

ボルト締結勉強会用資料 (ベンチマークテストの解析結果)

2007/12/12

酒井・泉研究室 修士2年
中嶋 一裕

緒言

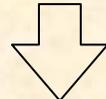
日本機械学会 機械材料・材料加工部門 分科会
「締結・接合・接着部のCAE用モデリング及び評価技術の構築」
ねじ締結 Working Group

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

背景

様々なボルト締結のモデリング手法

- ・三次元ソリッドモデル 計算が高コスト 精度が高い
- ・ビーム要素等でボルトを簡略化 計算が低コスト 精度が低い



設計支援ソフトによるボルトの自動モデリング機能の有効性に疑問
応力・剛性・限界滑り量は評価できるのか？

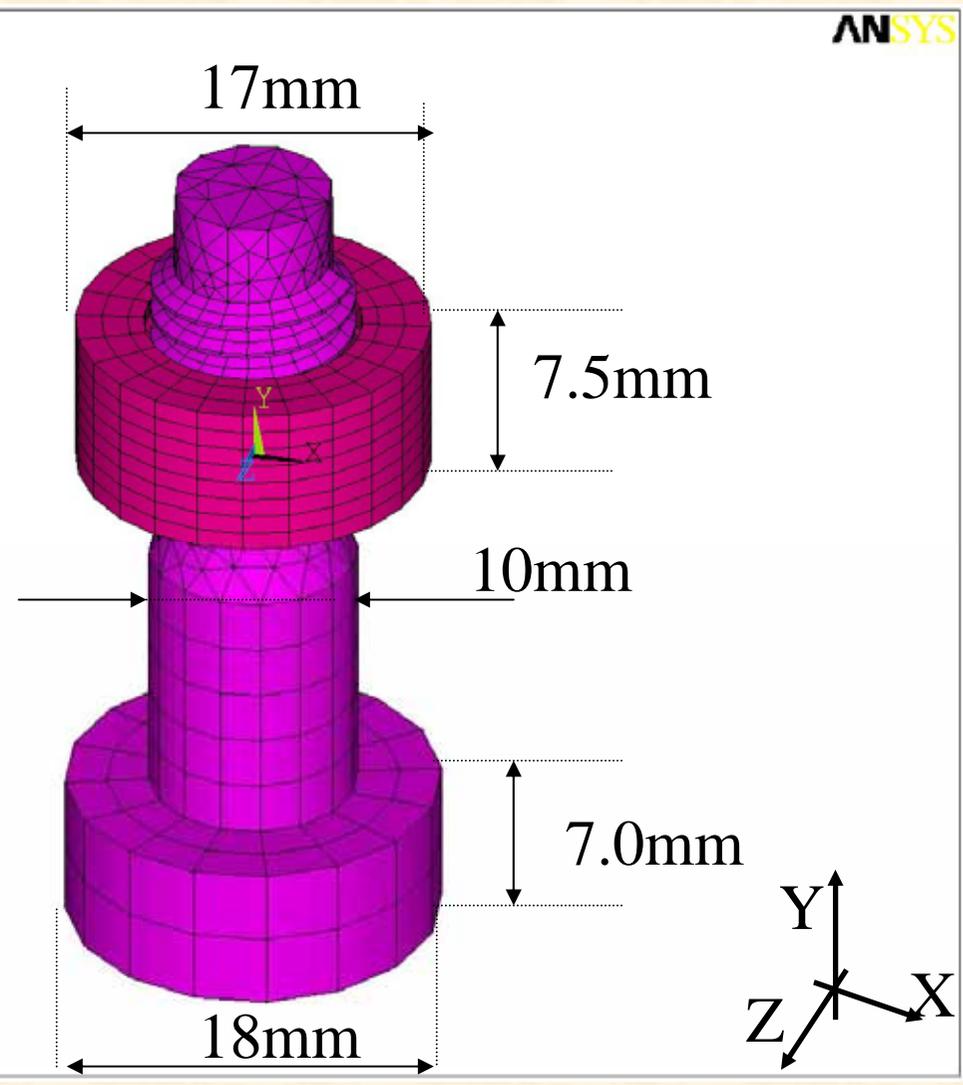
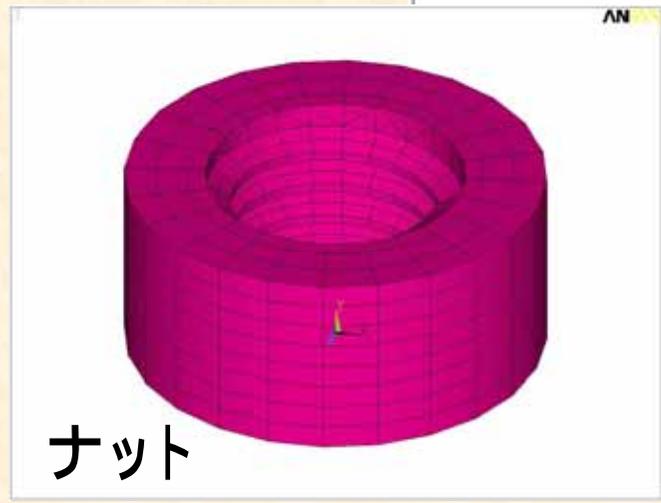
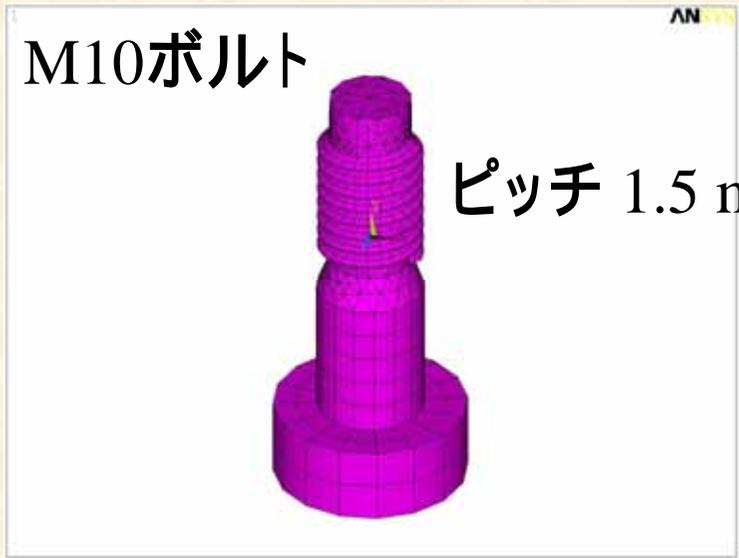
提案

ベンチマークテストにより各モデリングの解析結果を実験と比較

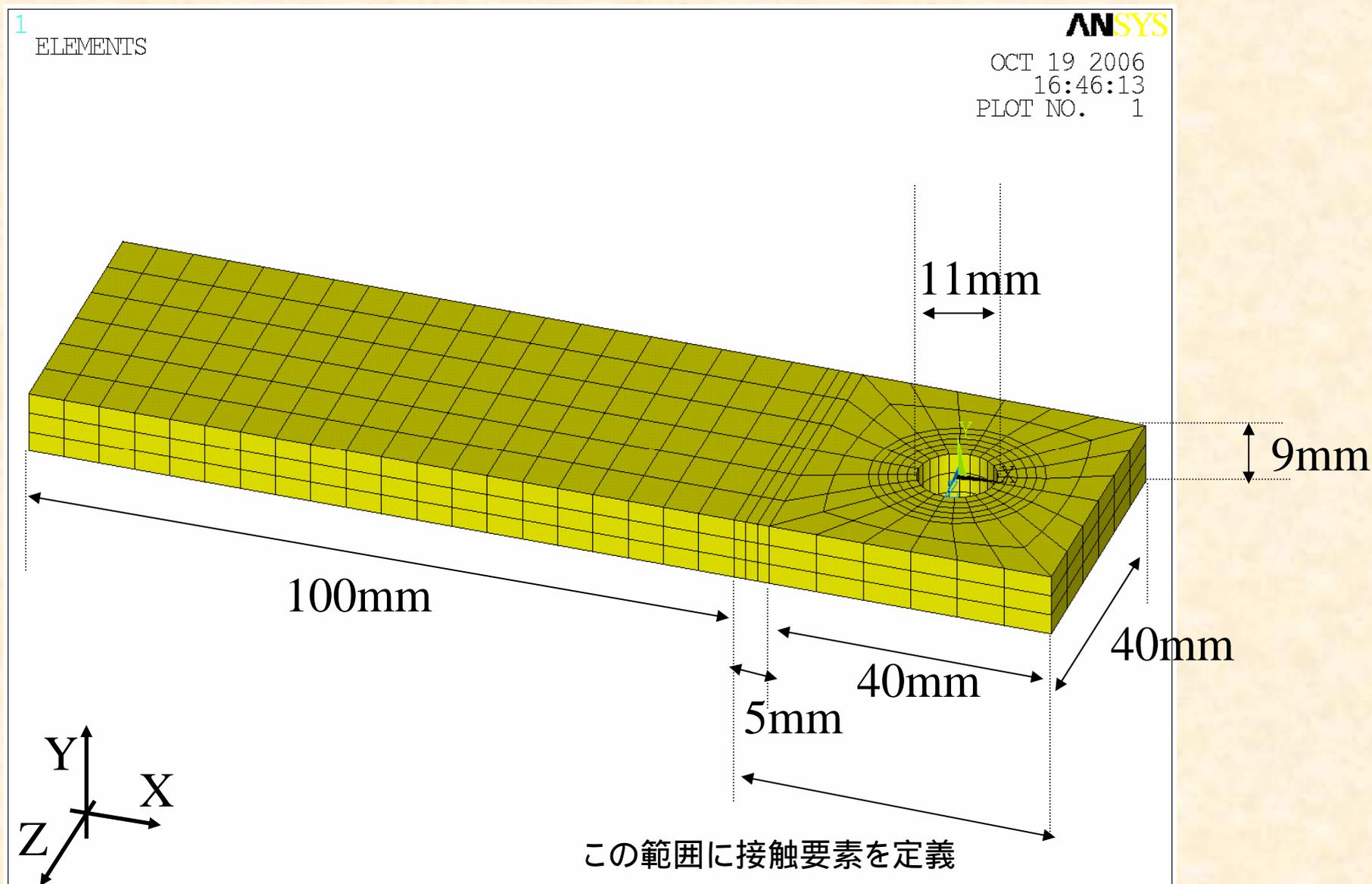
- ・ガasketを含むフランジモデル(軸方向荷重)
- ・2枚板の締結モデル(軸垂直方向荷重)

各ソフトの様々なボルトモデリング手法の有効性を議論・整理

ボルト・ナットモデル寸法



被締結物寸法



解析条件

ボルト軸直角方向荷重 (2枚板の締結)

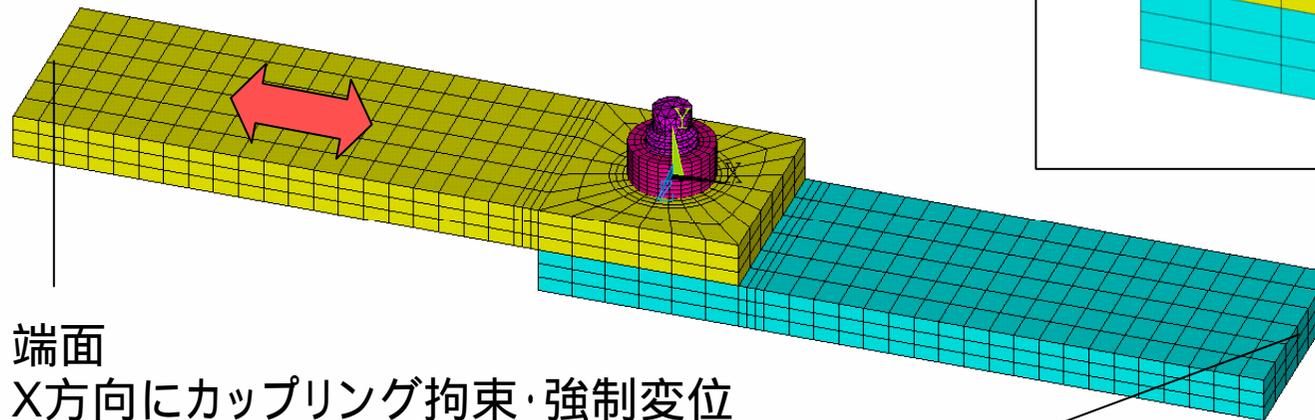
使用解析ソフト: ANSYS 9.0

ヤング率 205 GPa

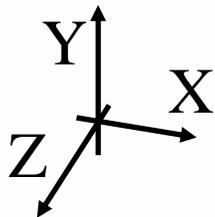
ポアソン比 0.3

摩擦係数 0.20 (全接触面で等しいとした)

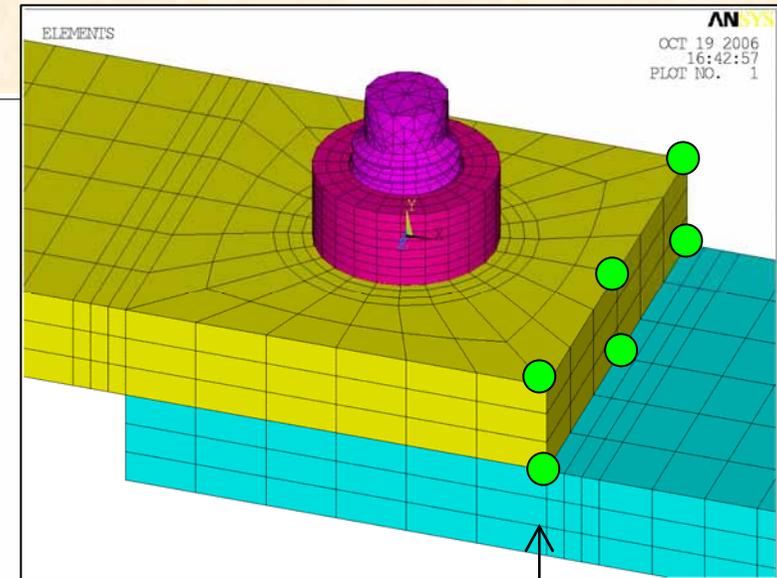
初期締結力 8000 N (プリテンション要素を利用)



