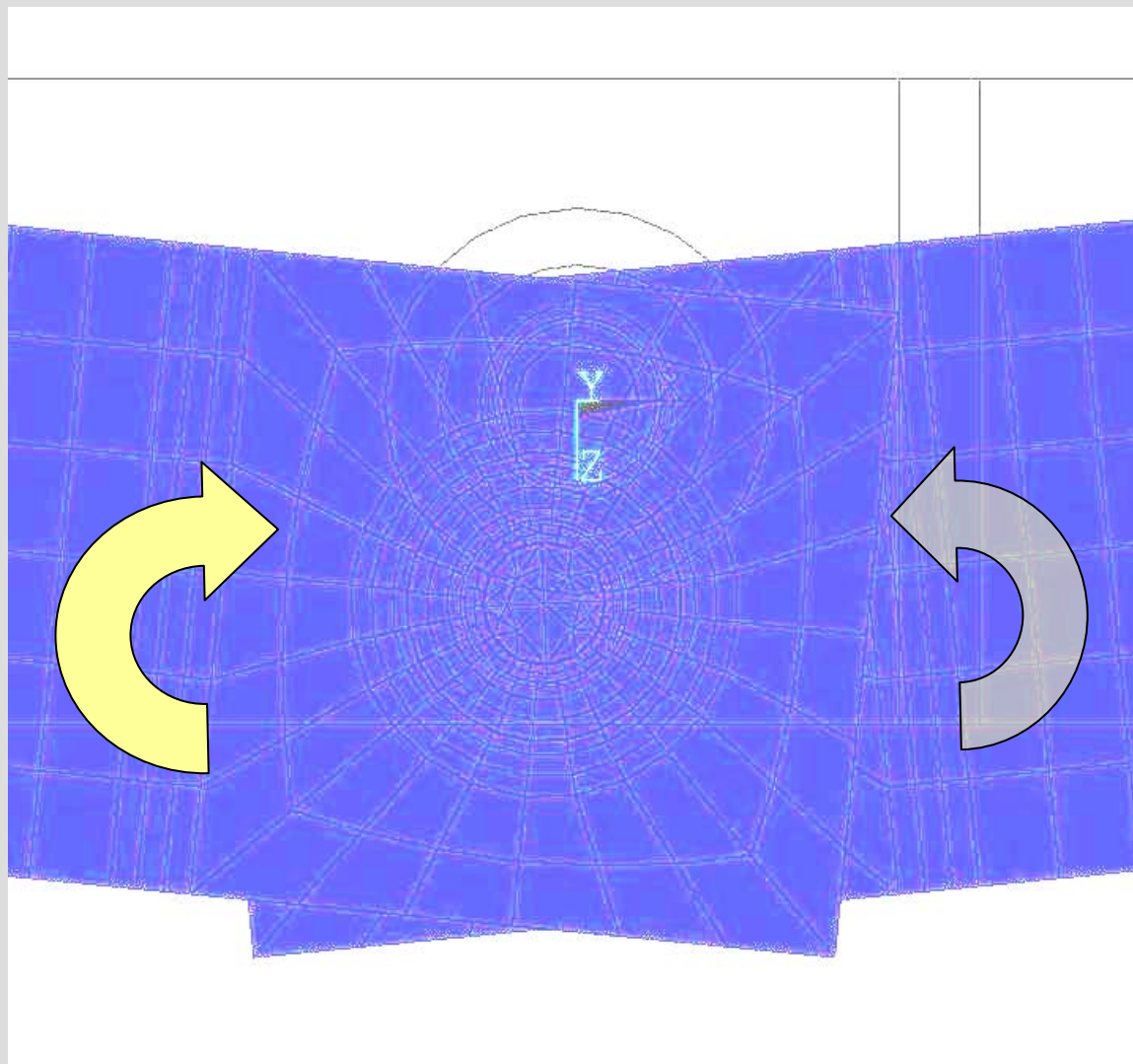
⇒ ボルト弾性変形区間までの使用（剛性の合わせ込み）

ボルト穴なしモデル

非線形ばね要素の利用により剛性を任意に再現可能

計算時間はねじ山モデルの10分の1程度

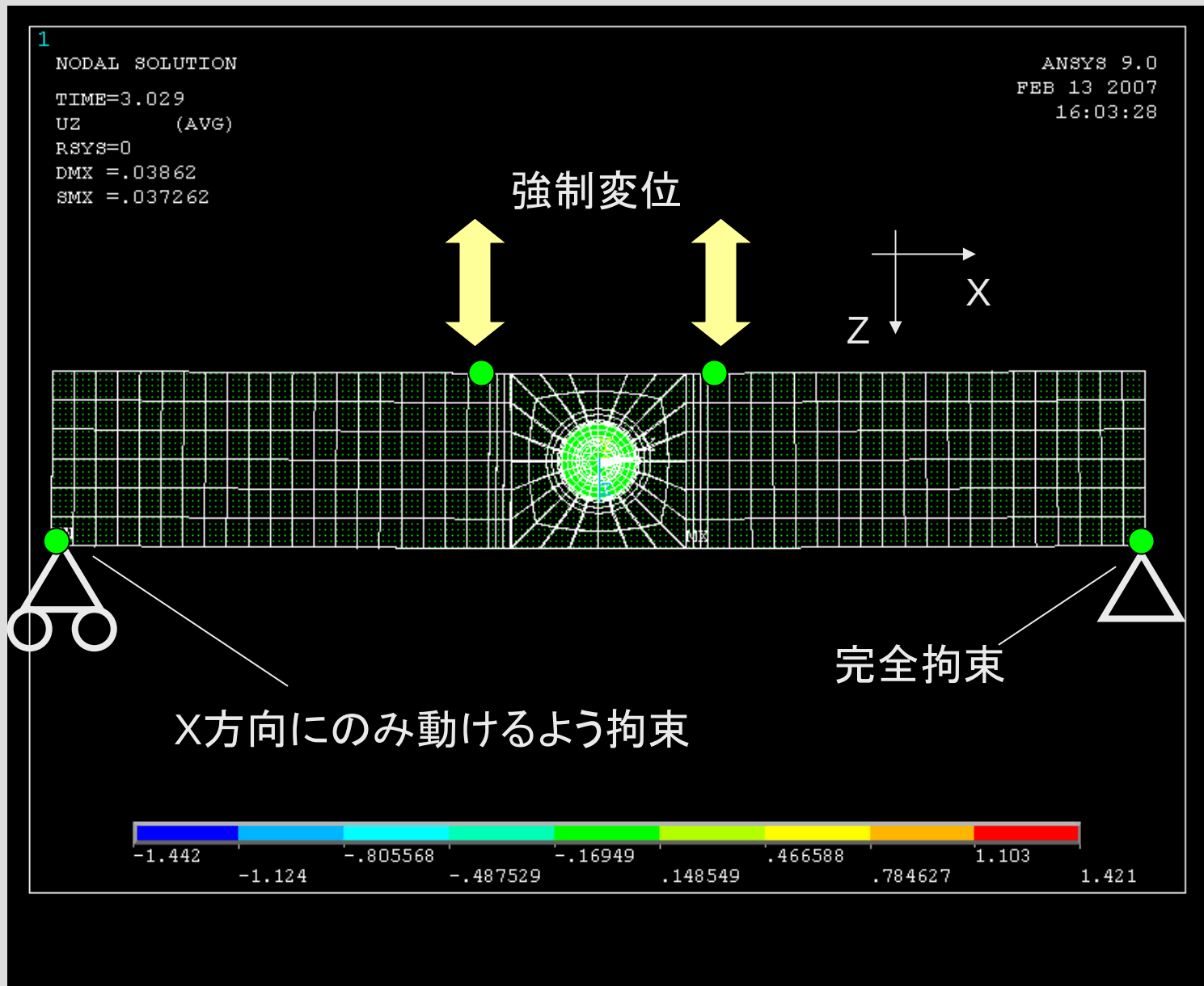
②軸回りのねじり荷重の解析結果



軸を中心としてナットとボルト頭部が逆方向に回転
ボルトがねじれる

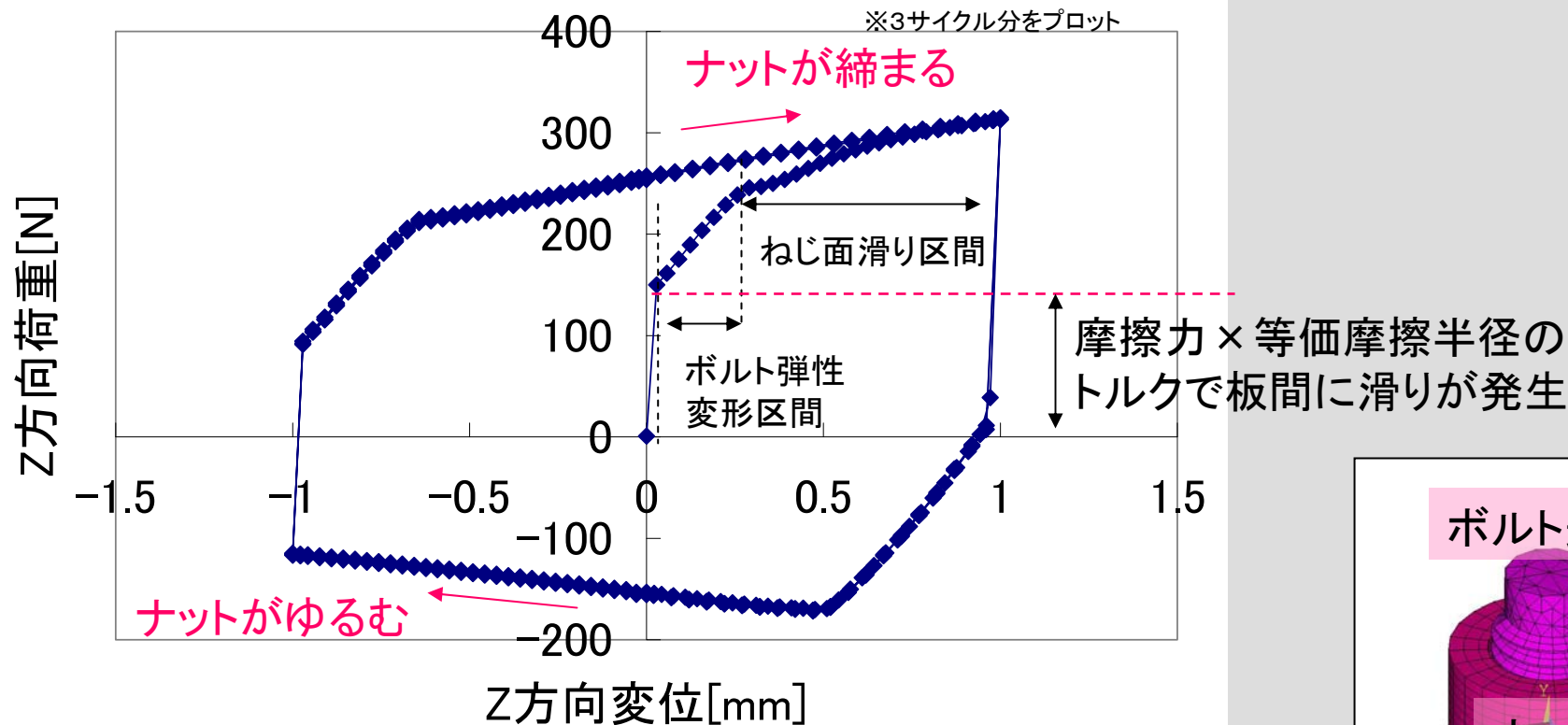
加振アニメーション（Z方向変位コンター）

変位スケール × 20



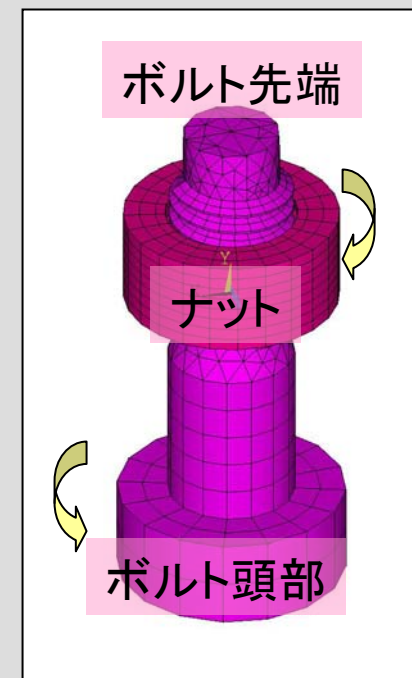
ねじ山モデル解析結果

変位と荷重の関係



接触面で滑りが発生すると剛性の傾きに変化が生じる

ボルト・ナットが相対回転することで
軸力が大きく変動する(6000N～8500N)



ボルト弾性ねじれ後の挙動

