



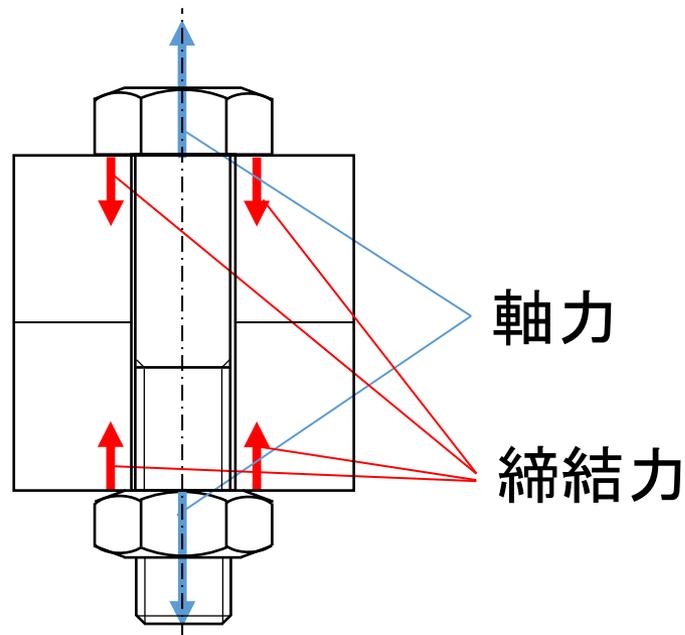
SHIBAURA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Established 1927

ボルト締結体及びボルト／ナット締結体の 緩み検知

機械機能工学科 細矢直基, 前田真吾

- ✓ ボルト締結体の緩み検知
- ✓ ボルト・ナット締結体の緩み検知



多くの機械構造物, インフラ構造物, モビリティ機器には, ボルト締結体(ボルト・ナット締結体)が使われている

→ 保守点検, 組立分解を容易にするため
↓ だから,

ボルト締結体(ボルト・ナット締結体)は, 必ず緩む(緩むようになっている)

ボルト締結体(ボルト・ナット締結体)の軸力が, 振動や経年劣化により低下する



疲労破壊, 構造物の破損を引き起こせば, 人命, 財産が失われる



✓ ボルト締結体(ボルト・ナット締結体)の軸力管理は非常に重要!

一般的にボルト締結体の軸力を検出しこれを管理することは重要

【従来法】

- ・トルク法(トルクレンチ) → 良く用いられている
 - ほぼ全ての大きさに対応, 安価で簡単, 定量的
 - ×計測された軸力には $\pm 30\%$ の誤差
 - 増し締めの際破断させる恐れがある
- ・打音試験
 - 簡単
 - ×重労働, 定性的, 検査員によるばらつき(見落とし)
- ・超音波法
 - 正確(条件付き)
 - ×使用できるボルトに制約(要追加工)
- ・油圧テンショナー
 - 正確(条件付き)
 - ×使用できる環境に制約(正確に計測できないときがある)

【検討中の手法】

- ・スマートワッシャー（例えば，奥川先生，中原先生）

- 定量的

- × 特殊な器具が必要，構造（スマートワッシャー）の付加 ，追加工（ボルトの精度）

- ・電池レスボルト軸力センサー（ミネベアミツミ，京都大学）

- 全てボルトの軸力を無線により管理

- × 全てのボルトに軸力センサーを貼付

https://www.minebeamitsumi.com/news/press/2020/1199444_13879.html

- ✓ 既存の構造物のボルト締結体（ボルト・ナット締結体）に追加工

- ✓ 現実的？

- ✓ 正直に言えば，やりたくない…



地域社会の課題等への貢献を考える

- ・国土交通省は、地方自治体におけるインフラ構造物の予防保全
- ・2005年～2017年の間で、全国市町村全体の職員数は、約11%減少
→土木部門の職員数の減少割合は約14%
- 技術系職員がいない市町村は全体の約30%

- ・地域社会の雇用を守り、地域社会のインフラ構造物を守るために、検査員によるアナログ技術をデジタル技術にすることで対応できる?
- ・デジタル技術を備えたアナログ検査員(ハイブリッド検査員)なら、育成の時間を短縮できる?