端面
X方向にカップリング拘束・強制変位
Y・Z方向に拘束



端面
X方向にカップリング拘束・固定
Y・Z方向に拘束



2枚板相対変位の算出

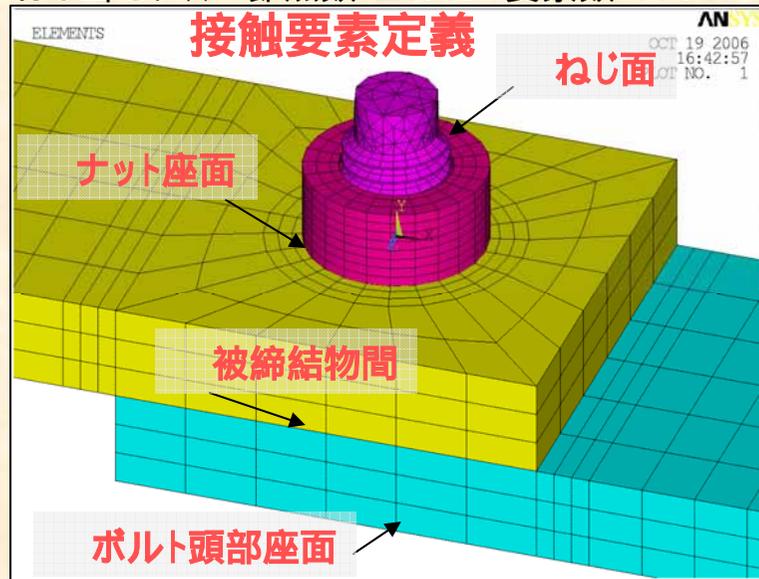
X=20mmにおける
6節点(図の位置)の
平均X方向変位を算出

下側の板についても同
様に平均を算出し計算

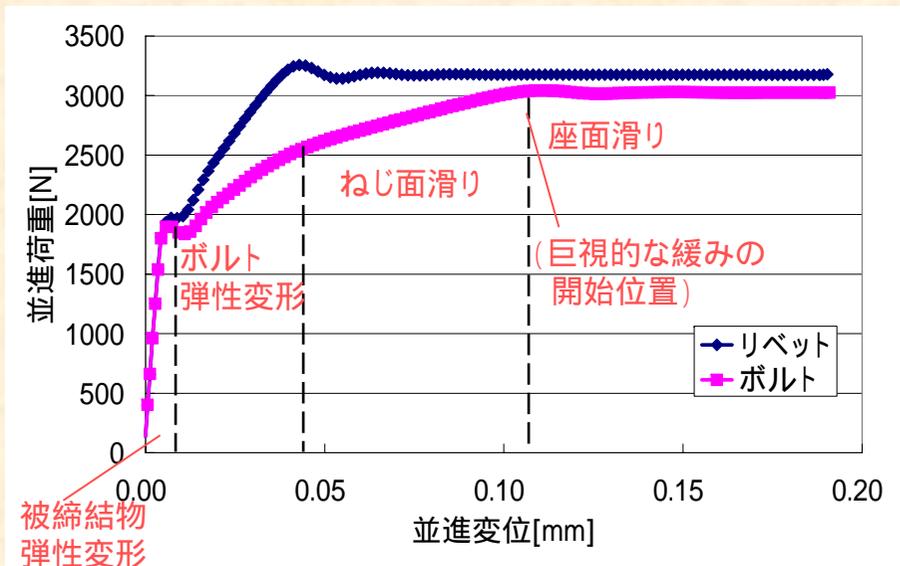
(実験との比較用)

ソリッドモデルの解析結果

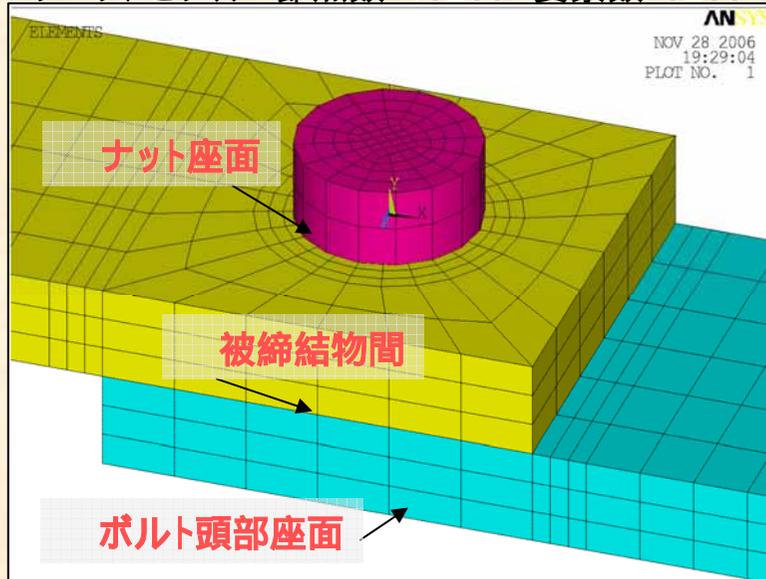
ねじ山モデル 節点数:24015 要素数:7764



ねじ山モデルとリベットモデルの剛性比較



リベットモデル 節点数:13203 要素数:3233



並進荷重の理論値

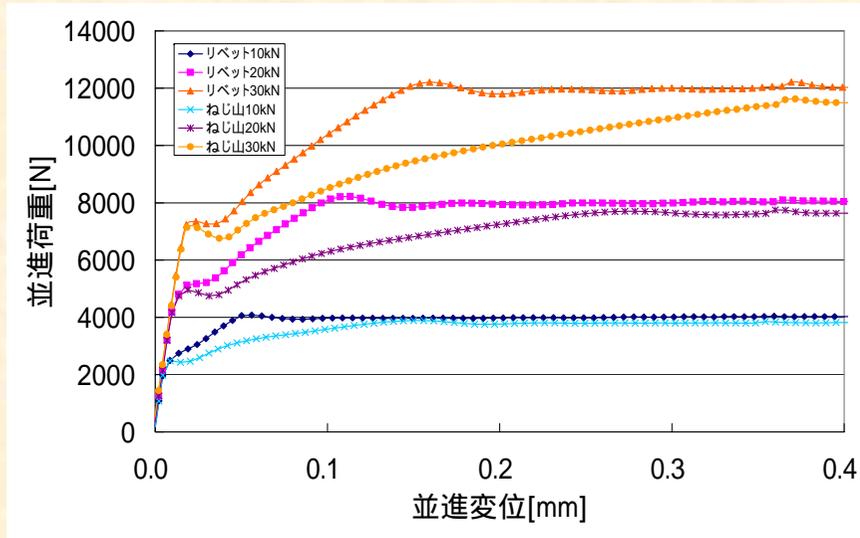
被締結物間の滑り開始 1600N
座面滑り発生後 3200N

ねじ山: ねじ面滑り区間の再現が可能
座面滑りによって緩みが発生

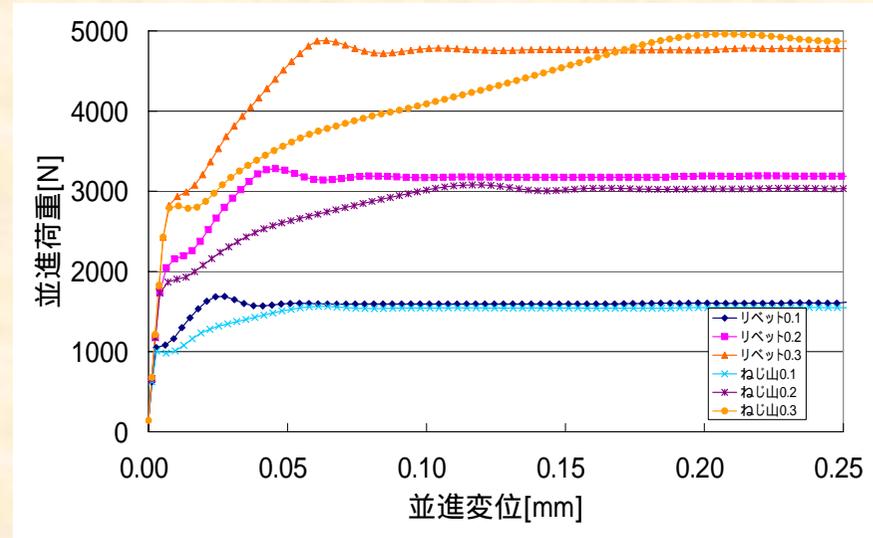
リベット: ナットと固着しているため剛性が高い
限界滑り量は小さく見積もられる

ソリッドモデルの解析結果

軸力の変化 (10kN, 20kN, 30kN) による剛性比較



摩擦係数の変化 (0.1, 0.2, 0.3) による剛性比較



山本らの評価式 (材料力学的導出)

$$\delta = F_s \left\{ \begin{array}{l} \mu_w \left(\frac{l_g^3}{3EI_g} + \frac{l_p^3}{3EI_p} + \frac{l_g l_p l_n}{EI_g} + k_w l_n^2 \right) \\ - \frac{m \mu_s}{4 \cos^2 \alpha} \left(\frac{l_g^2}{2EI_g} + \frac{l_p^2}{2EI_p} + \frac{l_g l_p}{EI_g} + k_w l_n \right) \end{array} \right\}$$

F_s : 軸力 μ_w : ナット座面摩擦係数 μ_s : ねじ面摩擦係数

その他: ボルトの形状・材質・固定状態による定数

限界滑り量は軸力に比例・
ねじ面と座面で等しければ摩擦係数にも比例

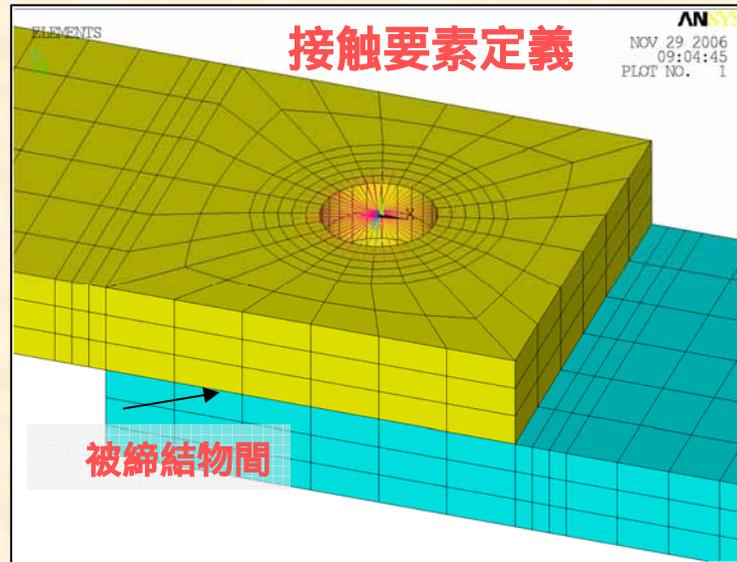
限界滑り量の評価 (上グラフより)

軸力[N]	摩擦係数	リベット[mm]	ねじ山[mm]	差[mm]	比率[倍]
10000	0.2	0.05	0.15	0.10	3.00
20000	0.2	0.11	0.26	0.15	2.36
30000	0.2	0.16	0.37	0.21	2.31
8000	0.1	0.02	0.06	0.04	3.00
8000	0.2	0.04	0.12	0.08	3.00
8000	0.3	0.06	0.20	0.14	3.33