ねじ面を締め付け側に滑らせるトルク $T_{ST} = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2 \mu_s}{\cos \alpha} + \frac{P}{\pi} \right)$

ねじ面をゆるめ側に滑らせるトルク $T_{SL} = \frac{F}{2} \left(\frac{d_2 \mu_s}{\cos \alpha} - \frac{P}{\pi} \right)$

座面を滑らせるトルク $T_w = \frac{F \mu_w d_w}{2}$

各トルクの大小関係により
どの接触面で滑りが発生するか決まる

ゆるみが進行する条件

$$T_{SL} < T_w < T_{ST}$$

F: 軸力

d_2 : ねじの有効径

α : ねじ山半角

P: ピッチ

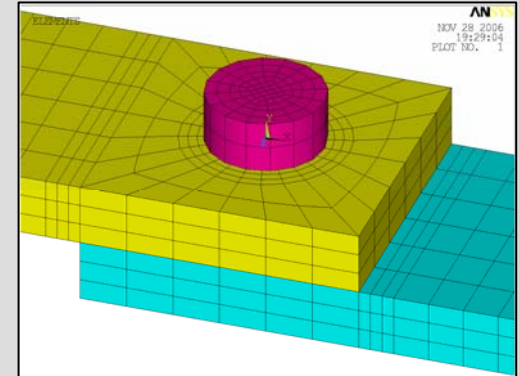
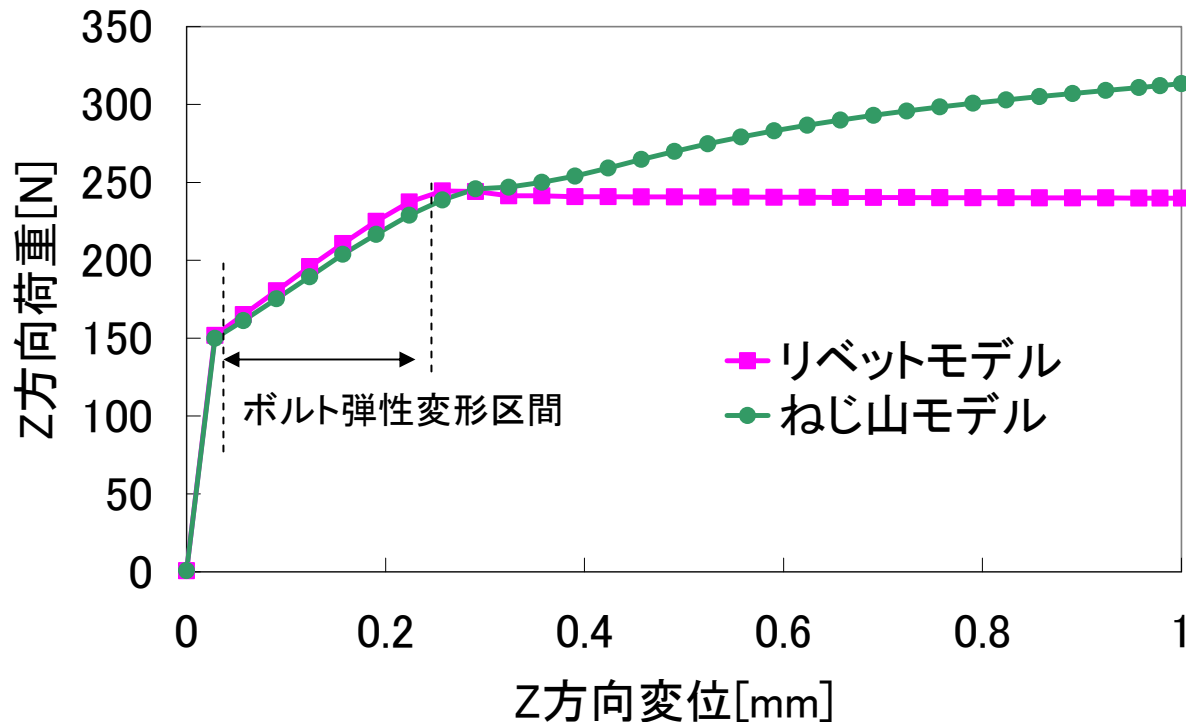
d_w : 座面の等価摩擦直径