地方自治体の取組支援とインフラメンテナンス国民会議

https://www.jst.go.jp/sip/event/k07/pdf/event20190124_2-3.pdf

既存のボルト締結体(ボルト・ナット締結体)に追加工せず, 検査員の育成時間を短縮化し, 検査員のばらつきを減らすことで, 安価で簡便, そして普及するような, 緩み検知手法を開発

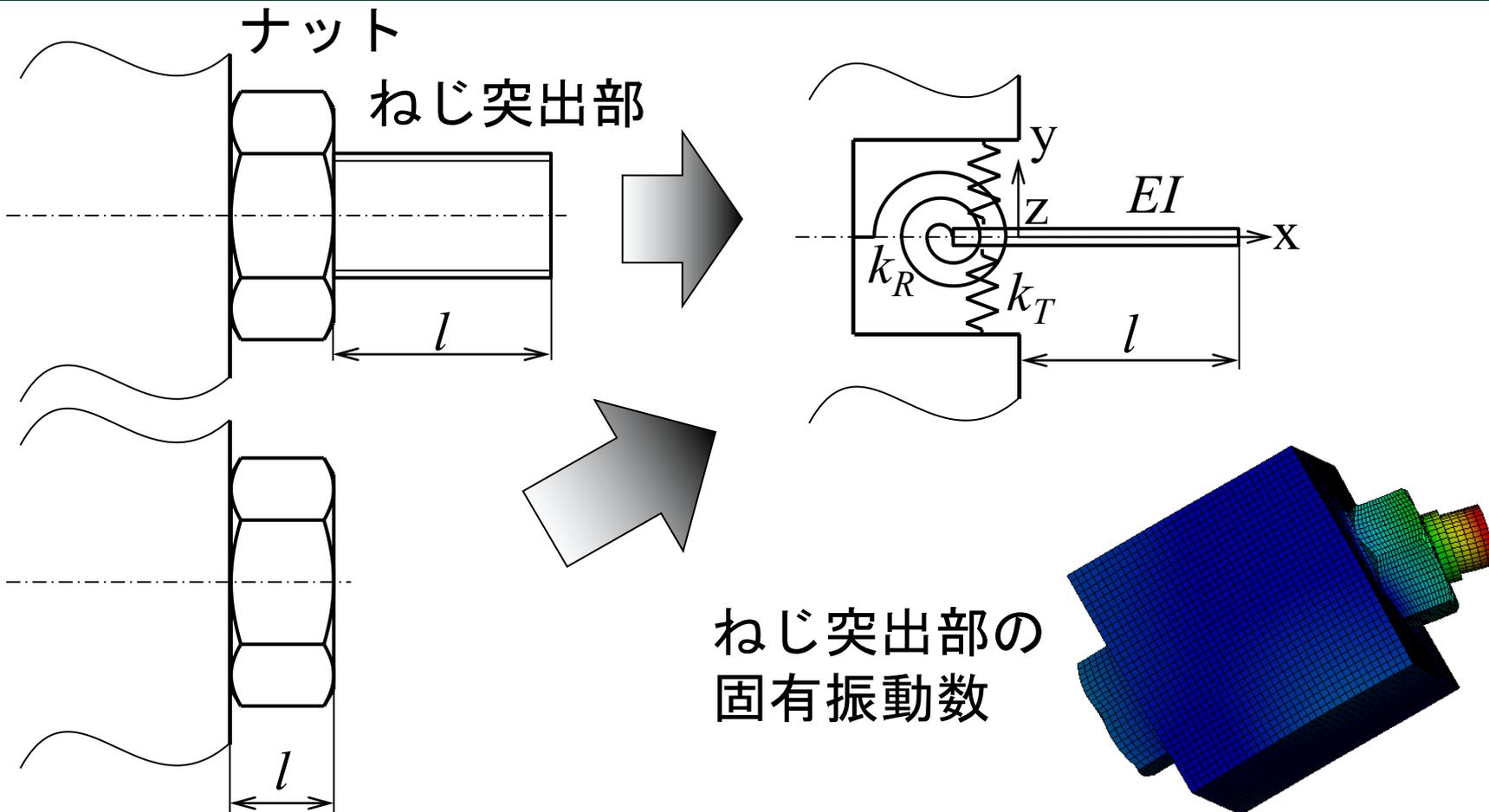


打音試験を定量化／知能化(振動試験を活用)



インパルスハンマによる打撃試験と超音波領域の実験モード解析を用いることで, ボルト締結体の軸力の変化を, ボルト頭部及びナットから飛び出たねじ突出部の局所的な高周波数帯域における振動モード(ローカルモード)の振動数の変化として捉え, ボルト締結体(ボルト・ナット締結体)の緩みを検知(軸力を検出)

✓ 将来的には, 人工知能, 様々なセンサの導入により, 遠隔化, 無人化を目指す!