評価する荷重スケールが大きいほど
リベットとねじ山の限界滑り量差は大きくなる

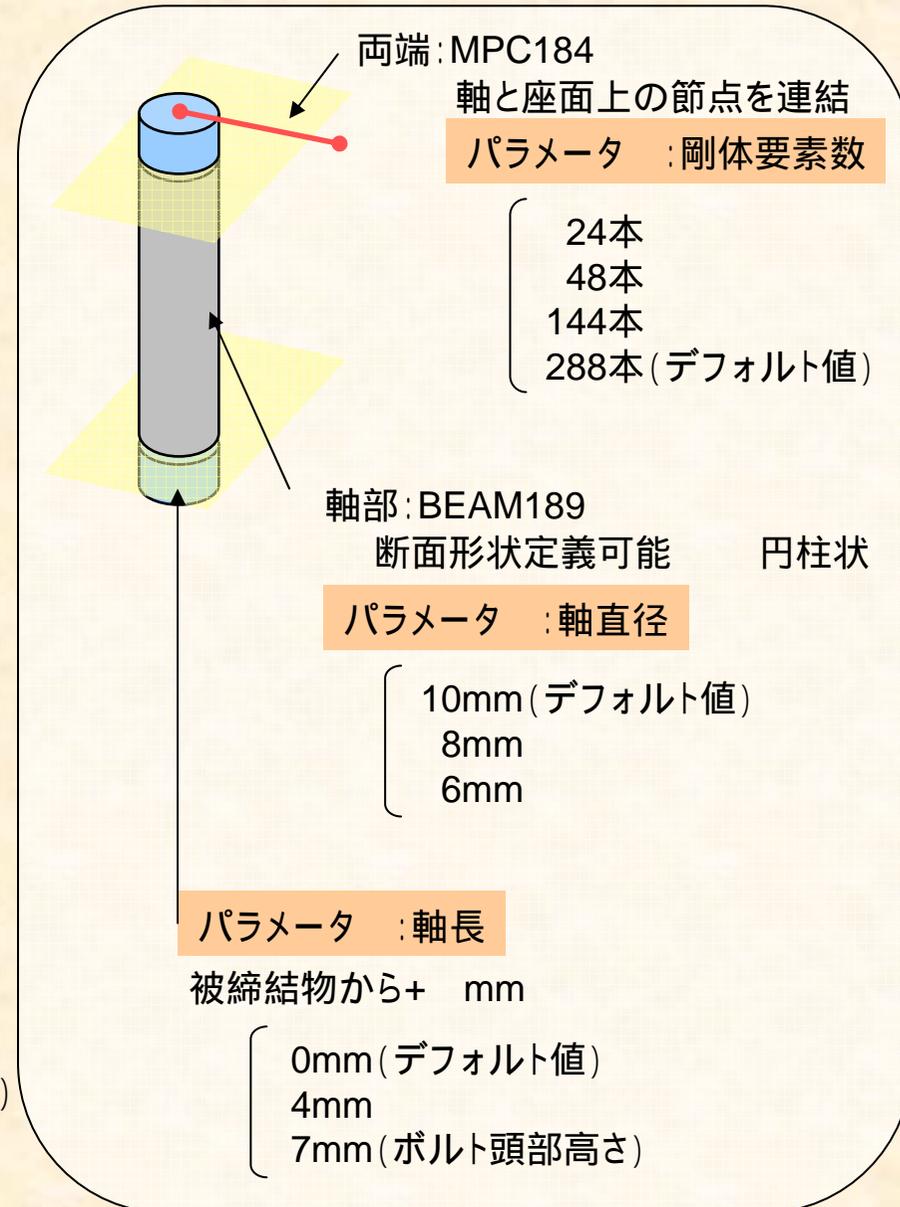
RBEモデルの解析

Rigid Body Element モデル 節点数:10225 要素数:2501



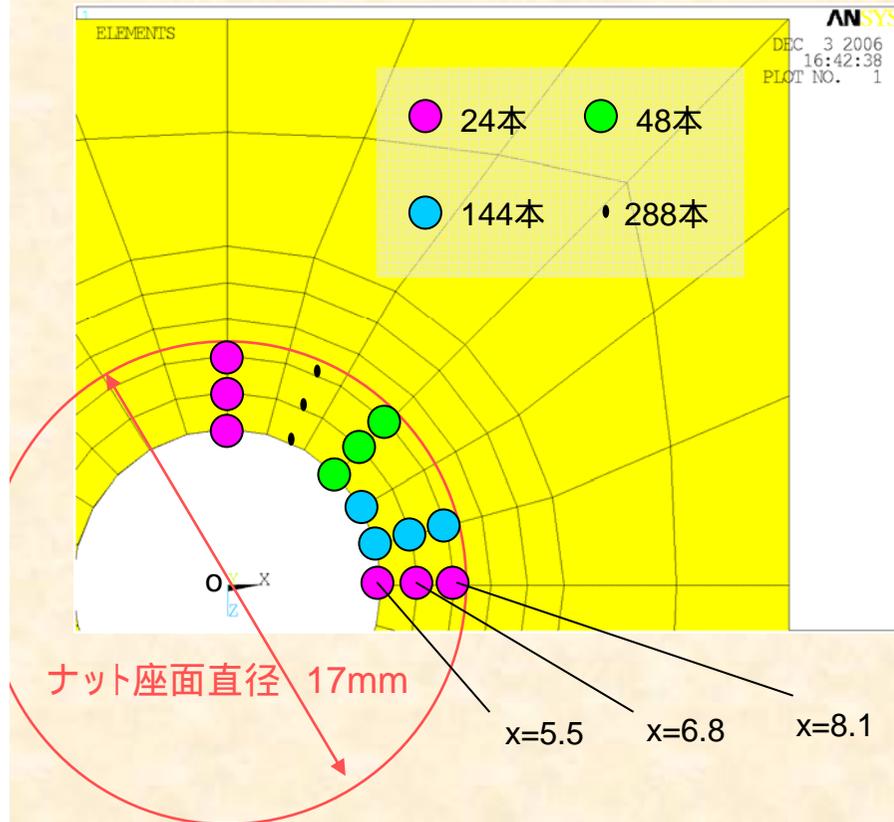
MPC184要素のオプション

- ・**剛体リンク要素** (プリテンション要素が収束せず使用不可能だった)
2節点のそれぞれ 3自由度
(x, y, z 方向の並進のみ)
をつなぐ
- ・**剛体ビーム要素** (これを使用)
2節点のそれぞれ 6自由度
(x, y, z 方向の並進と x, y, z 軸回りの回転)
をつなぐ
- ・**その他ジョイント要素**



RBEモデルの解析結果

軸端と接続する節点の選び方 (被締結物上面図)

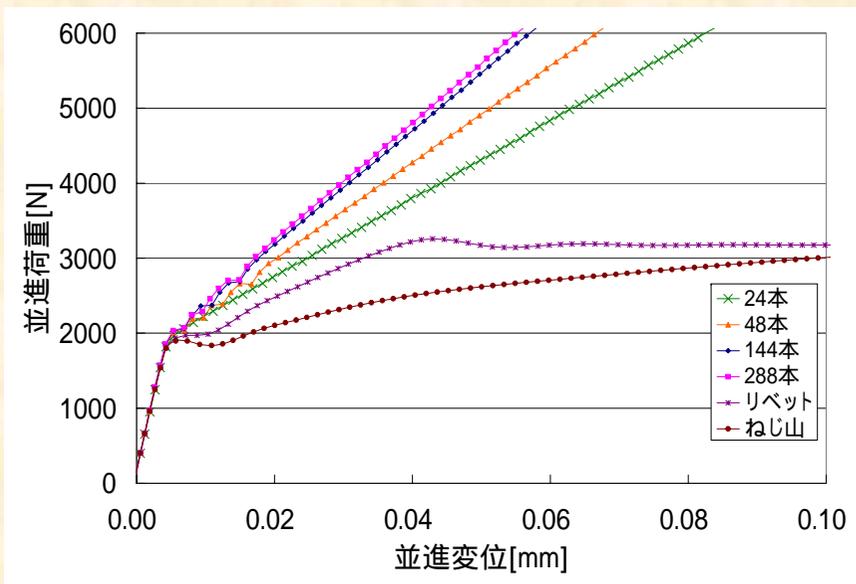


今回厳密には座面の境界に節点は置いていない

節点の選び方はメッシュの切り方に依存してしまう
汎用ソフトは座面に合わせてメッシュを切っているのか？

接続方法によっては被締結物の応力分布が変わってくる

剛体要素数と剛性の関係 (軸直径10mm, 軸長+0mm)



・剛体要素数が増えれば剛性は高くなるが
その値は収束してくる
(剛体要素数144本と288本ではほとんど
剛性が変わらない)

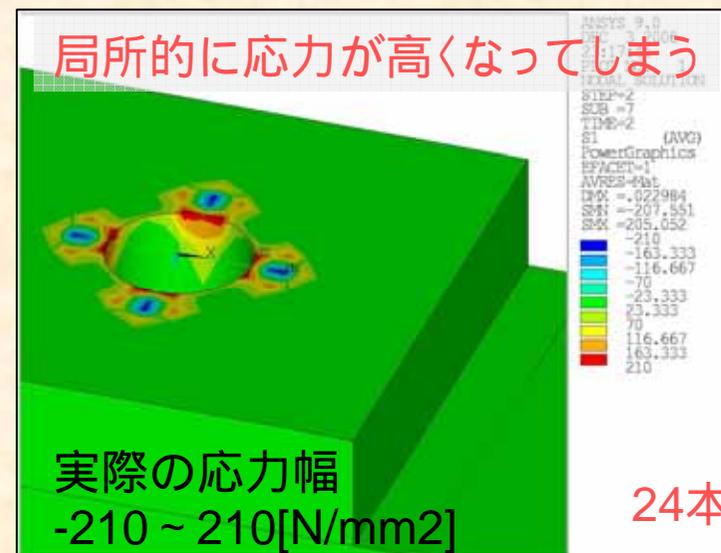
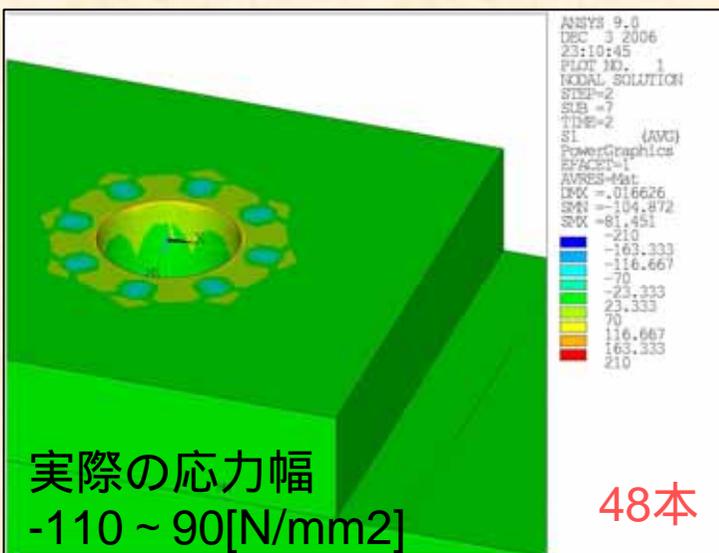
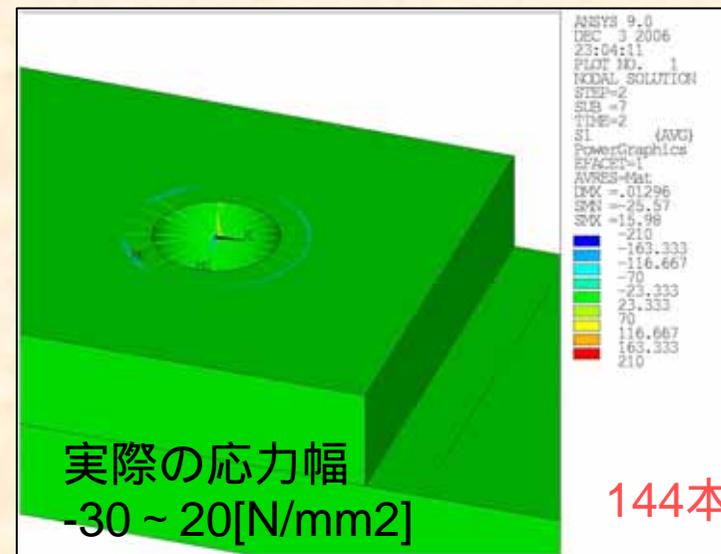
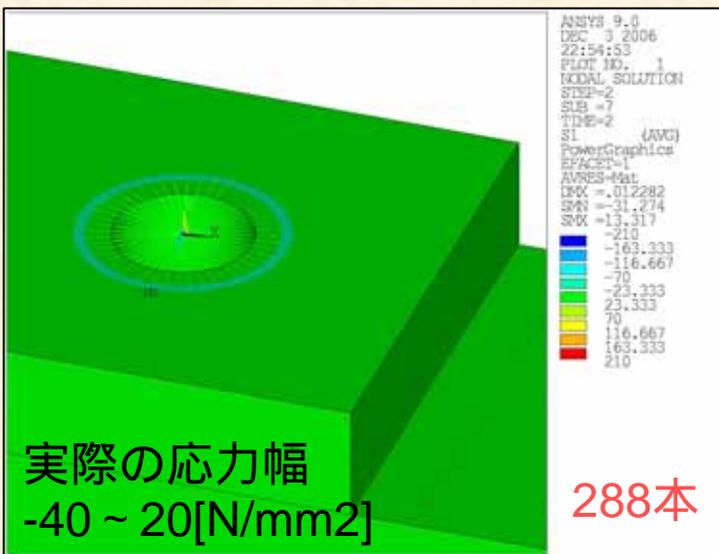
・最も少ない本数でもねじ山モデルよりかなり
剛性が高い