μ_s : ねじ面摩擦係数

μ_w : 座面摩擦係数

リベットモデル解析結果

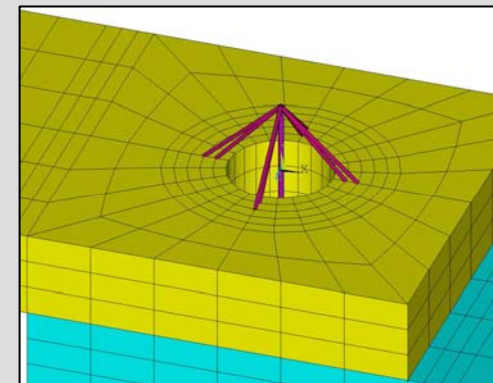
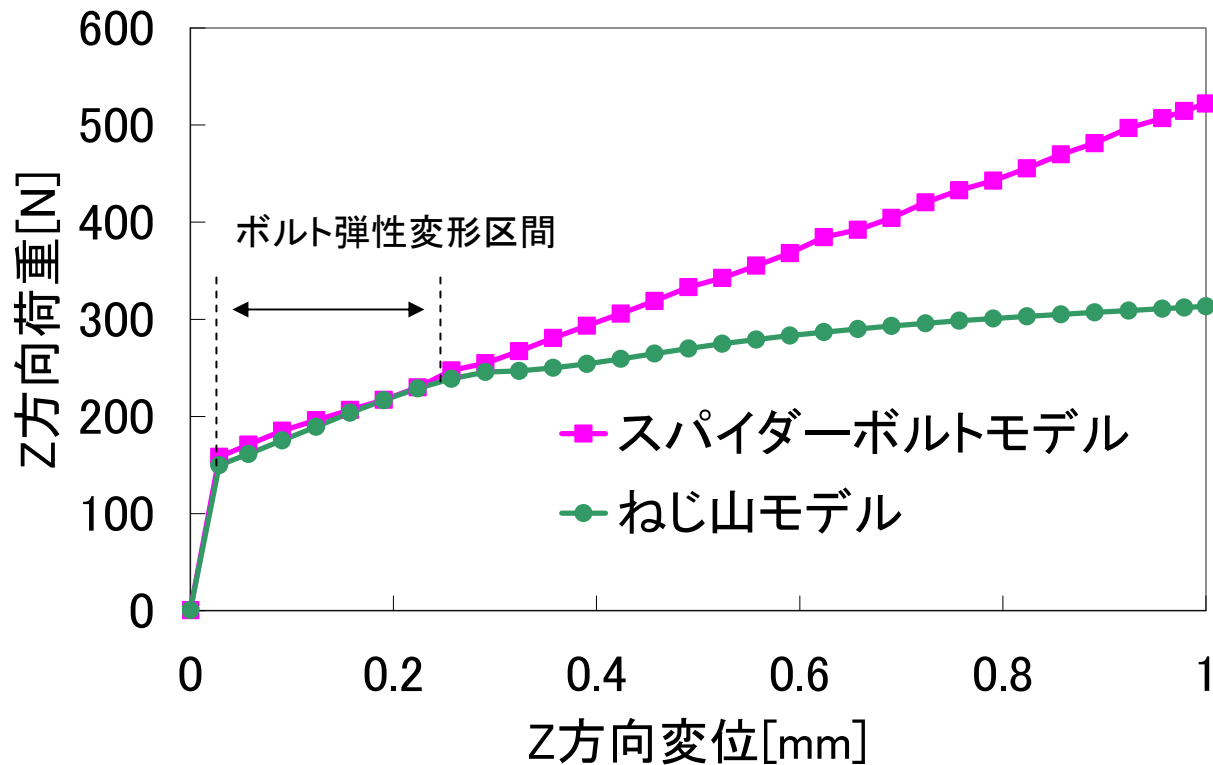
リベットモデルとねじ山モデルの剛性比較