- ✓ ボルト頭部またはねじ突出部を片持ちはりで見なす。軸力低下を固定端の結合部剛性の低下と考える。軸力の低下を固有振動数の低下として捉える。

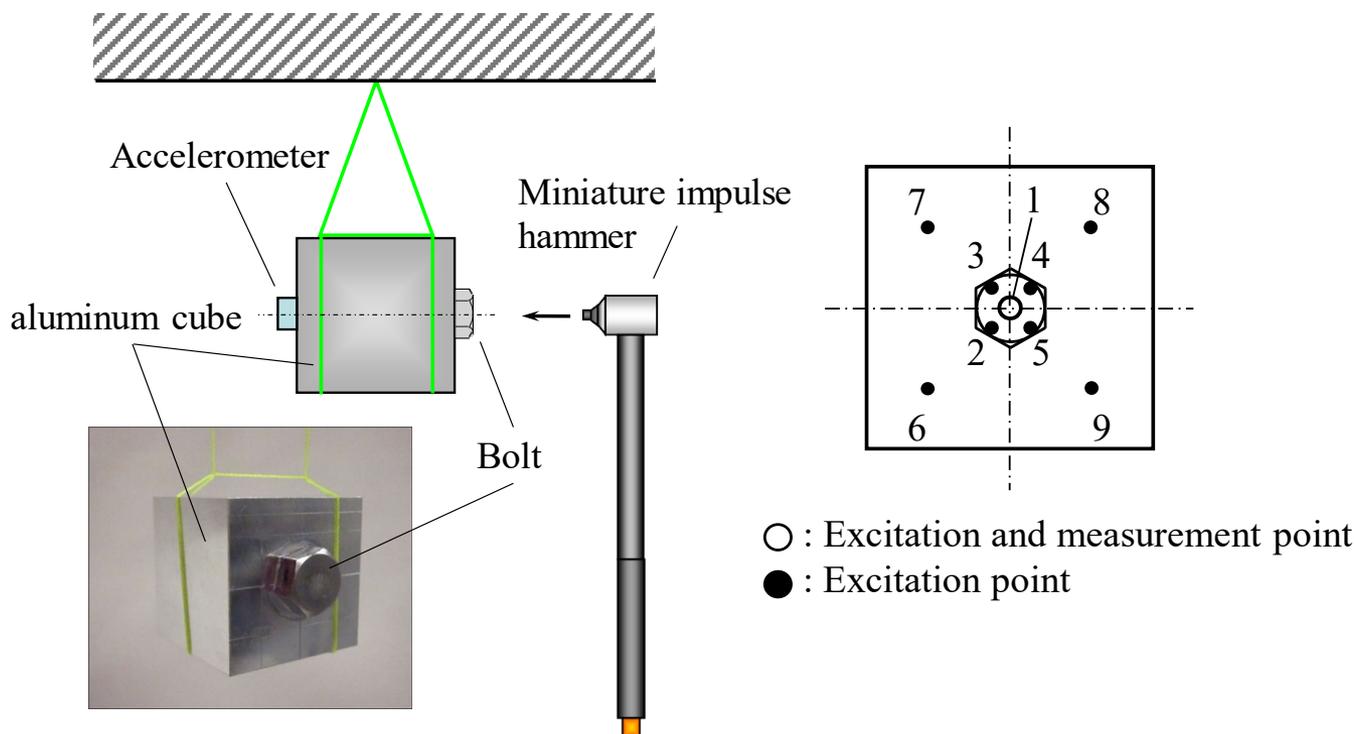
- ✓ **ボルト締結体の緩み検知**
- ✓ ボルト・ナット締結体の緩み検知

