2012年6月13日

#### 「シミュレーションの品質・信頼性にかかわる 調査・研究」研究分科会

## ボルト締結体の有限要素法解析の 産学共同研究の事例及びCAE 設計の 実務教育に関する活動の紹介

### 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 泉 聡志

東京大学工学系研究科機械工学専攻 酒井・泉研究室 (強度・信頼性研究室) <u>産業界の強度・信頼性問題の産学連携</u>

- マルチスケールモデリングの産業界への展開
  - <u>Si/SiC半導体素子、鉄鋼材料(有限要素法、転位動力学、分子動力学)</u>
  - ・ <u>接触・摩擦・漏洩のマルチスケールモデリング</u>
  - ・ 分子動力学ポテンシャル開発ソフトウェア
- 有限要素法解析の高度利用(主に、ボルト締結問題)
- ・ クリープボイドのEBSDによる三次元観察
- ・ リスクベースメンテナンス、信頼性工学、余寿命診断(酒井信介先生)
- 構造体・座屈に関する研究(田中展助教)
- その他、産学連携テーマ多数

## 本日の発表内容

- 1. ボルト締結体の研究紹介
  - ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法によるゆるみ解析
  - 産学連携の事例紹介
  - 計算の品質確保のための考え方
- 2. CAE 設計の実務教育に関する活動の紹介

ボルト・ナット締結体はゆるむ!



ねじ締結体は様々な分野で用いられているが、メンテナンスの容易さの反面、ゆるみの問題を抱えている。



ゆるみ防止のために様々なゆるみ止め部品 が使用されている。



ゆるみ止め性能についての評価はあまり行われていない。

### ボルト締結体の研究



### ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法 によるゆるみ解析

### 1. 完全座面すべりによるゆるみの解析

泉 聡志,横山 喬、岩崎篤、酒井 信介、"ボルト締結体の締付けお よびゆるみ機構の三次元有限要素法解析"日本機械学会論文集A編 71-702 (2005) pp.204-212.

3/48

(完全)座面すべり



ナット座面に完全なすべりを生じたときに 大きくゆるむ

ボルト・ナット締結体のゆるみ解析

山本ら\*による被締結物に軸直角方向外力が作用するゆるみ試験をモデル化



節点数:22406 要素数:9362 ヤング率205GPa,ポアソン比0.3,摩擦係数0.17

ボルトゆるみ回転の様子

#### 並進方向変位コンター図(変位は5倍に拡大)



周期が進むにつれて、ボルト頭の手前と奥とで並進変位に差が生じる.

17/48

## 可動板に作用する並進力と並進変位の関係



### 山本らの実験との比較





実験結果との比較



山本らによる実験※と一致

※山本晃ら 精密機械, 43(4), 470(1977)

### ボルト・ナット締結体の三次元有限要素法 によるゆるみ解析

### 2. 微小座面すべりによるゆるみの解析

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.





完全座面すべり発生以前の外力の繰り返しでもゆるみ がわずかづつ進行するのが確認されている。

微小座面すべり 📥 軸力低下 📩 完全座面すべり

解析モデルと手法

#### 賀勢らの実験をモデル化



実験結果(ナット回転角)との比較



締付時のねじれによるボルトーナットの同時回転

300N, 500Nにおけるナット回転について







ボルト軸に時計回りの ねじれ発生



ボルト軸ねじれが解消する際、 ボルト - ナットねじ山が接触した まま一体となった状態での回転

ボルトーナットねじ山での相対的な回 転ではないため軸力の低下はない。



'48



### ゆるみ止め部品の性能評価

	座金	フランジ	ダブル ナット	ばね座 金	ナイロン ナット	<u>細目</u>	<u>ピッチ数</u> 増加	<u>皿ばね</u> 座金	<u>塑性締め</u>
座面すべりに対 する効果	×	Δ	0	Δ	Δ	0	Δ	Δ	0
微小座面すべ りに対する効果	×	0	Ø	Δ	0	0	0	Δ	0
備考		等価摩 擦直径 が少し大 きい	軸力低 下にす べりが全く い)	負果易用きい干力はの、にすで。の補ある。 にする うしょう いうしん しんしょう しんしん しんしょう しんしん しんしん しんしん しんしん	高温にな ると効果 なし	ゆるみの 速度が遅 くなる効果。 進行を止 めることは できない。	ピッチ数 増加によ る剛性増 加の効果	軸償果が力ゆ転進補効るねり回	軸力のバ ラつき低 減、ゆる からデメ リットなし。