- ・ボルト弾性変形区間までの剛性は一致
- ・ねじ面滑り区間(ボルト-ナットの相対回転)は再現できない
- ・必ず座面滑りが発生する

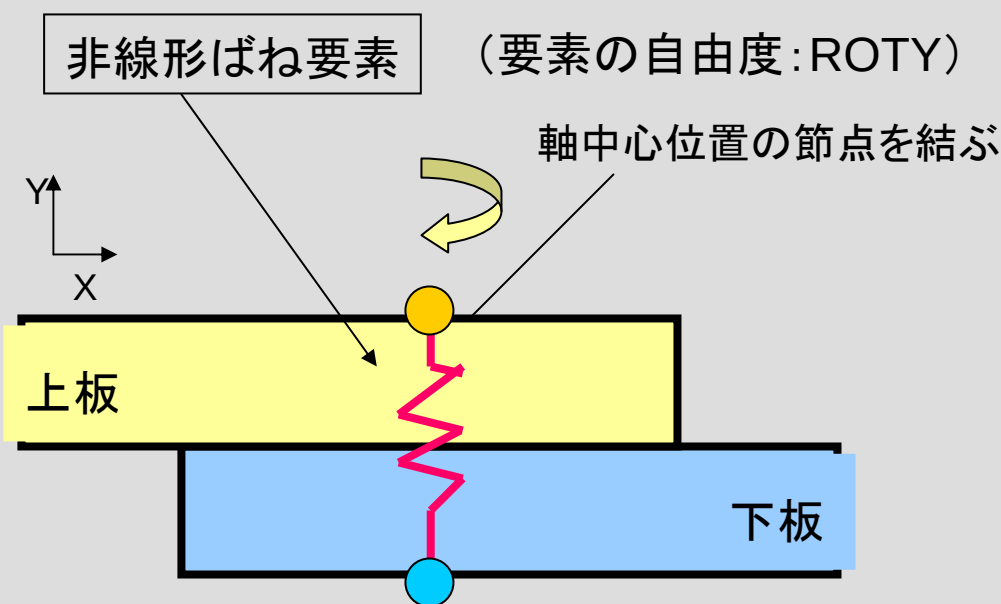
スパイダーボルトモデル解析結果

スパイダーボルトモデルとねじ山モデルの剛性比較



- ・ボルト弾性変形区間までの剛性は合わせ込みができる
- ・ねじ面滑りは再現できずボルトの弾性変形が続く

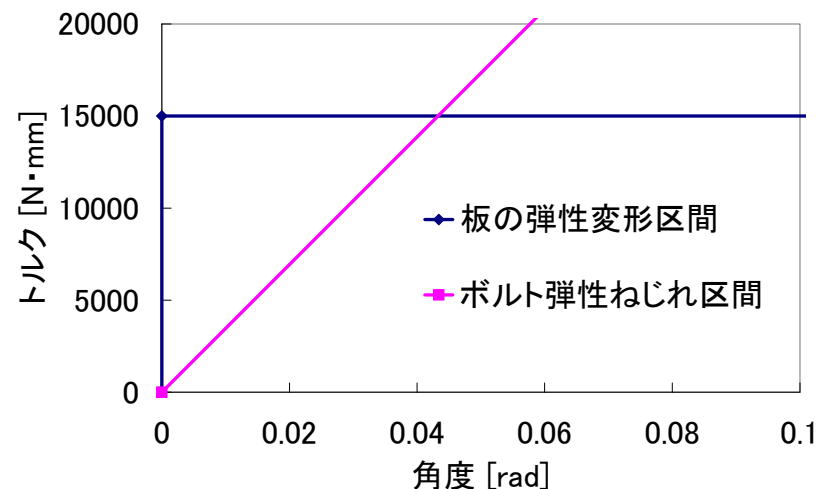
ボルト穴なしモデルによる等価剛性の再現



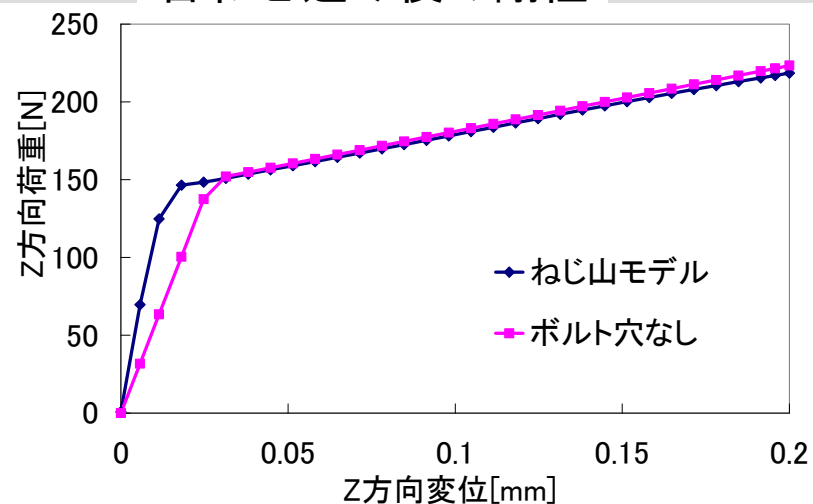
ねじ山モデルの結果を参考に
非線形ばね要素の剛性を定義する

注: 回転の自由度伝達のため
一部にビーム要素を使用

非線形ばね要素の剛性定義



合わせ込み後の剛性



軸回りのねじり荷重の解析結果まとめ

計算時間の相対関係などは並進方向荷重の解析とほぼ同様

ねじ山モデル

ボルト・ナットの相対回転の再現が可能（ゆるみの進行も）

リベットモデル

ボルト・ナットの相対回転の再現は不可能

⇒ ボルト弾性変形区間までの使用（剛性は一致）
（理論式から算出可能）

計算時間はねじ山モデルの半分程度

スパイダーボルトモデル

ボルト・ナットの相対回転の再現は不可能