剛性合わせ込みのパラメータとするよりは
剛性が収束するように固定した方がよい

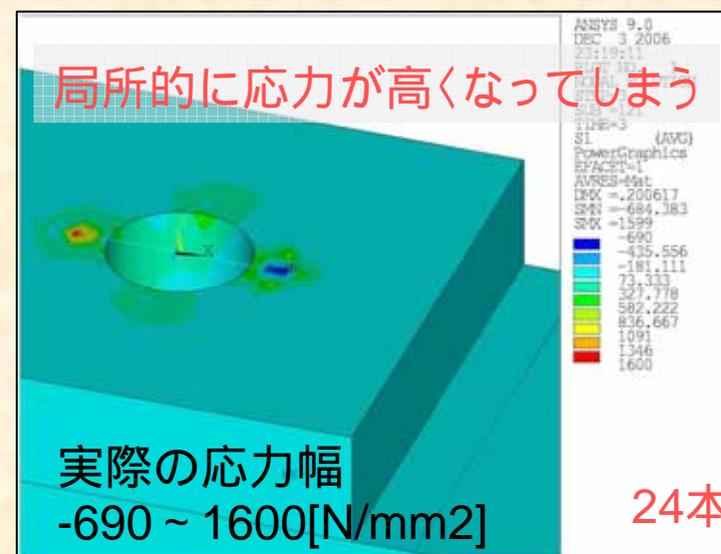
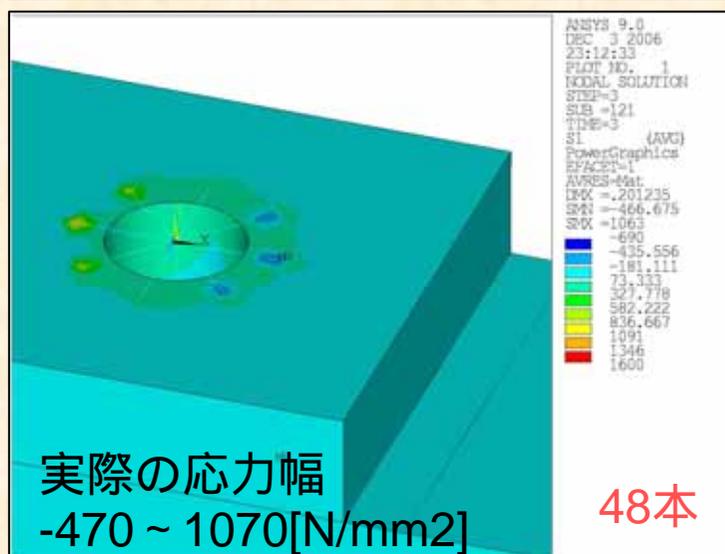
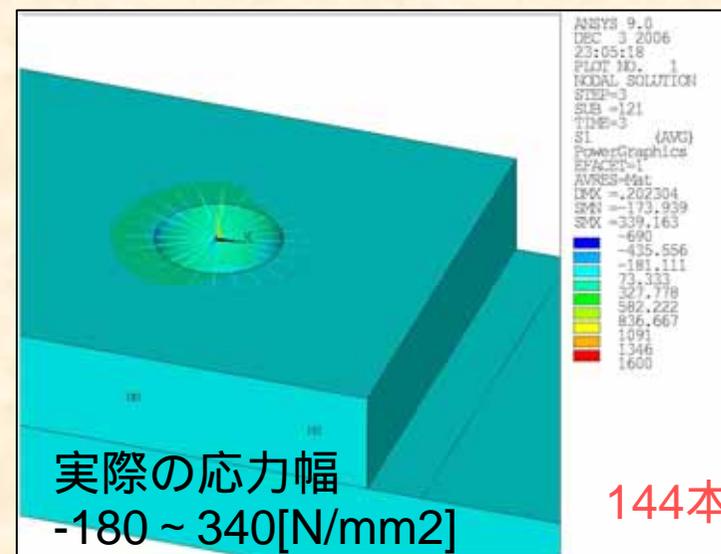
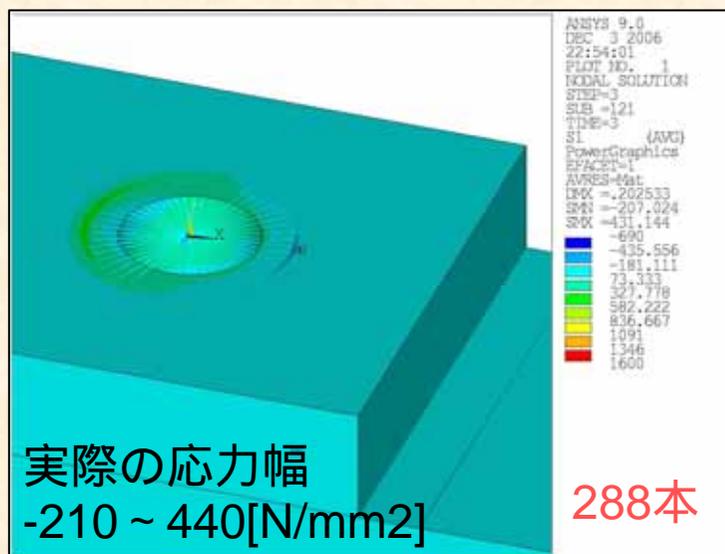
剛体要素の結び方による応力状態（加振前）

加振前の第1主応力（表示コンター幅統一 -210 ~ 210[N/mm²]



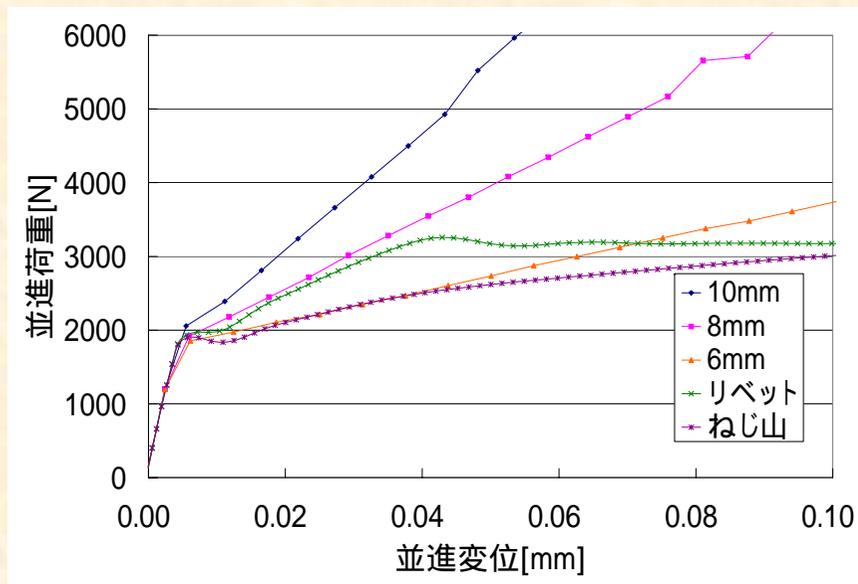
剛体要素の結び方による応力状態（加振後）

加振後（並進変位0.2mm）の第1主応力（表示コンター幅統一 -690 ~ 1600[N/mm²]

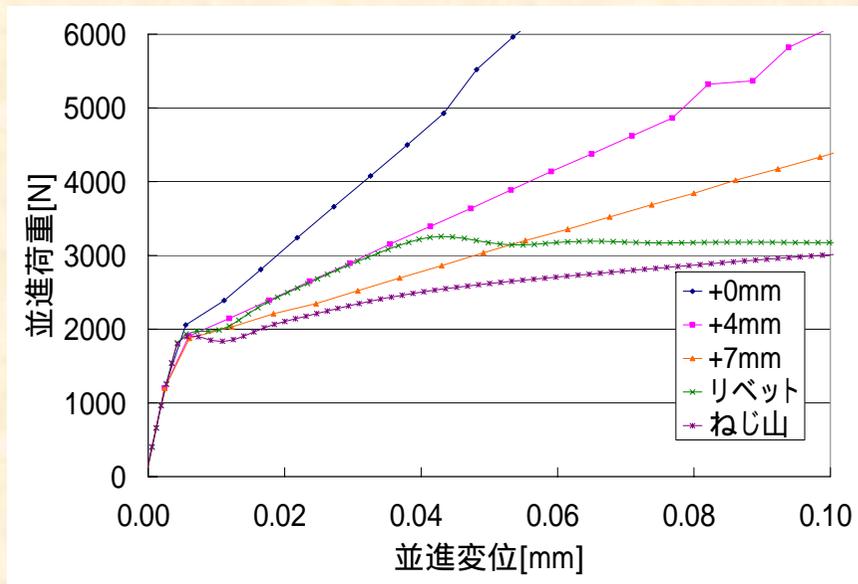


RBEモデルの解析結果

軸直径と剛性の関係 (剛体要素数288,軸長+0mm)



軸長と剛性の関係 (剛体要素数288,軸直径10mm)



- ・同じ軸直径 (10mm) で比較すると
リベットよりもさらに剛性が大きい
- ・軸直径が小さくなれば剛性が低下する

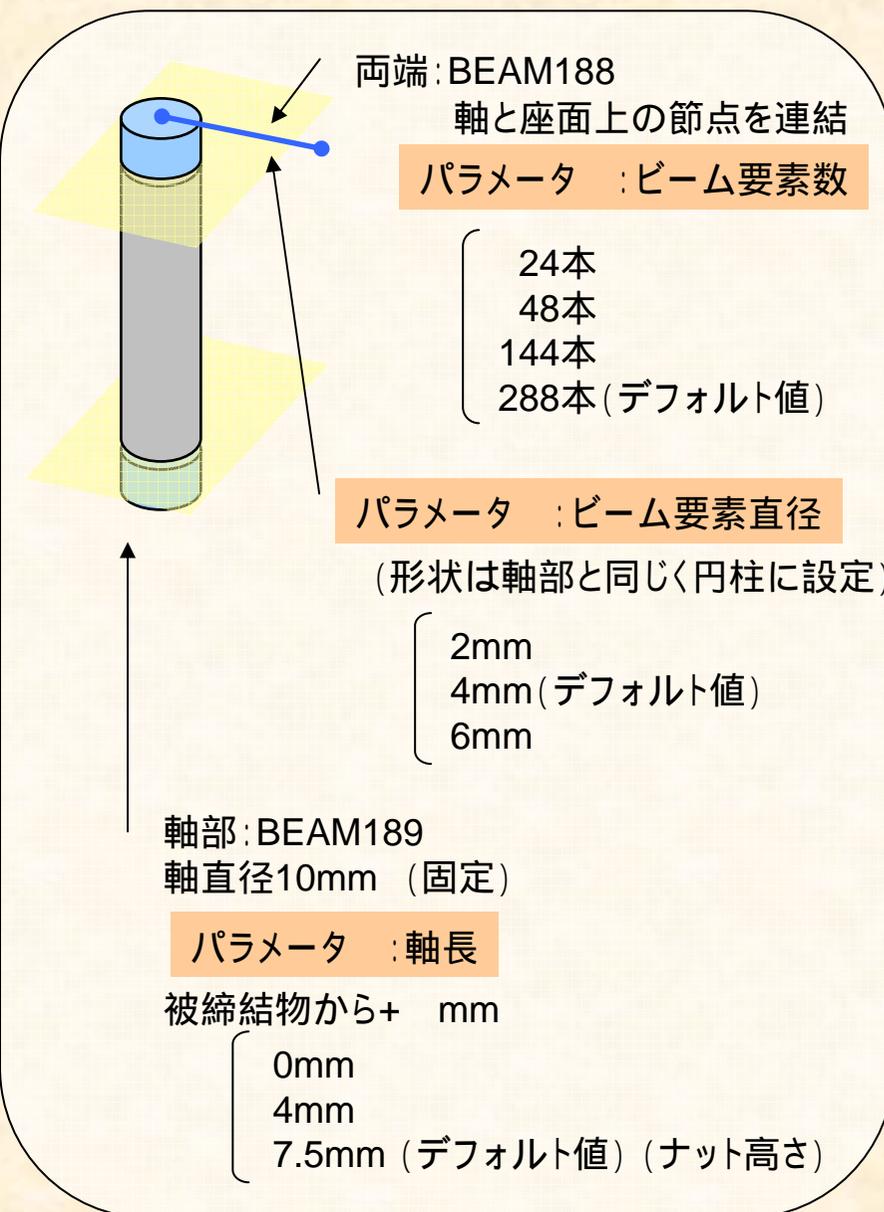
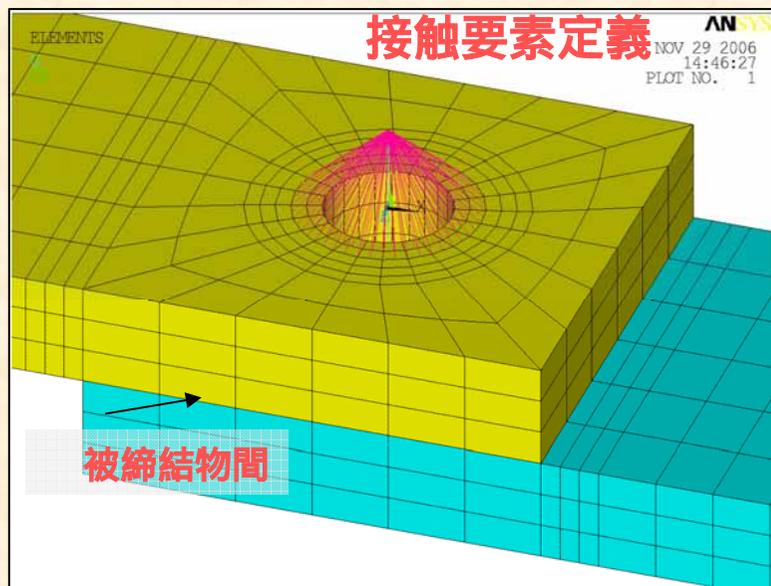
パラメータとして合わせ込みが可能だが
軸直径は決まった値があるので
固定した方が分かりやすいのではないかな？