【ボルト締結体】

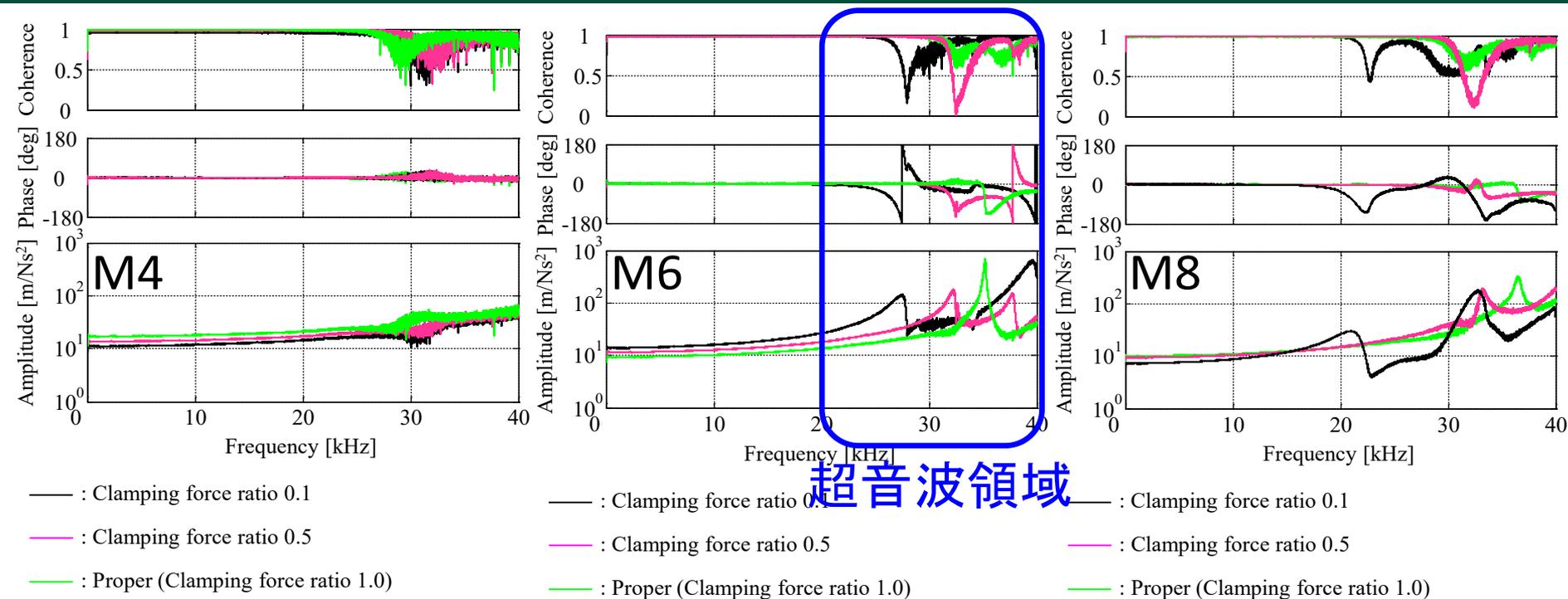
→被締結物間に発生する摩擦，ボルト締結体の固有振動数などがローカルモードの振動数に及ぼす影響を排除するため，計測対象振動数範囲に固有振動数を有さない単純な形状の一体構造物とした。