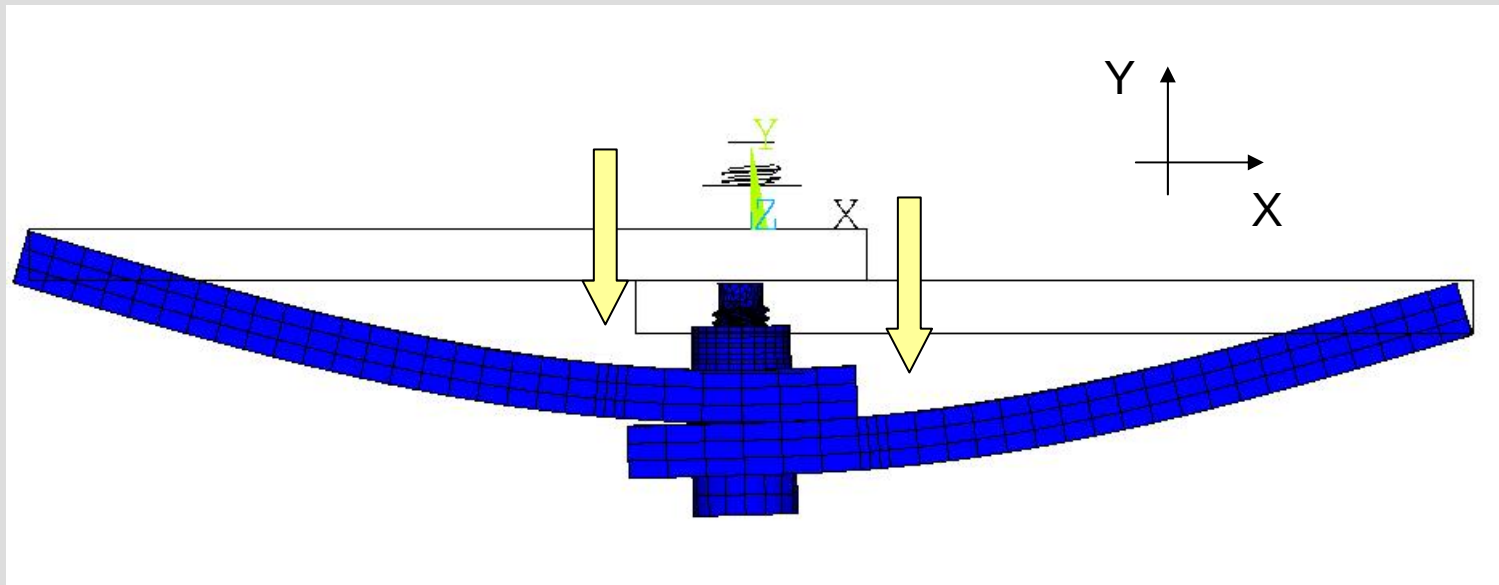
⇒ ボルト弾性変形区間までの使用（剛性の合わせ込み）

ボルト穴なしモデル

非線形ばね要素の利用により剛性を任意に再現可能

計算時間はねじ山モデルの10分の1程度

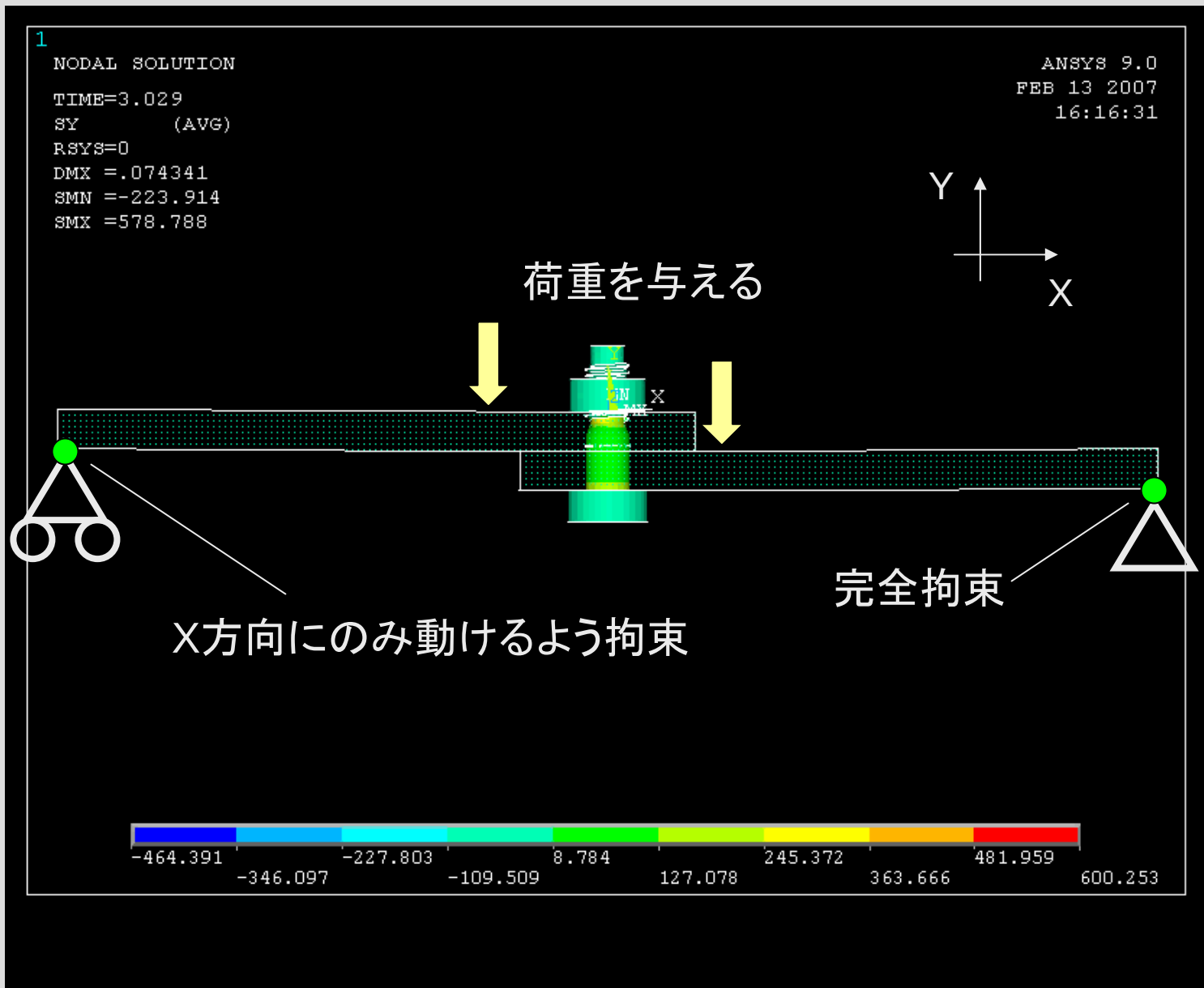
③軸方向曲げ荷重の解析結果



板が曲がるとボルトは軸方向へ引き伸ばされる

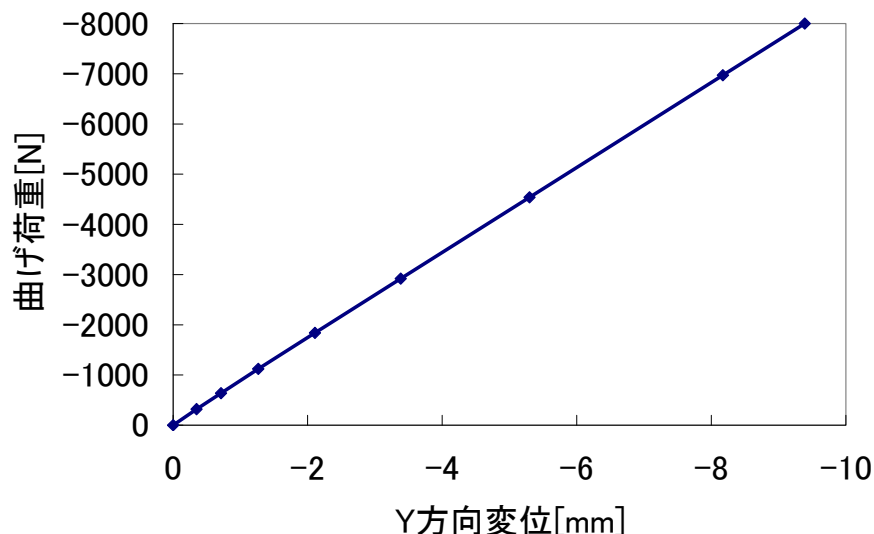
加振アニメーション（Y方向応力コンター）

変位スケール ×10

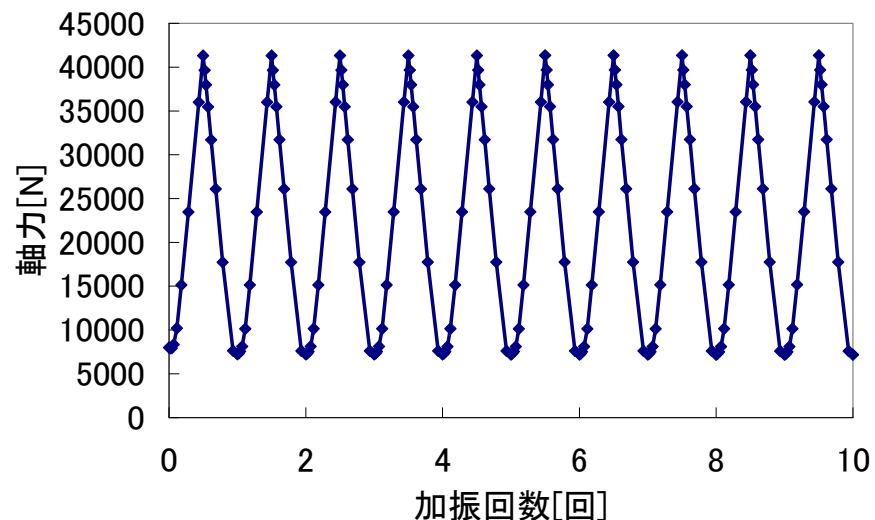


ねじ山モデル解析結果

曲げ剛性



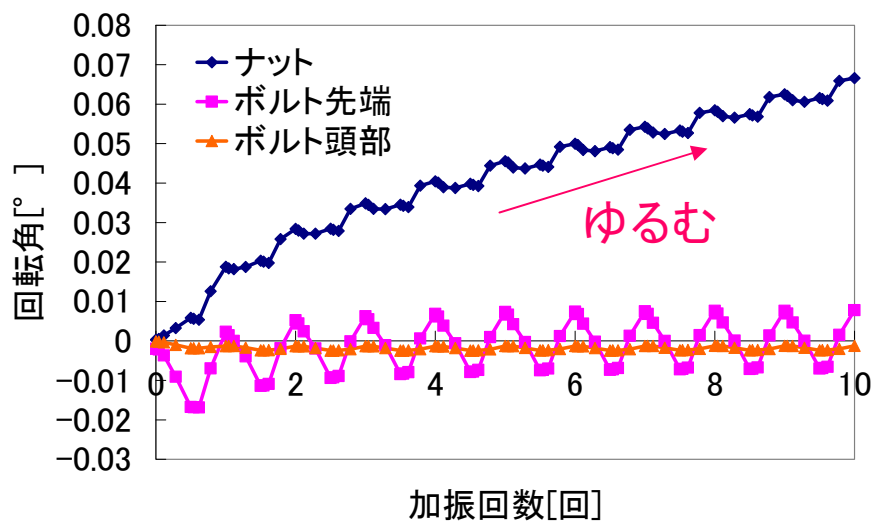
軸力変動



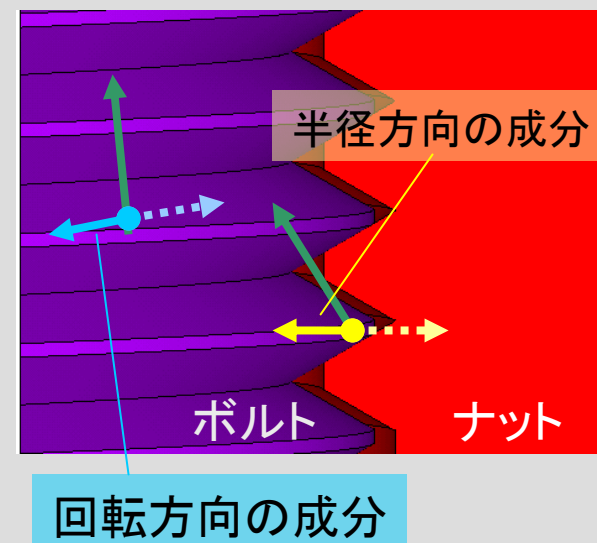
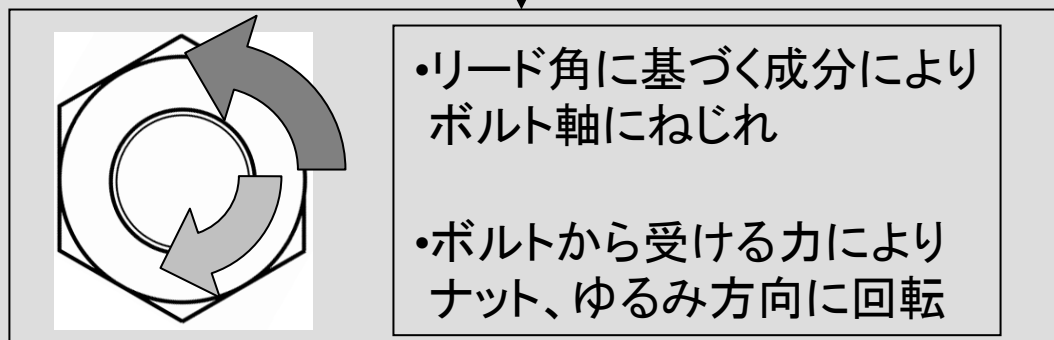
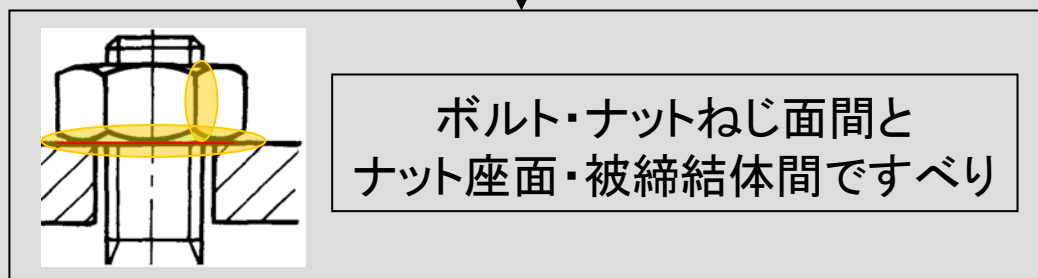
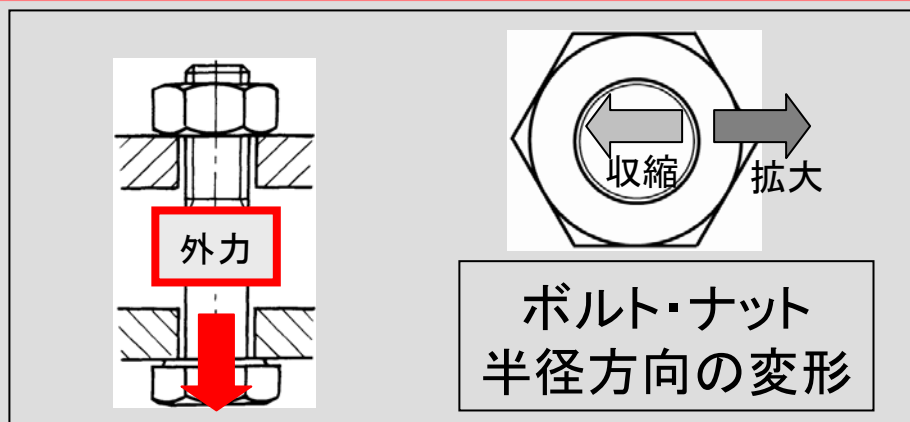
軸力変動が大きい場合
ナットがゆるみ方向に回転

8000N～20000N程度の変動では
ゆるみの進行はなし(収束する)