- ・軸長が大きくなると剛性は低下する
- ・ボルト頭部高さまで軸を伸ばすと
ねじ山モデルの剛性にほぼ合わせ込むことが
できた

軸長をナット高さ (ボルト頭部高さ) までの範囲で
変更し剛性が合うようであれば
パラメータとして最も適しているのではないかな？

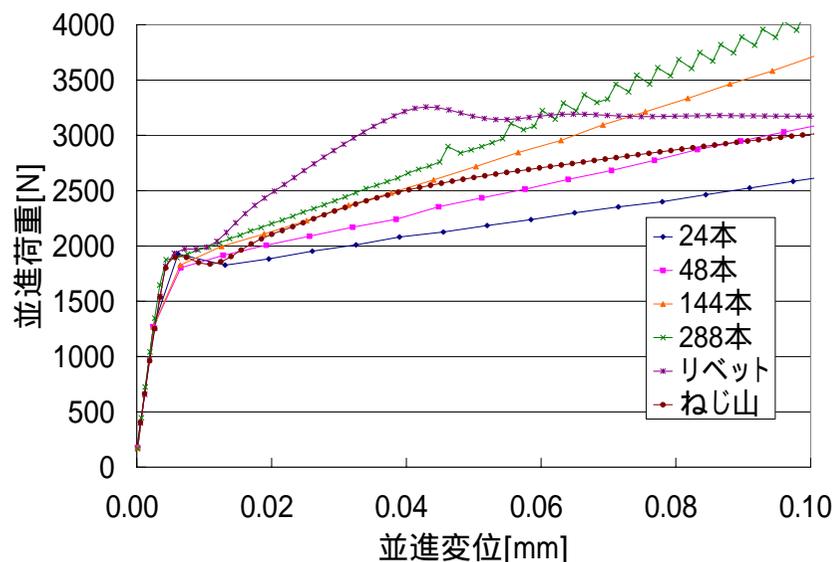
スパイダーボルトモデルの解析

スパイダーボルトモデル 節点数:10225 要素数:2501

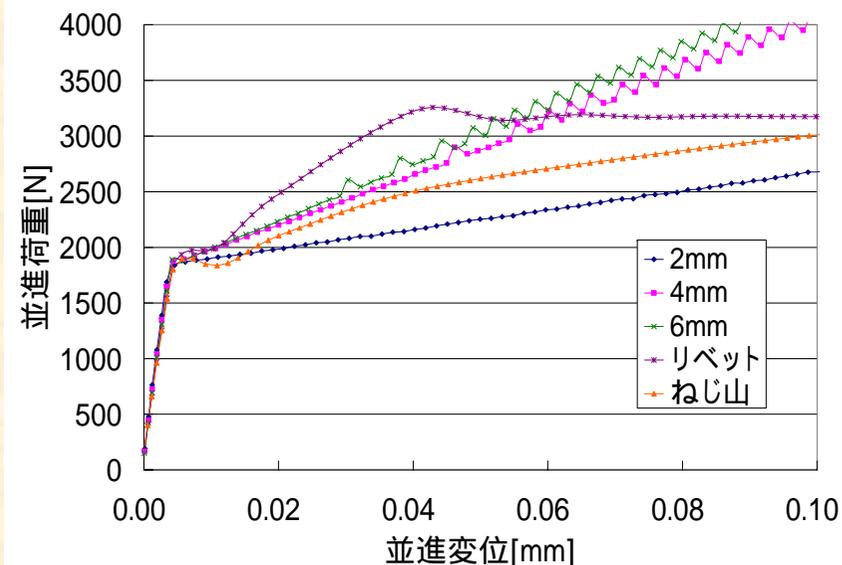


スパイダーボルトモデルの解析結果

ビーム要素数と剛性の関係
(ビーム要素直径4mm,軸長+7.5mm)



ビーム要素直径と剛性の関係
(ビーム要素数288,軸長+7.5mm)



・ビーム要素の本数を増やせば剛性は高くなるがRBEモデルと異なり値が収束してくるとは限らない
(ビーム要素単体の剛性に依存)

・ビーム要素の直径が増加すれば全体としての剛性も高くなるが収束してくる
(剛体要素を用いた場合に近づいてくる)

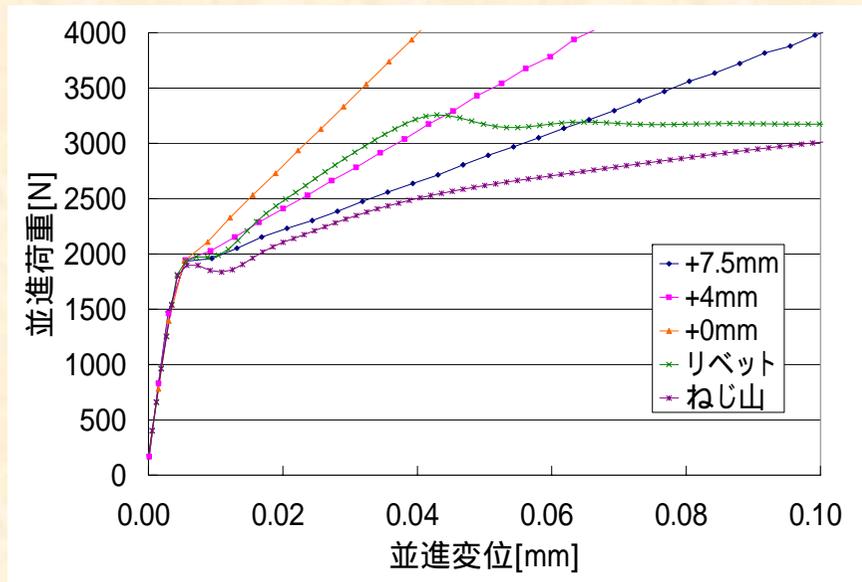
今回は剛性合わせ込みのパラメータとなり得たが応力分布などを考慮すると固定した方がよい
(例えば座面上の全節点と接続など)

もともとビーム要素の直径は決まった値という基準がないのでパラメータとしては最も適していると思われる

スパイダーボルトモデルの解析結果

軸長と剛性の関係

(ビーム要素数288,ビーム要素直径4mm)

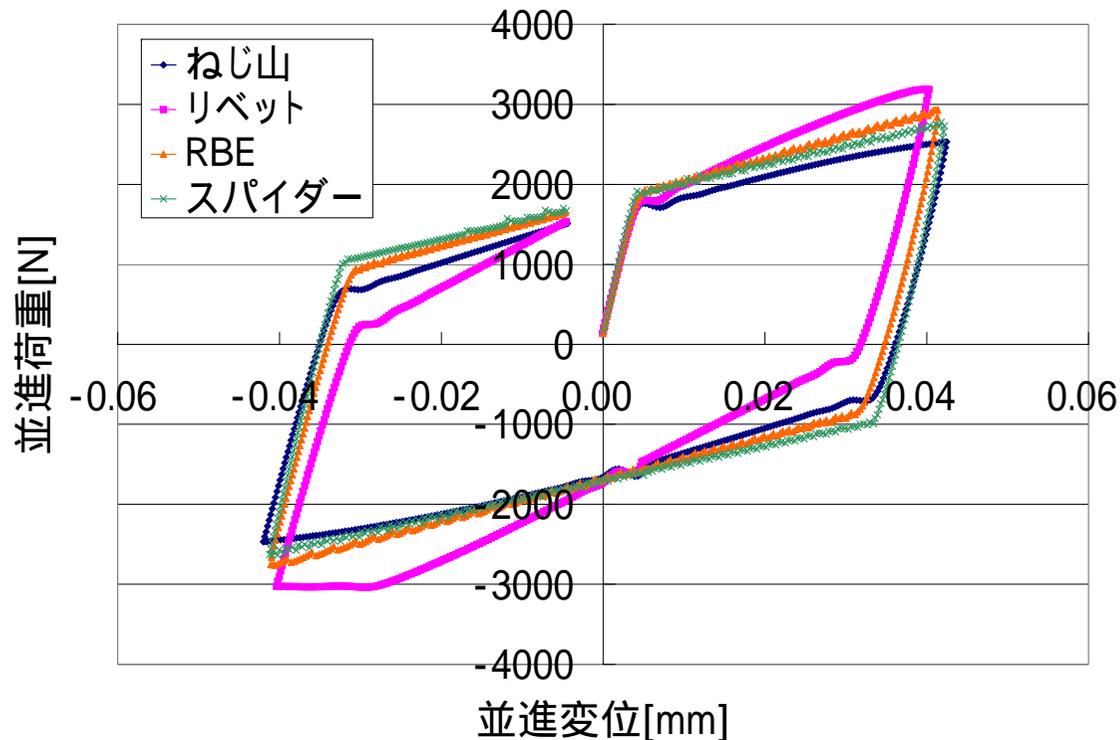


・RBEモデルと同様
軸を短くすれば剛性は高くなる

パラメータとして合わせ込みが可能だが
ナット高さなどの決まった寸法を基準とできるので
ビーム要素直径の方がパラメータとしては分かりやすい

接触要素を用いた場合の各モデル結果まとめ

ボルト弾性変形区間までの剛性合わせ込みの結果(加振サイクル1)



ねじ山モデル

- ・最も正解に近い
(ねじ面滑り・緩み挙動・限界滑り量)

リベットモデル

- ・ボルト・ナット寸法そのままでは剛性が大きく見積もられる
- ・限界滑り量は過小評価

RBEモデル

- ・ねじ山モデルの剛性を参考にボルト弾性変形区間までは合わせ込みが可能
- < パラメータ優先度 >
 - 軸長
 - 軸直径
 - 剛体要素数

スパイダーボルトモデル

- ・ねじ山モデルの剛性を参考にボルト弾性変形区間までは合わせ込みが可能
- < パラメータ優先度 >
 - ビーム要素直径
 - 軸長
 - ビーム要素数(又は軸直径)

計算負荷の比較表

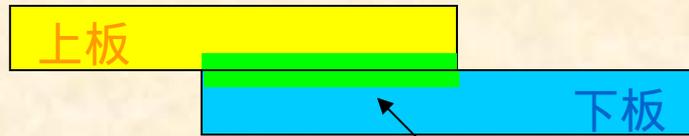
リベットモデルが最も計算負荷が軽い?

	節点数	要素数	接触定義数	計算時間
ねじ山	24015	7764	4	26640s (100%)
リベット	13203	3233	3	12328s (46%)
RBE	10225	2501	1	19573s (73%)
スパイダー	10225	2501	1	13888s (52%)

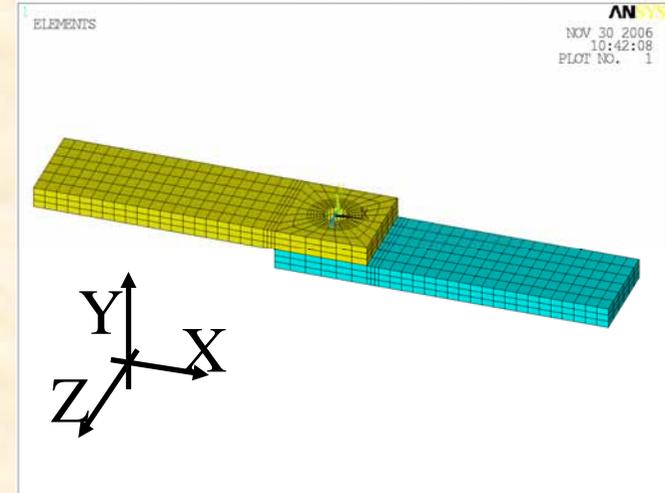
接触要素を用いない解析 (RBE・スパイダー)

被締結物間に接触要素を用いず代わりに非線形ばね要素により並進荷重を発生させる

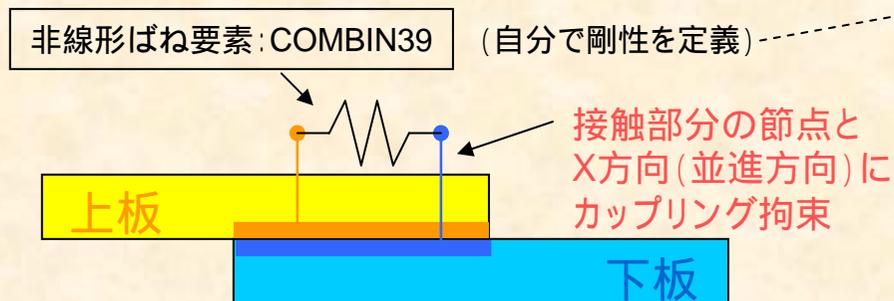
条件の変更 被締結物間が離れないものと仮定



両板の接触位置にある節点変位を Y方向(軸方向)にカップリング拘束

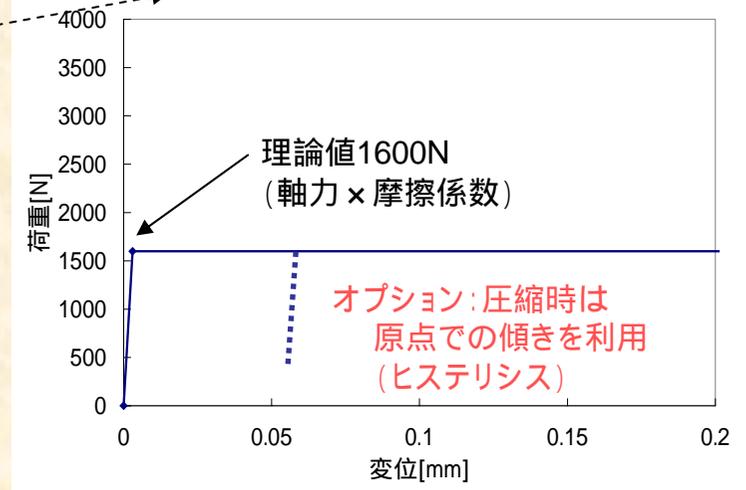


条件の変更 被締結物間の摩擦力に相当する抵抗を作成



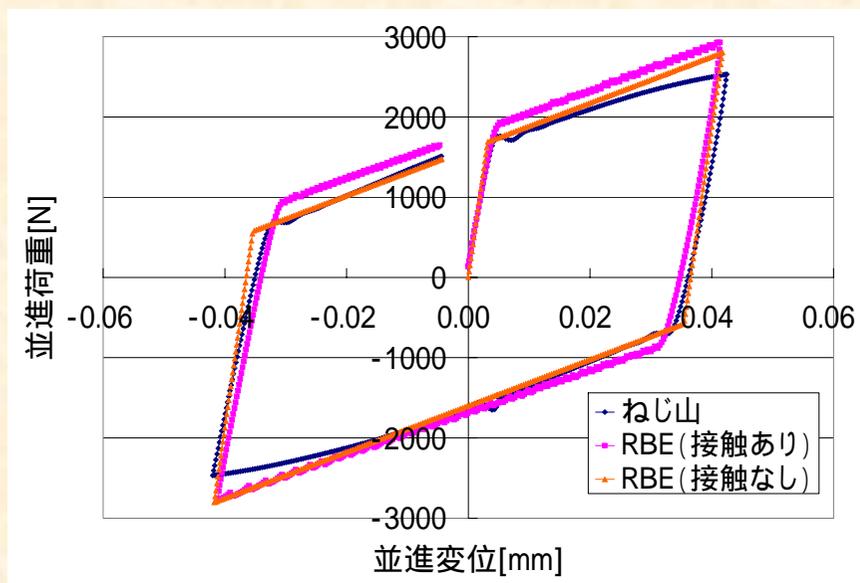
ばね要素は定義していないが 被締結物間の接触部節点はZ方向にもカップリング拘束してある