【ボルトの大きさ】

M4, M5, M6, M8 (小さなボルトに対する軸力検出例はない。)



周波数応答関数(点1の自己FRF)



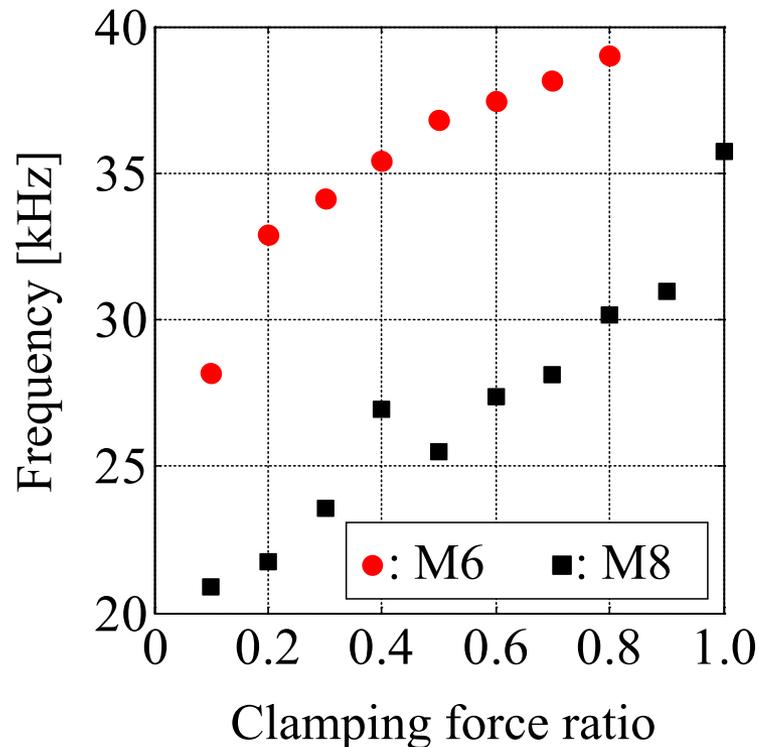
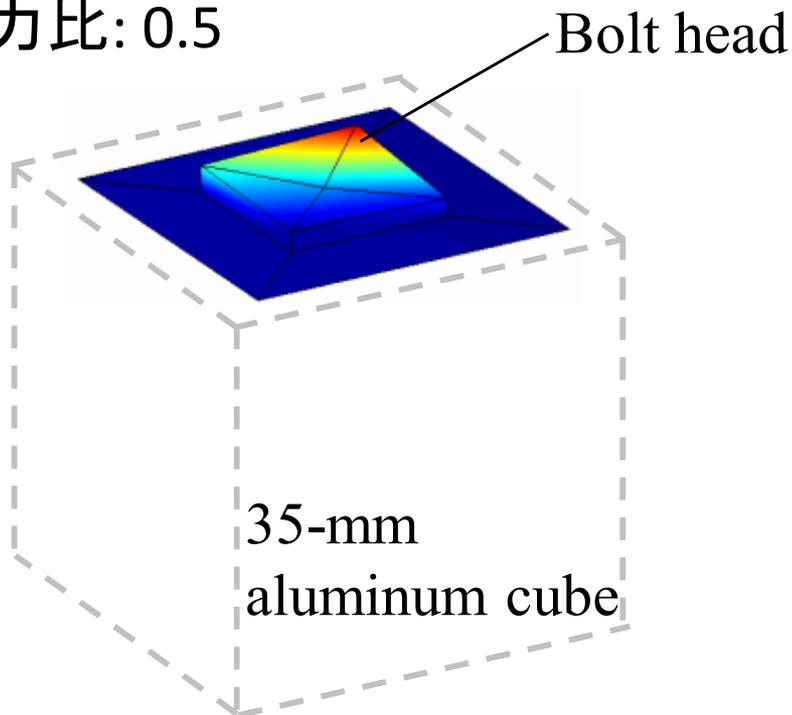
超音波領域