ボルト・ナットの回転角



軸方向外力によるゆるみの発生

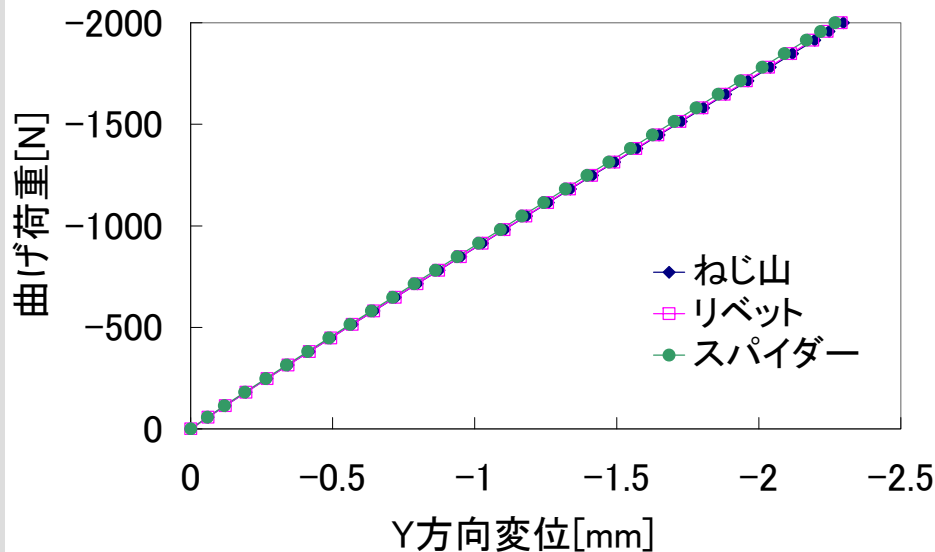


ただし、この現象の進行は
疲労破壊を引き起こすほどの
軸力変動を必要とする

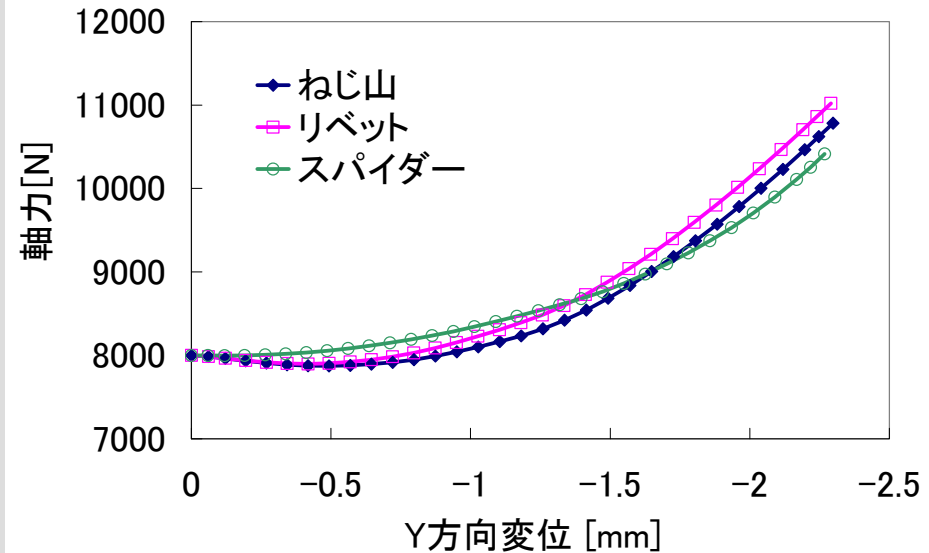
適切な疲労強度設計をすれば
通常考慮なくてよいゆるみ

リベット・スパイダーボルトモデル解析結果

ねじ山モデルとの剛性比較



ねじ山モデルとの軸力挙動比較

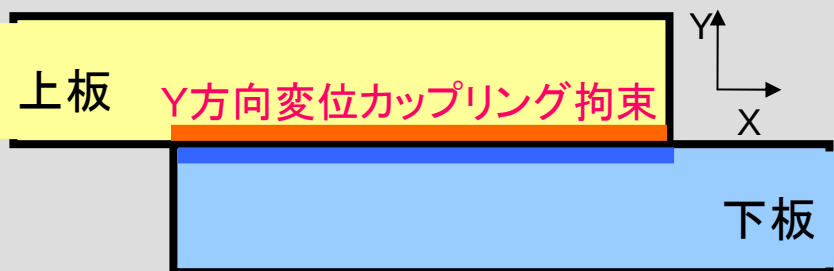


- ・曲げ剛性はリベットモデル・スパイダーボルトモデルともにねじ山モデルと一致
- ・軸力変動もねじ山モデルとほぼ一致

どちらのモデリング手法も問題なし

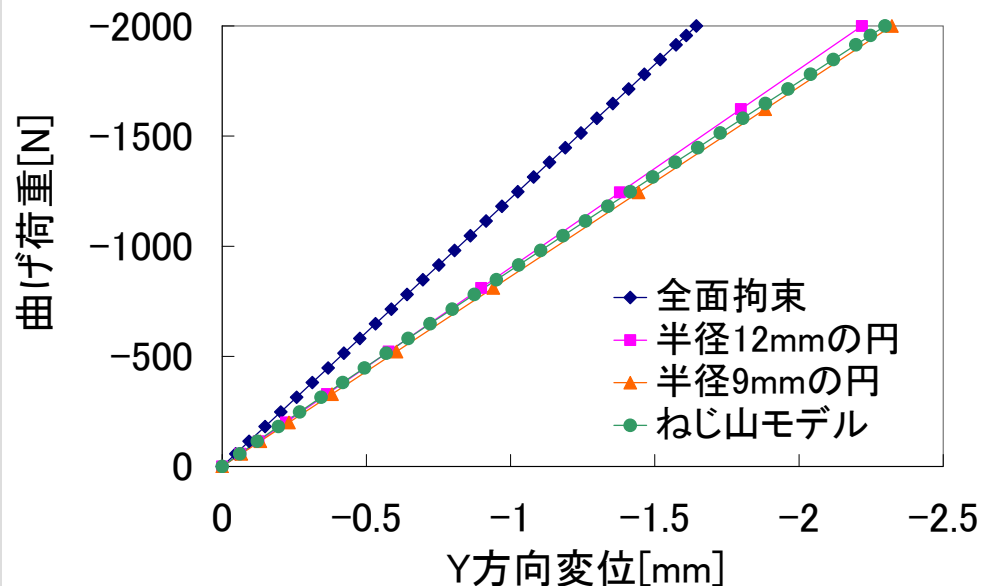
ボルト穴なしモデルによる等価剛性の再現

板同士が離れないものとして固着

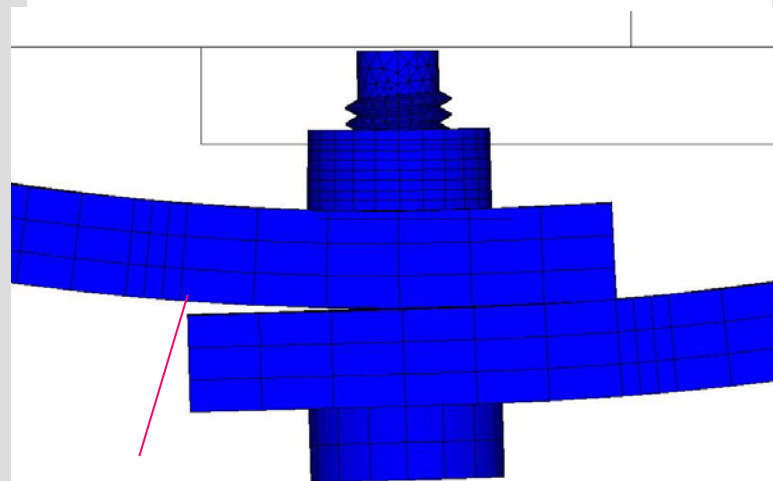


全面拘束では過度な拘束となり剛性が高くなる

拘束面積による曲げ剛性の変化



変形図 (変位スケール × 10)



板間是一部非接触

軸の位置を中心として円状に
拘束面積を縮小することで
曲げ剛性の合わせ込みは可能

軸力の評価はできない

軸方向曲げ荷重の解析結果まとめ

各モデリング手法による計算コストの比較表

	Node number	Element number	Contact element number	Computational time[s]
Thread model	24015	7764	4	5468 (100%)
Rivet model	13639	3329	3	2564 (47%)
Spider-bolt model	10221	2227	1	1841 (34%)
No-hole model	6006	1047	0	421 (8%)

ねじ山モデル

軸方向外力によるゆるみの再現が可能

リベットモデル

(ゆるみの評価は不可能)

通常的设计条件では問題なし(剛性・軸力)

計算時間はねじ山モデルの半分程度

スパイダーボルトモデル

(ゆるみの評価は不可能)

通常的设计条件では問題なし(剛性・軸力)