非線形ばね要素の剛性定義

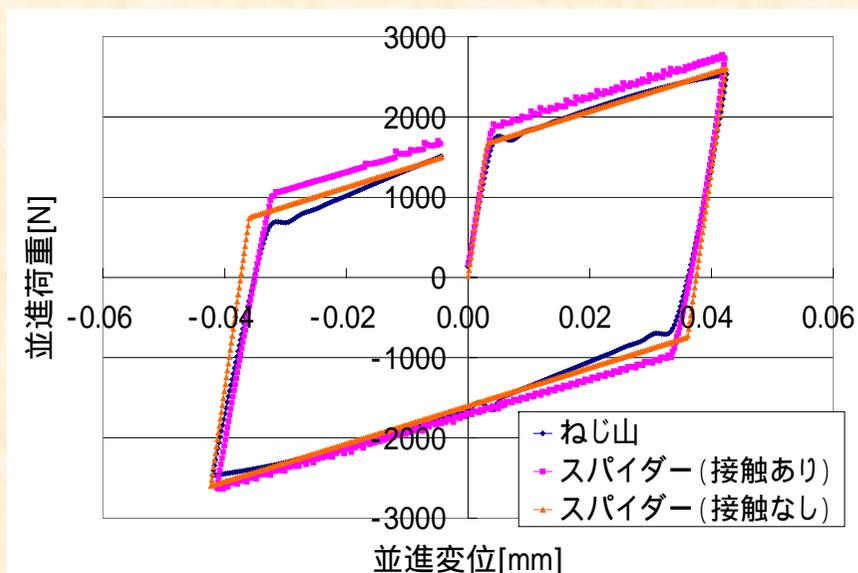


接触要素を用いない場合を含めた結果まとめ

RBEモデルの解析結果



スパイダーボルトモデルの解析結果



計算負荷の比較表(接触要素なしを追加)

	節点数	要素数	接触定義数	計算時間
ねじ山	24015	7764	4	26640s (100%)
リベット	13203	3233	3	12328s (46%)
RBE (接触あり)	10225	2501	1	19573s (73%)
RBE (接触なし)	10515	2130	0	10518s (40%)
スパイダー (接触あり)	10225	2501	1	13888s (52%)
スパイダー (接触なし)	10227	2130	0	4917s (19%)

・非線形ばね要素によって接触要素と同様の剛性が再現できている

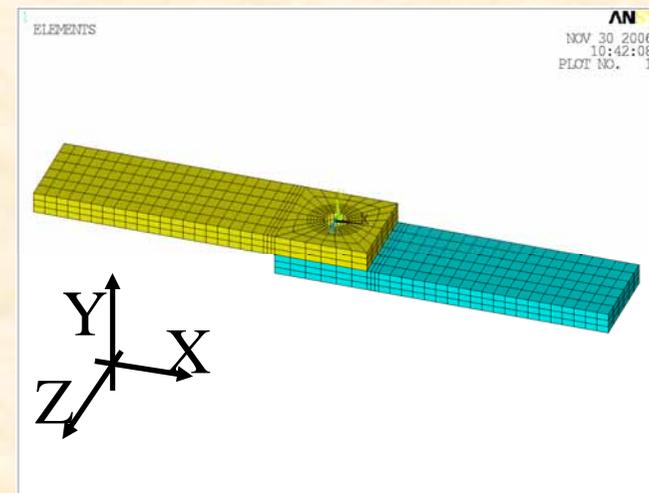
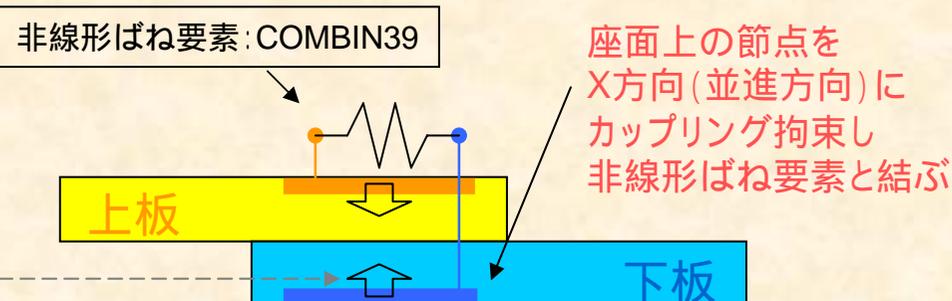
・接触要素を用いないことで計算負荷が大幅に軽減

・スパイダーボルトモデルの方がRBEモデルよりも計算負荷が軽い

多数のボルトをボルト弾性変形区間まで解析する場合は最も推奨(ねじ山モデルと剛性の合わせ込み必要)

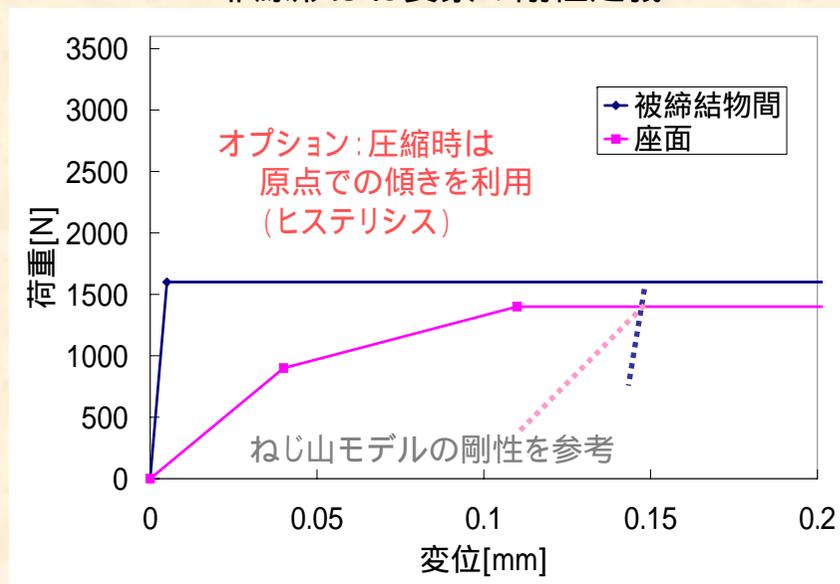
接触要素を用いない解析（ボルトなし）

条件の変更 座面の摩擦力に相当する抵抗を作成



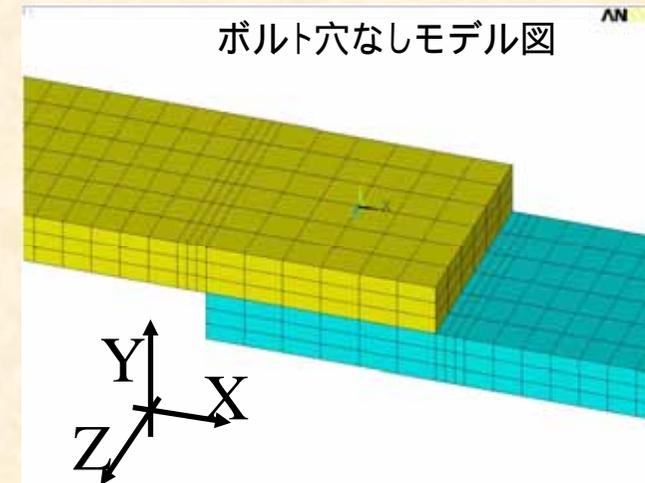
- ・ボルト穴はあるがボルトを一切モデリングしていない
- ・被締結物間の取り扱いは前々ページの条件の変更 及び を参照 (Y方向カップリング拘束・非線形ばね要素の利用)
- ・座面上の節点をY方向(軸方向)にもカップリング拘束し 代表節点に軸力相当の荷重を適用している (少しでも応力条件を近づける意図)
- ・座面上の節点はZ方向にもカップリング拘束してある

非線形ばね要素の剛性定義



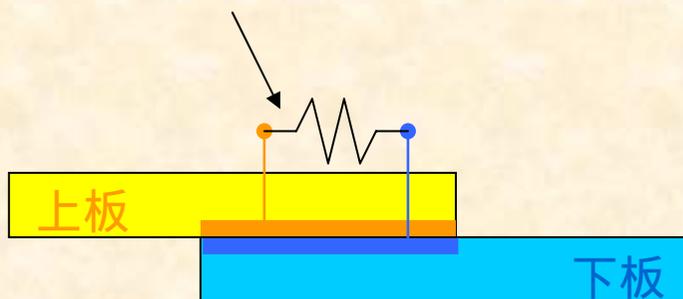
接触要素を用いない解析（ボルト穴なし）

- ・ボルト穴を一切モデリングしない
- ・軸力に相当する荷重は一切かかっていない
(並進方向の剛性のみを評価する場合に限られるモデル)

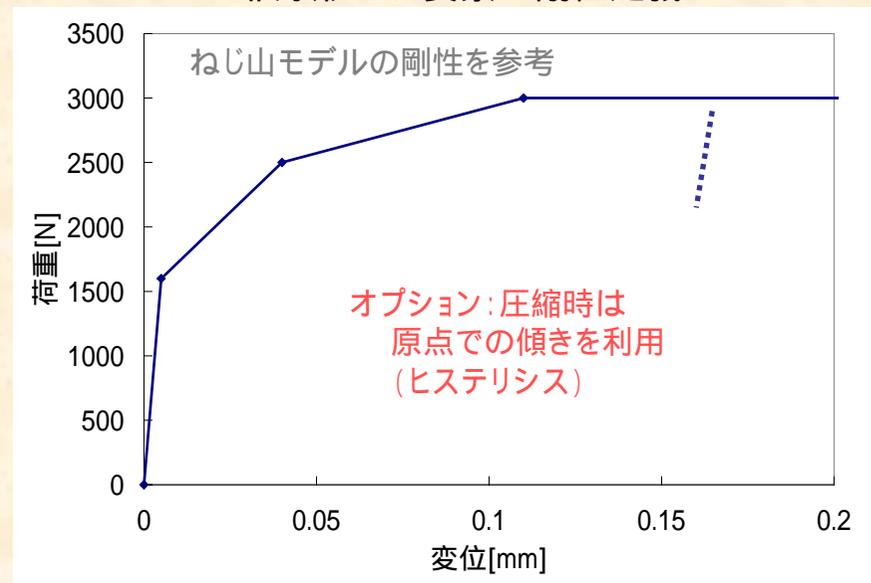


- ・被締結物間の取り扱いは
条件の変更 及び を参照
(Y方向カップリング拘束・非線形ばね要素の利用)

ただし今回は被締結部間の摩擦力だけでなく
ボルトによる剛性も同一のばね要素に定義をした

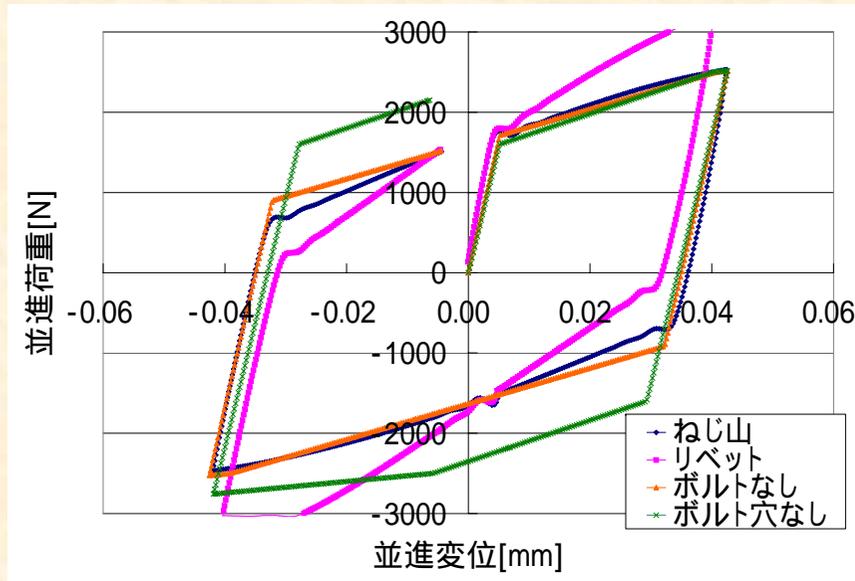


非線形ばね要素の剛性定義

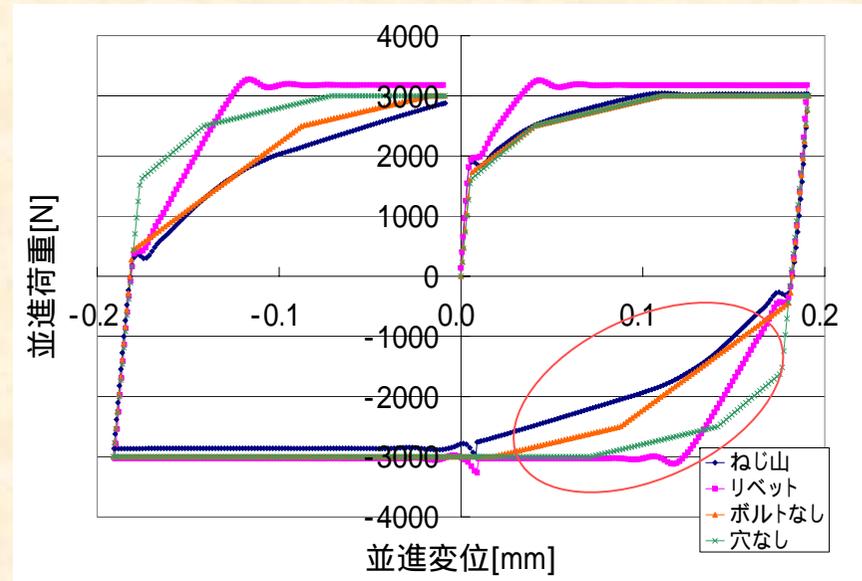


ボルトなし・穴なしモデルの解析結果

ボルト弾性変形区間までの剛性合わせ込み



座面滑りも含めた剛性合わせ込み



- ・ボルトなしモデルではほぼ剛性を再現できた
(ただし座面滑りまで合わせこむと加振の折り返し後にややずれが発生する)
- ・ボルト穴なしモデルは加振の折り返し後に剛性が大きくずれた