### http://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/~izumi/Bolt/ 参照

32/48



# 産学連携事例のご紹介 (2004~2011)

- ・ブレーキディスクの締結 ~JR東日本
- 油圧シリンダーの締結 ~建機メーカー
- 浴室暖房機の締結 ~東京ガス
- ・ねじ式テンショナー ~日本発条
- ・ボルトのモデリング手法の検討 ~JSME WG
- ・アルミ被締結体 ~スズキ
- 油圧ショベルのスイングサークル ~コマツ

http://www.fml.t.u-tokyo.ac.jp/~izumi/Bolt/ 参照

油圧シリンダ締結(軸方向ゆるみ) 油圧シリンダ内 ピストン締結用ナット→ピストンナット ロッド ピストンナット 軸方向外力による ピストンナットの ゆるみ挙動解析 ロッドカバー ピストン ・泉聡志.武太地、木村成竹,酒井信介、"三次元有限要素法による軸

方向外力作用下でのボルト・ナット締結体のゆるみ挙動解析"日本機械 学会論文集A編、73-732 (2007) pp. 869-876.









## ボルト軸のねじれによる相対回転発生





ボルトのモデリング手法

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

ボルトのモデリング手法

#### 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

く接触定義箇所>

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

計算コストを抑えて どこまで再現できるか? く接触定義箇所>

なし



リベットモデル解析結果

➡リベットモデル

◆ねじ山モデル



ねじ面滑り区間

刪 2000

<u>料</u>1000

1500

進





・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

## 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

剛性・ゆるみを再現する解析的モデルの構築

FEMによる接触面挙動(接触力、すべり変位)の分析に基づいて、ボルト締結体の挙動を定 式化し、荷重変位関係を導出する。



・ねじ面の接触状態と、ボルト座面とねじ面 に剛性比に基づき、外力とモーメントの関 係の定式化

・接触面を周方向に分割し、外力とモーメントの作用による接触力分布と、接触力とす べり変位の関係の定式化

横山喬,泉聡志,酒井信介,日本機械学会論文集A編,76-763(2010),pp.351-360.



## 産学連携事例のご紹介

- ・ブレーキディスクの締結 ~JR東日本
- 油圧シリンダーの締結 ~建機メーカー
- 浴室暖房機の締結 ~東京ガス
- ねじ式テンショナー ~日本発条
- ・ボルトのモデリング手法の検討 ~JSME WG
- ・アルミ被締結体 ~スズキ
- 油圧ショベルのスイングサークル ~コマツ



## 計算の品質確保のための考え方

- 1) 十分な事前検討(教員一企業)
- ② 事前検証・解析作業・計算結 果の検証(教員一学生)
- ③計算結果の妥当性確認(教員一学生一企業)
- ④報告書作成(学生)





CAEのV&VのVモデル

## 有限要素法解析において 最も大事なこと

1. 実験(主に企業が担当)との連携

- 必ず、現物を見に行くこと(どのような試験が行われ、どのように計測されているかを見る)
   専門家・現場技術者との連携
- 2. 力学(理論)計算
  - 解析をする前に結果を予想できるか? - 解析をした後に結果を説明できるか?
- 3. ソフトベンダーとの連携

## 機械系学科の材料力学系教育

- 二年冬 140人
  - 材料力学B第一
  - 演習: SolidEdge Simulationによる設計演習

連動

- 実験:引張試験・はりの曲げ試験 ←
- 三年夏 140人
  - 材料力学B第二
  - 演習: Easy-σによる応力解析
- 三年冬 80人
  - 有限要素法(三年冬)
  - 演習: ANSYSによる振動設計演習