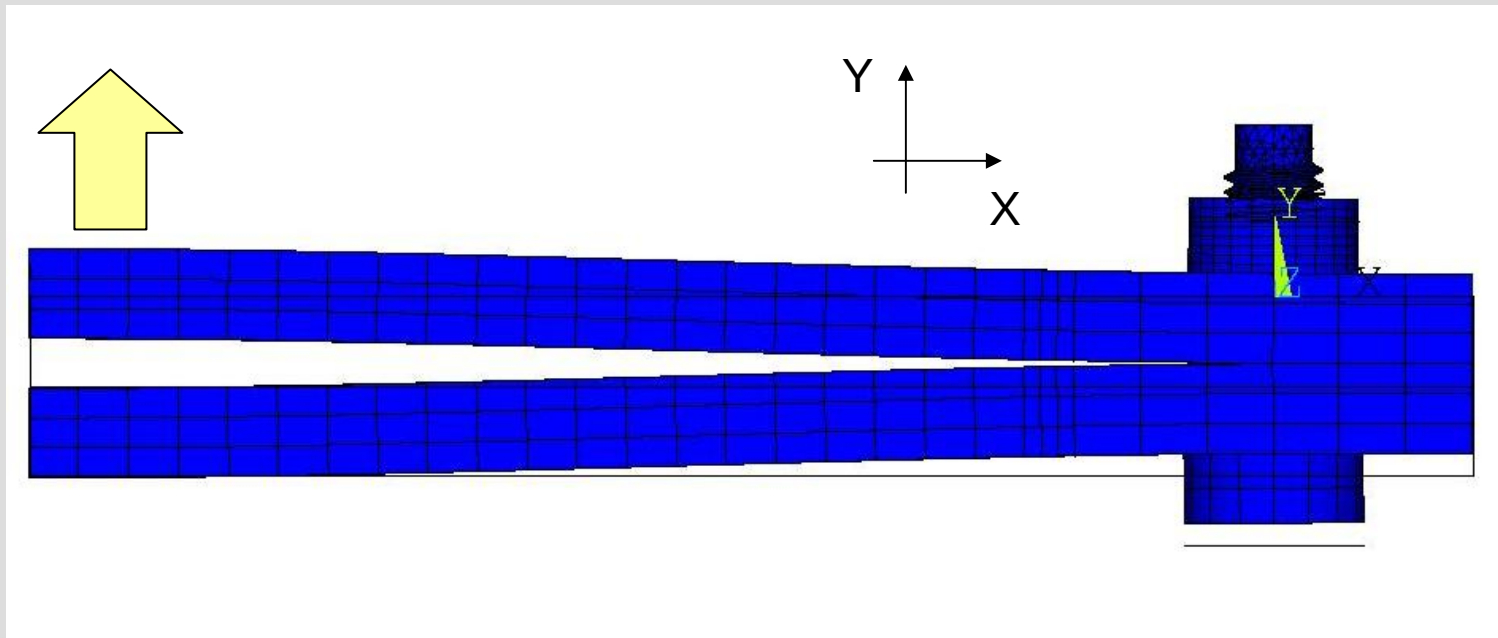
計算時間はねじ山モデルの3分の1程度

ボルト穴なしモデル

板間の固着面積の調整により曲げ剛性を再現可能

計算時間はねじ山モデルの10分の1程度

④偏心軸方向荷重の解析結果

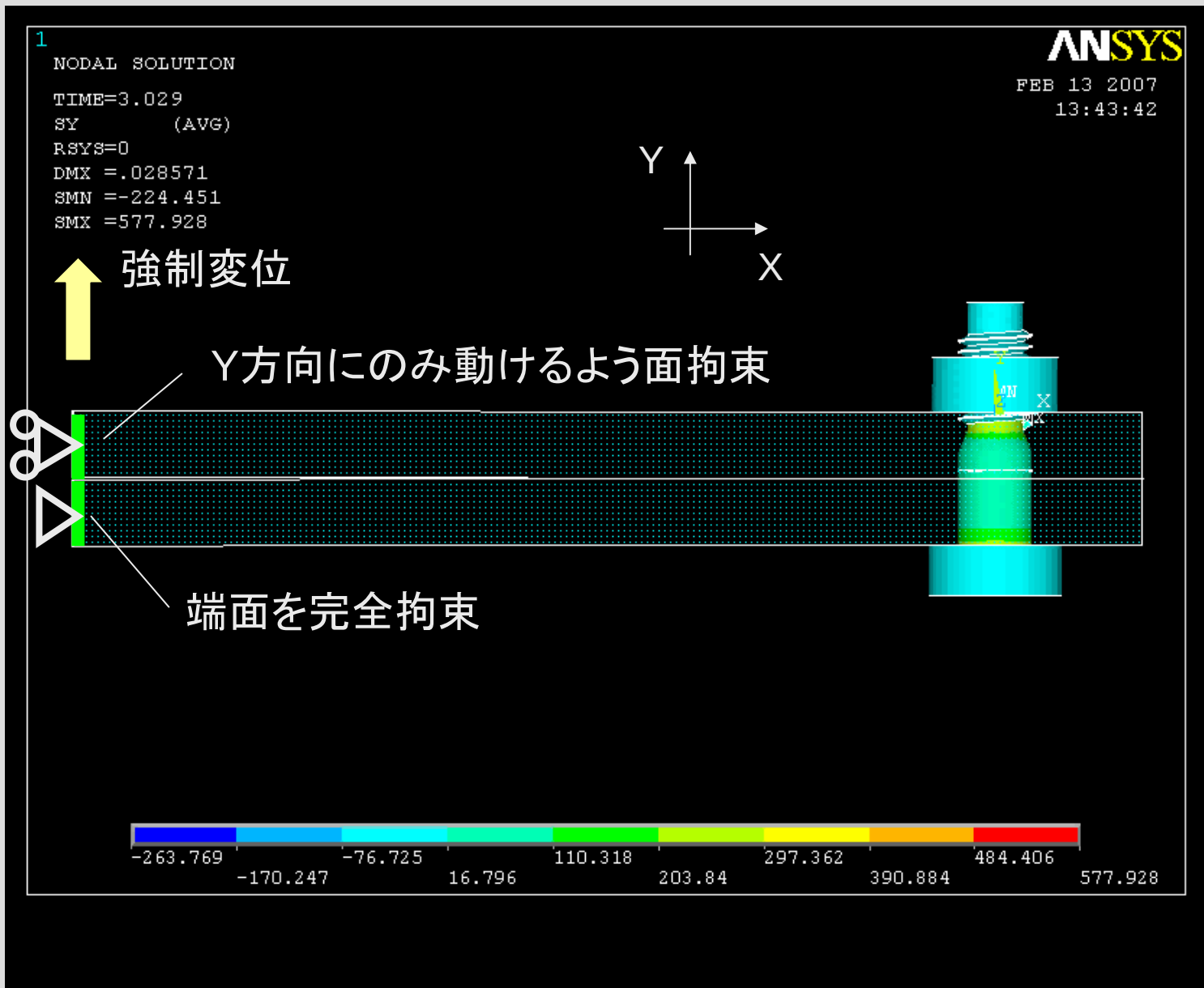


ボルト軸が引き伸ばされる
⇒ 軸方向曲げ荷重とよく似た現象

加振アニメーション（Y方向応力コンター）

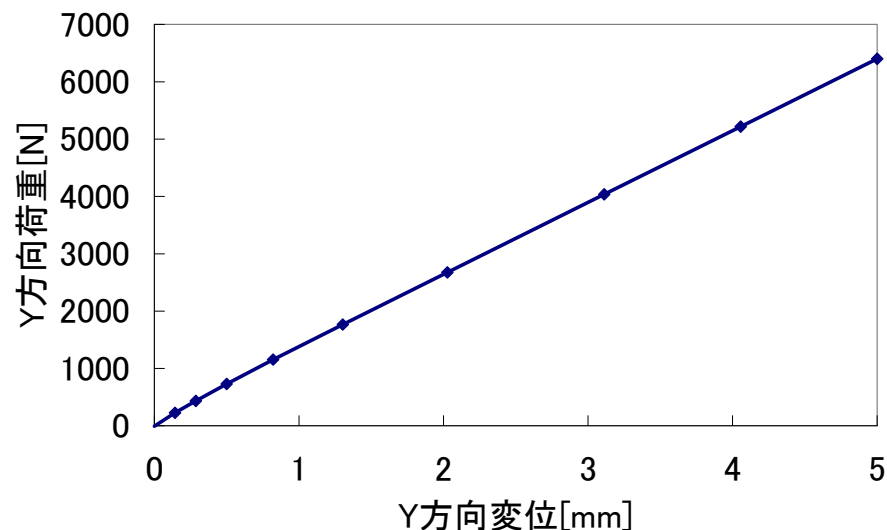
35

変位スケール ×10

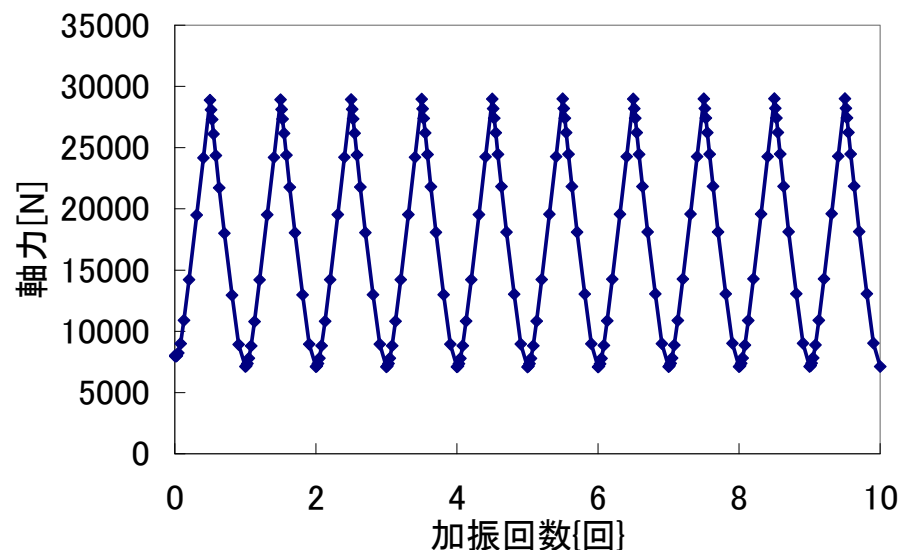


ねじ山モデル解析結果

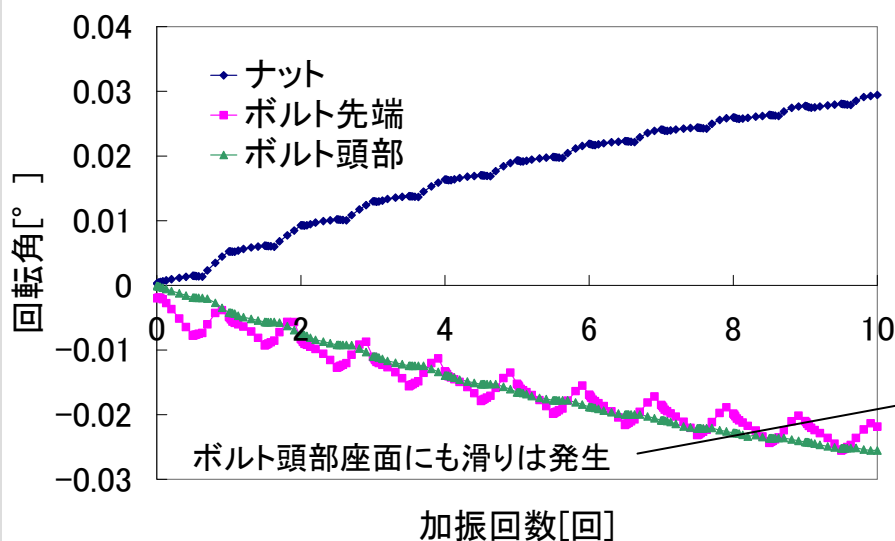
剛性



軸力変動



回転角



軸力変動幅が非常に大きい場合は
軸方向外力によるゆるみが発生

軸方向曲げ荷重と若干滑りの
発生位置は異なる

軸方向曲げ荷重の解析結果まとめ

計算時間の相対関係などは軸方向曲げ荷重の解析とほぼ同様

ねじ山モデル

軸方向外力によるゆるみの再現が可能

リベットモデル

(ゆるみの評価は不可能)

通常的设计条件では問題なし(剛性・軸力)

計算時間はねじ山モデルの半分程度

スパイダーボルトモデル

(ゆるみの評価は不可能)

通常的设计条件では問題なし(剛性・軸力)

計算時間はねじ山モデルの3分の1程度

ボルト穴なしモデル

板間の固着面積の調整により曲げ剛性をほぼ再現可能

計算時間はねじ山モデルの10分の1程度

3. 各モデリング手法の有効性まとめ

結言

ねじ山モデル

- ・ねじ面滑りと座面滑りの発生を再現
⇒ **ボルト・ナットの相対回転やゆるみ発生**の検討が可能

ゆるみの発生しやすい並進方向荷重や軸回りのねじり荷重に対して特に有効

リベットモデル

- ・ねじ面滑りの発生は再現できない ⇒ **別途ゆるみの評価が必要**