非線形ばね要素のオプションによるヒステリシスの定義について検討する必要あり

穴なしでは実際の現象と違いが大きいため剛性を合わせ込めないのか？

結言

ボルト弾性変形区間までの加振における各モデルの有効性評価

	節点数	要素数	接触定義数	計算時間	計算負荷	剛性評価
ねじ山	24015	7764	4	26640s (100%)	×	
リベット	13203	3233	3	12328s (46%)		
RBE (接触あり)	10225	2501	1	19573s (73%)		
RBE (接触なし)	10515	2130	0	10518s (40%)		
スパイダー (接触あり)	10225	2501	1	13888s (52%)		
スパイダー (接触なし)	10227	2130	0	4917s (19%)		
ボルトなし	10218	1838	0	4590s (18%)		
ボルト穴なし	6006	1045	0	2544s (10%)		×

座面滑りまでの加振における各モデルの有効性評価

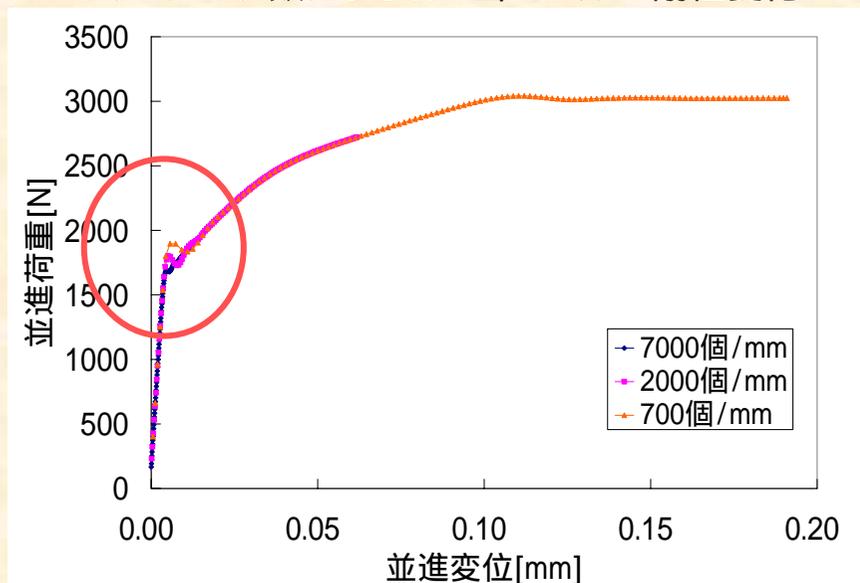
	節点数	要素数	接触定義数	計算時間	計算負荷	剛性評価
ねじ山	24015	7764	4	28088s (100%)	×	
リベット	13203	3233	3	11794s (42%)		
ボルトなし	10218	1838	0	4597s (17%)		
ボルト穴なし	6006	1045	0	2433s (9%)		×

- ・剛性の合わせ込みのために必ずねじ山モデルによる解析が必要 (1本の詳細解析 多数の簡易解析)
- ・ばね要素を用いた場合は多方向の並進に対する考慮が必要 (今回は1自由度のみだった)
- ・並進方向の剛性のみではなく曲げ剛性など様々な荷重に対しての適性を各モデルについて確認することが必要

補足

サブステップ数の不足によるグラフの精度不足

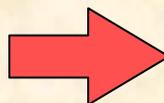
サブステップ数によるねじ山モデルの剛性変化



接触解析において
サブステップを非常に細かくとらなかった場合
おそらく計算手法上の問題(詳細は未調査)により
滑り開始時(又は荷重ステップの開始時)において
並進荷重が実際より大きく出ている可能性がある

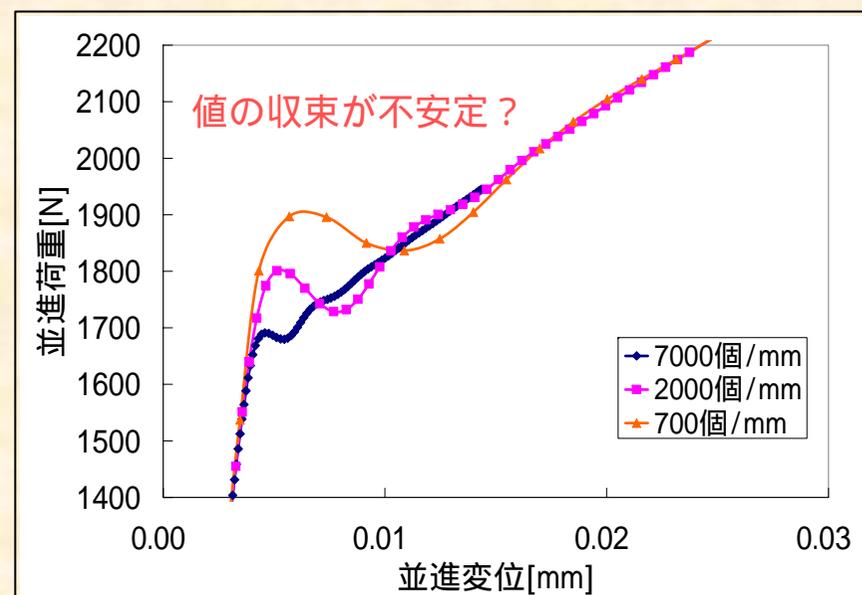
(ただし、ナットの緩み角や軸力に関しては
サブステップの細かさによる変化は見られなかった)

サブステップ数を細かくとるほど
被締結物間の滑り開始時における並進荷重が
理論値(1600N)に近づいた

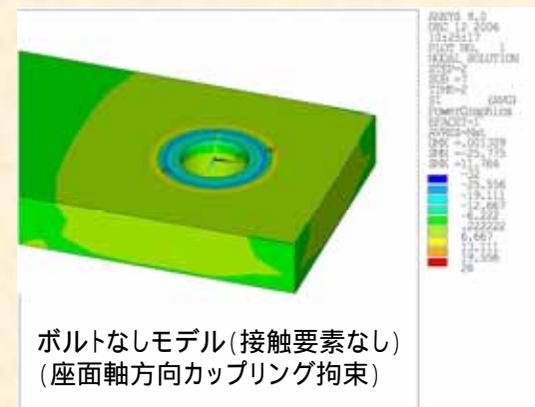
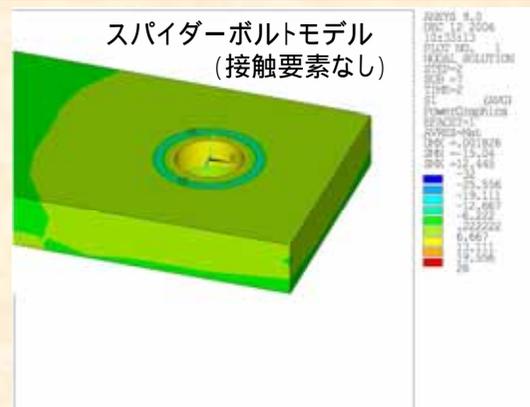
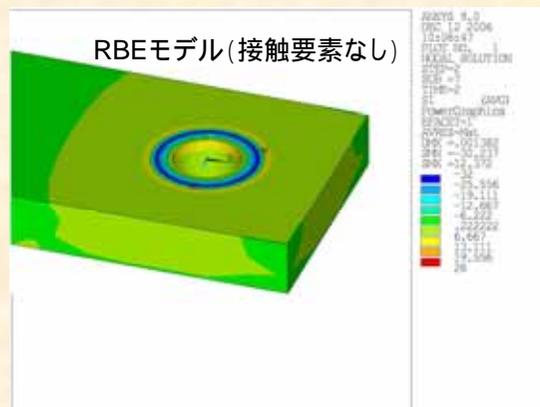
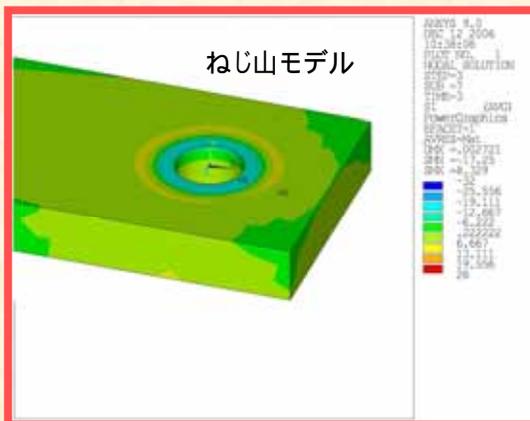
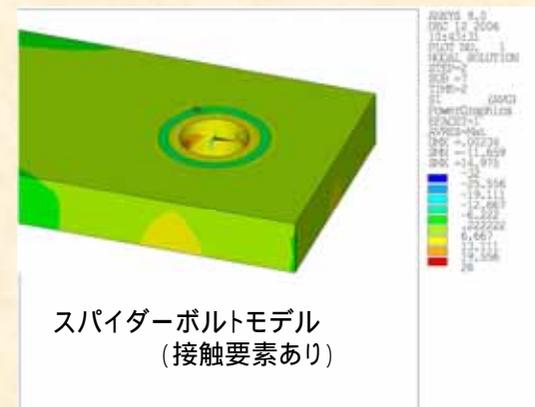
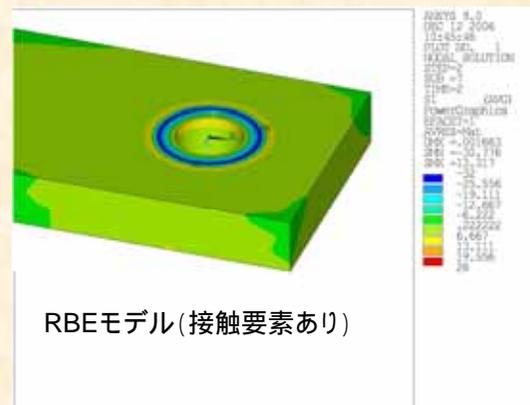
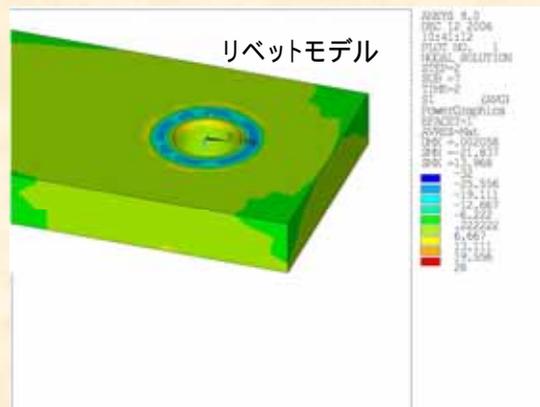