理論と実務がつながる 2010年9月刊行 実践有限要素法シミュレーション ~ 汎用コードで正しい結果を得るための実践的知識~ 聡志・東京大学教授 工博 酒井信介/共著 東京大学准教授 博士(工学) 梟 定価3.360円(本体3.200円) 菊判・196頁 ISBN978-4-627-92061-3 本書を推薦する ゆる4カ学と同等の重みをも 格試験などが登場する一方、大学に おける有効な教育法は確立されてこな かった。教育現場での長年の経験に基づ く工夫が集約された本書は、学部生や 初・中級エンジニアの教育の標準になる であろう。 東京大学教授 久田 俊明 • 0 有限要素法(FEM)は、現代文明を支え る最も重要なメソッドのひとつです。FEM の美しさに魅了された私がその解析ソフ トを開発し、本書の著者と出会いました。 理論とシミュレーションをセットした本書 は、まさに私が欲しかった本です。 ソフトブレーン触創業者 宋文 主要日次 実践編 第4章 有限要素法の実践的知識 第1章 有限要素法の基礎知識 4.1 形状のモデリング 1.1 材料力学とは 有限要素法とは 4.2 要素の選定 材料力学と有限要素法 1.3 4.3 メッシュの作成 有限要素法の原理(トラス要素) 4.4 境界条件の設定 2.1 マトリックス法によるばねの計算 解析物理モデルの設定 2.2 ー次元トラスの有限要素法 4.6 結果の検証 二次元トラスの有限要素法 4.7 結果の分析と解釈 第3章 有限要素法の原理(ソリッド要素) 4.8 強度評価 三角形一次要素(定ひずみ要素) 4.9 より高度で便利なモデリング 3.1 アイソパラメトリック四辺形一次要素 第5章 有限要素法の演習問題 3.3 アイソパラメトリック四辺形二次要素 有限要素法のレポートのまとめ方(例題) 3.4 軸対称ソリッド要素 有限要素法演習問題(初級) 52

> 5.3 有限要素法演習問題(中級) 付録A 有限要素法のための応力の基礎

付録B 有限要素法のための破壊力学の基礎

3.5 三次元ソリッド要素

・東芝、新日鉄等で社内 教育用教科書として採用 決定

有限要素法:

講義内容

・実践的有限要素法の演 習問題をフリーソフト (Easy-σ Lite)で解く

## 有限要素法の設計演習問題

#### 問題9 圧力容器の設計 中級

下図のような円筒状の圧力容器の設計を行う。内圧は P=10MPa とする。材料は SB450 とせよ。

- 解析メッシュサイズの評価と解析結果のオーダーエスティメーションを行え。評価は半球形鏡部と 円筒胴部について、内圧を受ける薄肉円筒・球の式を用いて行え。
- 2) 降伏応力に達する臨界圧力を求めよ。
- 3) 内圧の負荷が繰り返し行われるとき、疲労破壊が生じる臨界圧力を求めよ。
- 4) \*Mises 相当応力の最大値が現在の値以下におさめながら、圧力容器を可能な限り軽量化したい。 最適形状を、材料力学的観点から結果を考察せよ。ただし、図中斜線部の形状および内容積の形状 は変えないものとする。板厚(局所的に変えても良い)は変更可能とする。何%軽量化されたかを 示すこと。





## 有限要素法のノウハウ



図4 円孔付き帯板の解析メッシュ図( 結果は表1参照・aの丸で示した場所の 値を比較している)

	節点数	要素数	誤差(応力集中係数)
a) 粗メッシュ	177	48	8.2%
b) 詳細メッシュ	641	192	3.9%
c) 応力集中部詳細	641	192	0.6%
d) 全体詳細	1811	564	2.6%
e) 高アスペクト比	857	256	10.7%

表1 解析精度のメッシュ依存性

## 有限要素法のノウハウ

#### <u>集中荷重・完全拘束という状態は</u> <u>現実にはない</u>

例えば、単純な集中荷重を受けるはり の曲げの問題において、集中荷重点( 近傍のメッシュを細かくすればするほ ど、応力は大きくなり発散する。これは、 実際は有限の接触面積で加えられて いる荷重を一点に集中させているから である。また、固定端などで非常に高 い応力が生じることがあるが、これは 固定部の剛性を考慮していないためで ある("剛性という考え方"を参照)。実 際は固定部も弾性変形するため、応 力は大きくならない。一般に、このよう な効果は粗いメッシュ分割にしておけ ば表面上見えなくなる。



固定部と荷重負荷部のメッシュを細かく切った片持ち梁の応力解析(左)と、粗く 切った応力解析(右)。メッシュを細かく切ると、メッシュを粗く切った場合と 比べ、固定部と荷重負荷部の不自然な大きな応力が顕著になる。ただし、その効 果は特異部に局所的であり、その他の部分の変位や応力分布(右下)には影響を ほとんど及ぼさない。

振動設計演習 (ユレーヌ選手権)



## 作品例(設計)



学生レポート