- ・**ゆるみが発生しない範囲での剛性と軸力評価に問題なし**
(並進方向荷重に対する剛性はやや高くなる)
- ・工程の点からも**計算コストが低い**

使用条件に注意すればどの荷重に対してもほぼ有効

結言

スパイダーボルトモデル

- ・ねじ面滑りの発生は再現できない ⇒ 別途ゆるみの評価が必要
- ・ボルトが弾性変形する剛性は任意に合わせ込みが可能
- ・ボルトの剛性合わせ込みのための指針に検討が必要
(様々な荷重に対する剛性を同時に合わせ込むにはどうするか?)
- ・軸方向曲げと偏心軸方向荷重に対しては
細かく剛性を合わせ込まなくても剛性と軸力がねじ山モデルとほぼ一致

ボルト軸が引き伸ばされることが支配的な現象に対しては有効

結言

ボルト穴なしモデル

- ・接触要素を用いないため**計算機の負荷が小さい**
- ・**並進方向と軸回りのねじり荷重に対しては非線形ばね要素により剛性の再現が可能**
- ・軸方向曲げと偏心軸方向荷重に対しては板同士の固着面積を調節することで剛性の合わせ込みが可能
- ・**軸力の評価が不可能**
- ・**様々な荷重に対する剛性を別個検討していく手間がかかる**
(拘束条件が干渉しないように注意する必要がある)

計算機の負荷を優先的に考えた場合には有効だが
様々な荷重が同時に働く複雑な現象に対しては適用は難しい

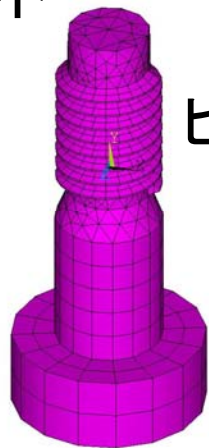
1. ねじ山モデルの応用展開
2. ボルトの多体問題への適用（複数のボルト締結体の取り扱いについて）
3. 今年度の内容の拡充

以上

『ありがとうございました。』

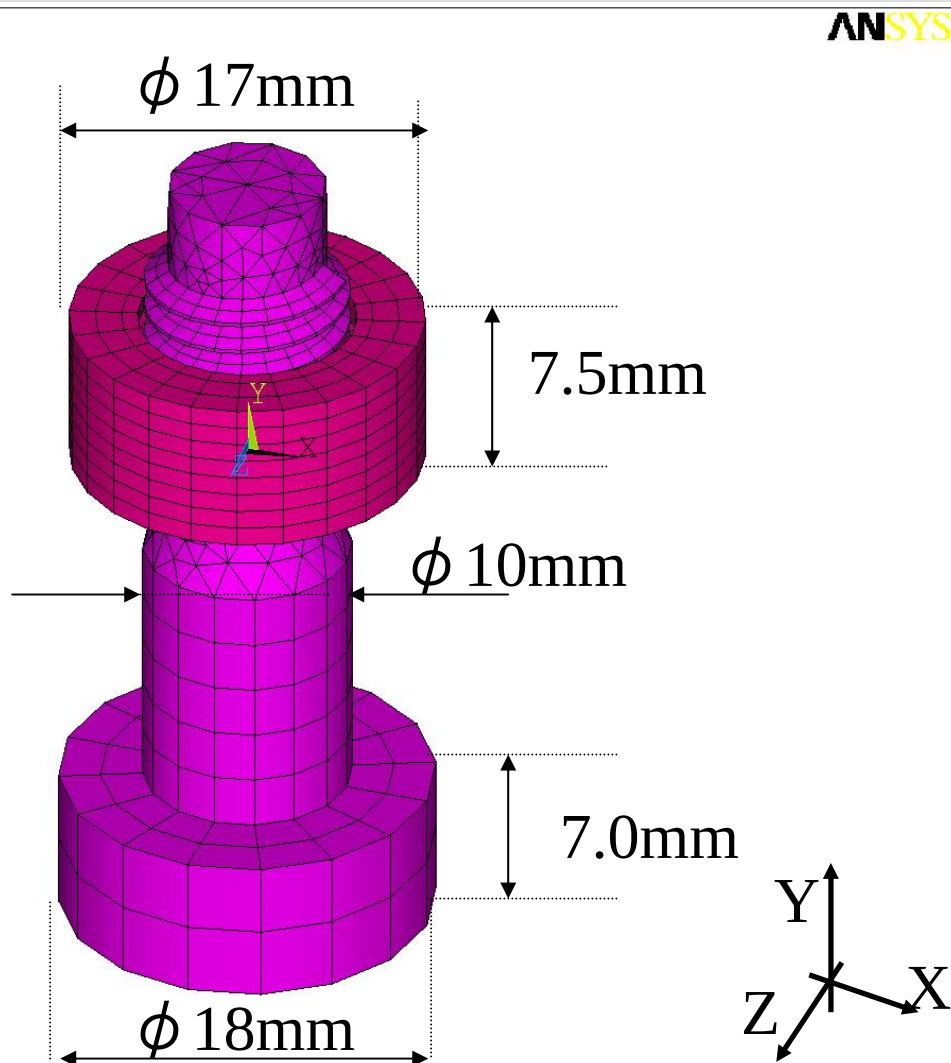
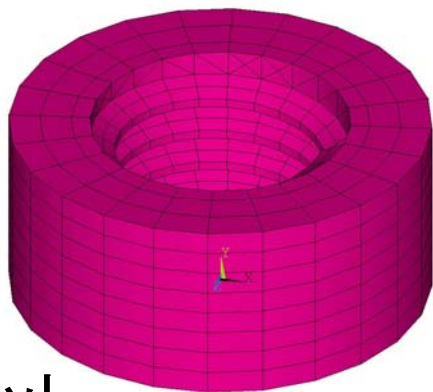
ボルト・ナットモデル寸法

M10ボルト



ピッチ 1.5 mm

ナット



被締結物寸法