リベットの結果についても同様

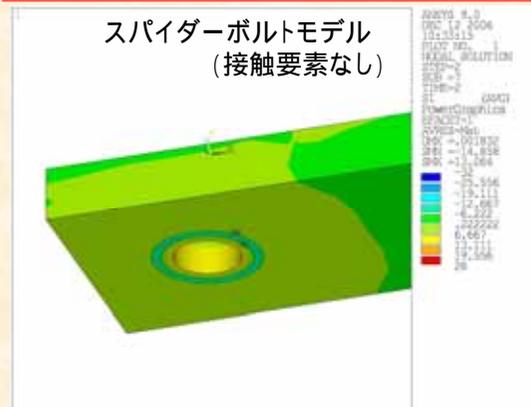
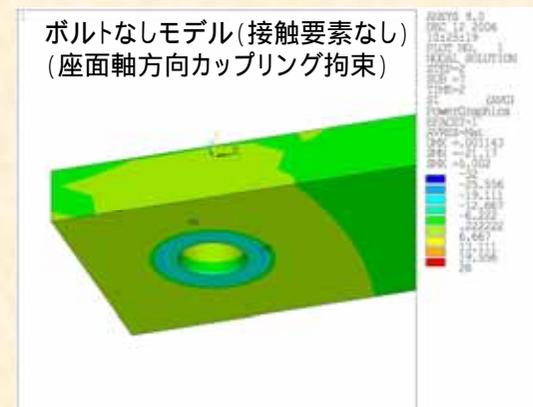
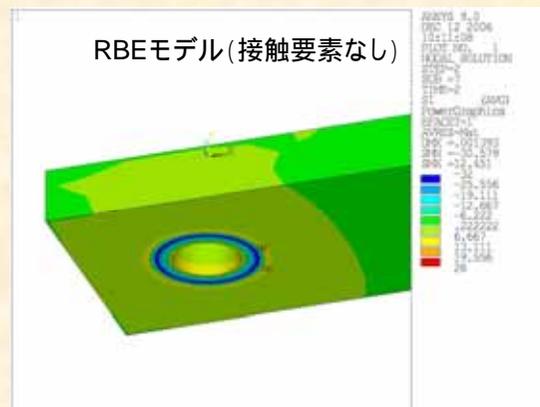
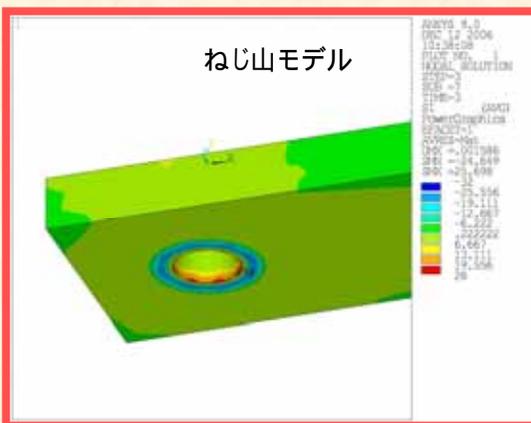
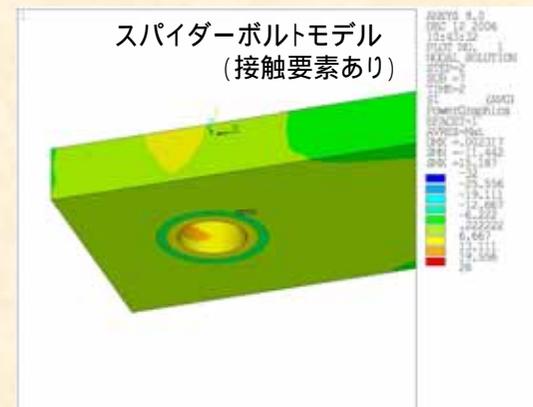
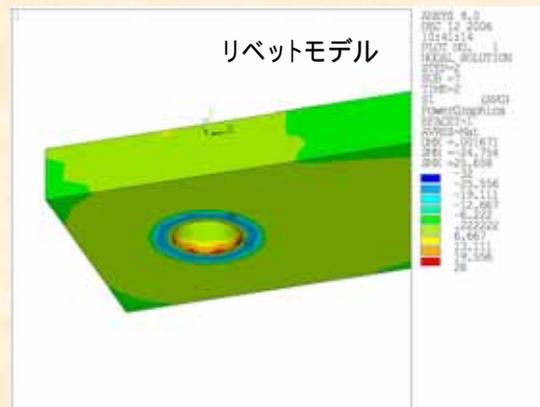
左グラフを局所的に拡大



各モデルの応力状態比較（加振前・ナット座面）

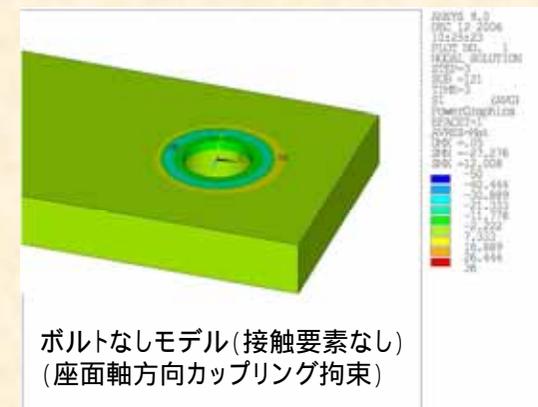
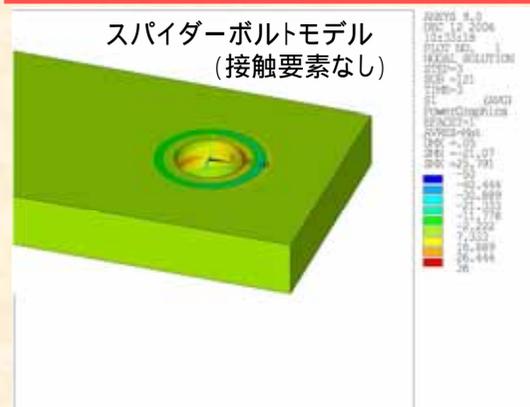
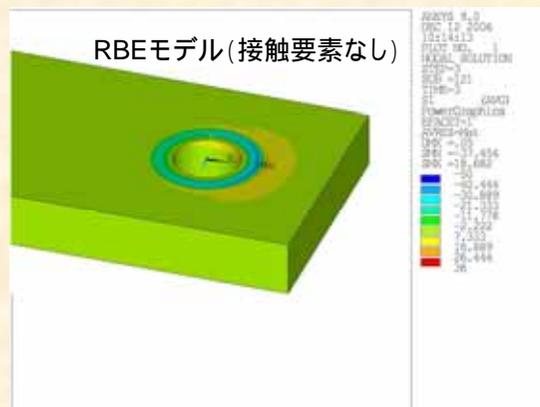
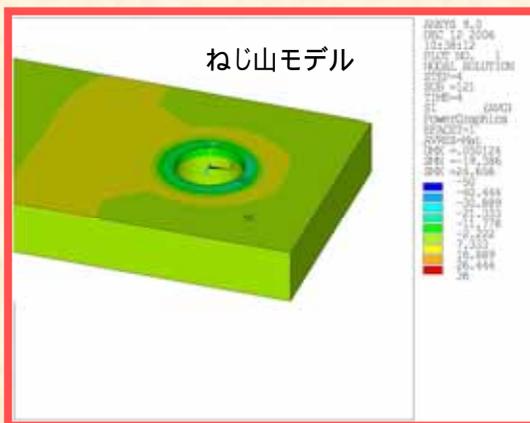
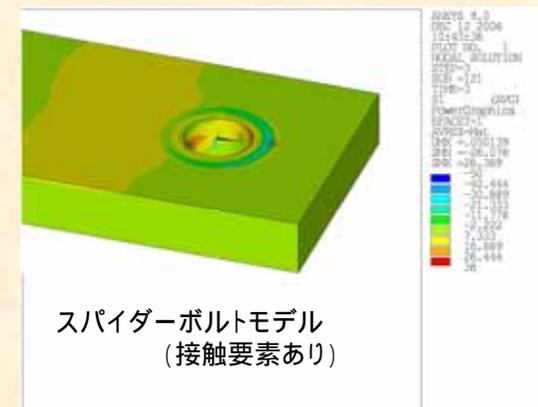
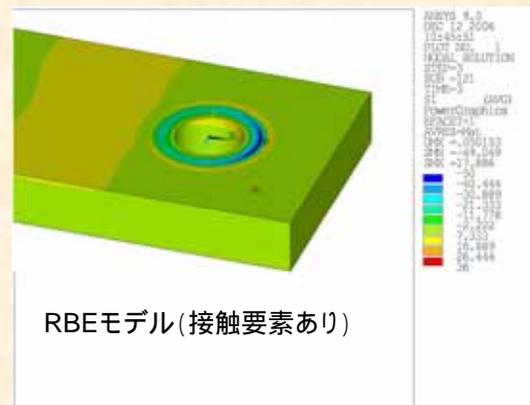
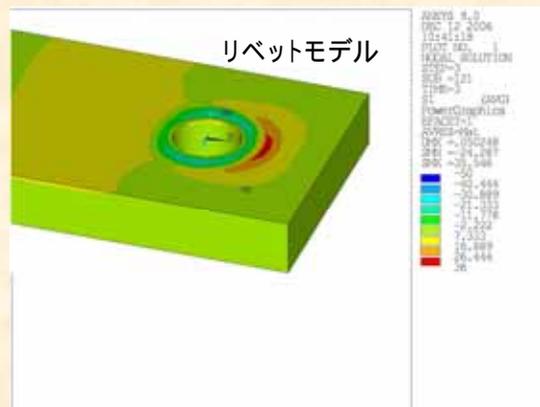


各モデルの応力状態比較（加振前・ボルト頭座面）



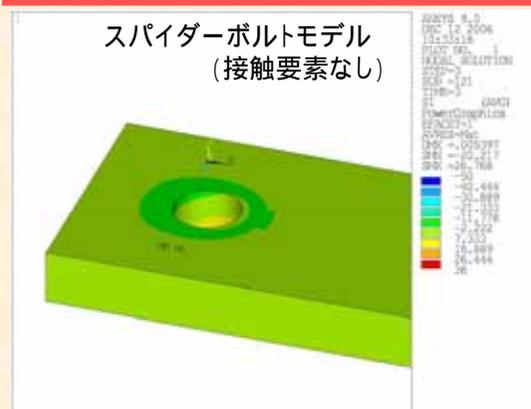
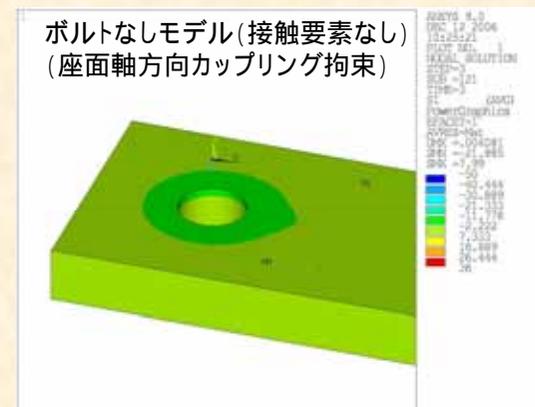
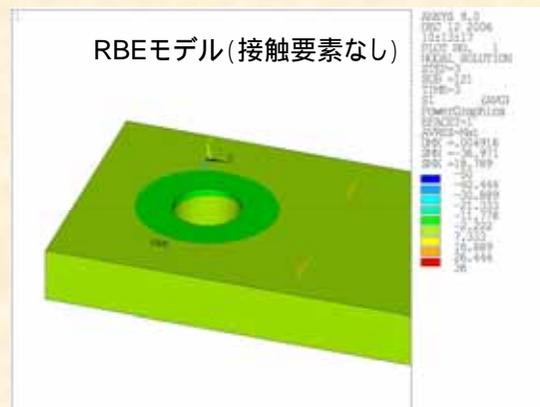
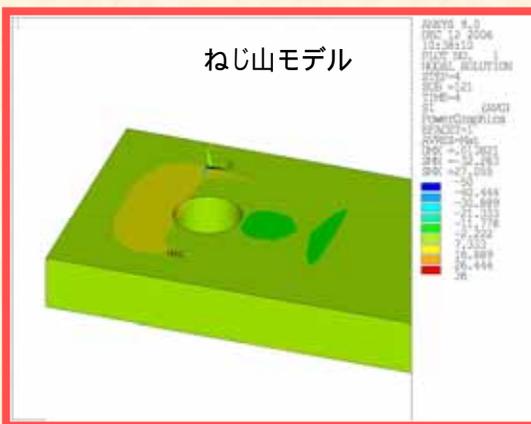
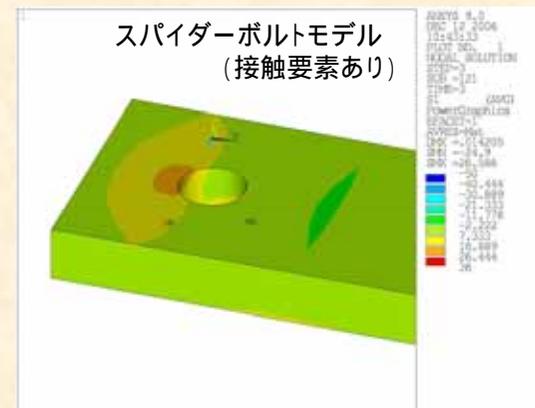
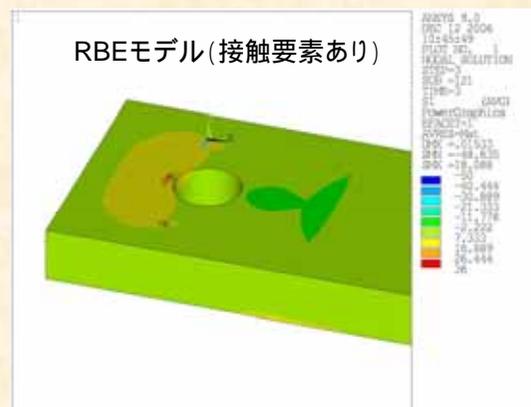
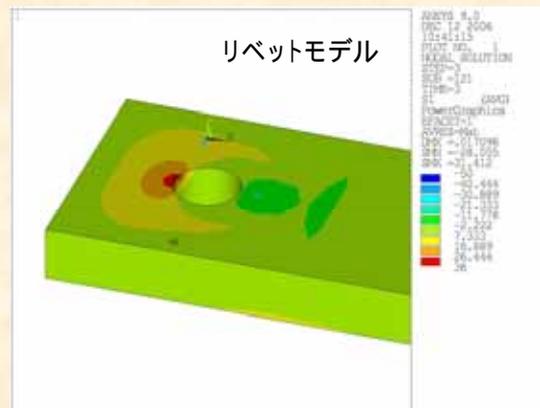
各モデルの応力状態比較（加振後・ナット座面）

並進変位0.05mm
ボルト弾性変形区間



各モデルの応力状態比較（加振後・被締結物間）

並進変位0.05mm
ボルト弾性変形区間



各モデルの応力状態比較（加振後・ボルト頭座面）

並進変位0.05mm
ボルト弾性変形区間