ボルトのサイズが大きくなる(ボルトの質量が大きくなる)に従い, 固有振動数が低振動数帯域にシフト

→これを観察すれば, 軸力検出可能

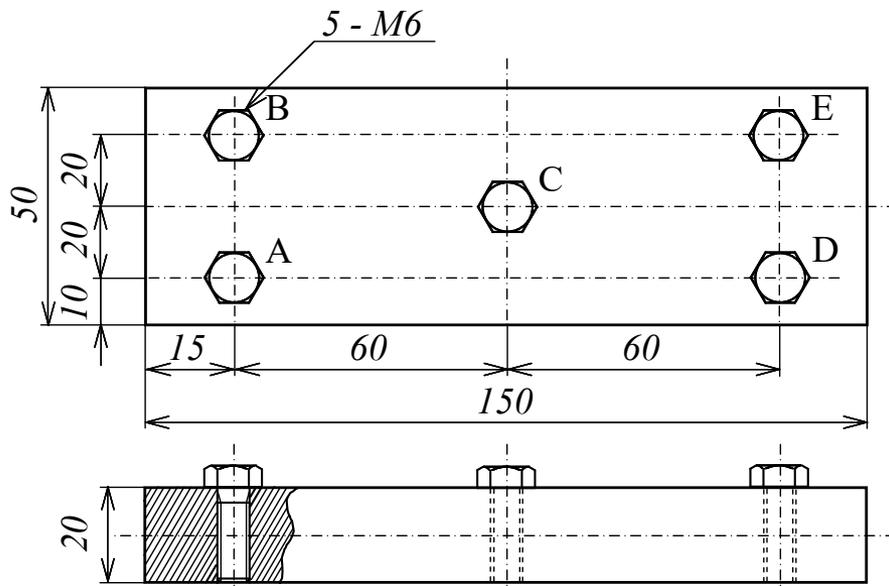
- ✓ 一般的な打撃試験の加振振動数の限界を考慮すれば, 本手法によりボルト締結体の軸力検出が可能なボルトのサイズはM6以上
- ✓ 超音波領域の方が可聴域よりも固有振動数の変化が見やすい

軸力比: 0.5



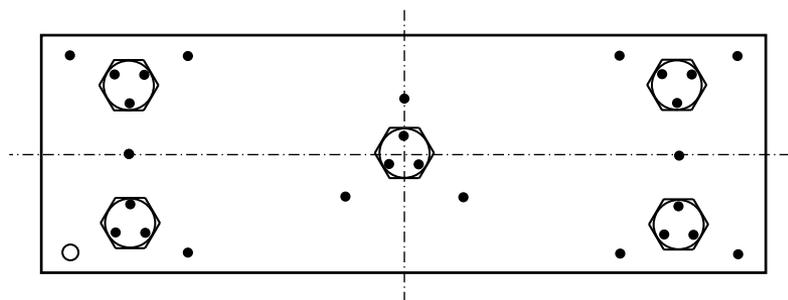
ボルト締結体の軸力が大きくなるに従い、ローカルモードの振動数が高周波数帯域へシフト

✓ ローカルモードの振動数には違いがあるが、M6とM8においては、ほぼ同様の傾向



Material: Aluminum, Mass: 394.9 g (without bolts)

(Unit: mm)



○ : Excitation and measurement point

● : Excitation point

複数のボルトを有するボルト締結体に対して、軸力とローカルモード振動数との関係を調査

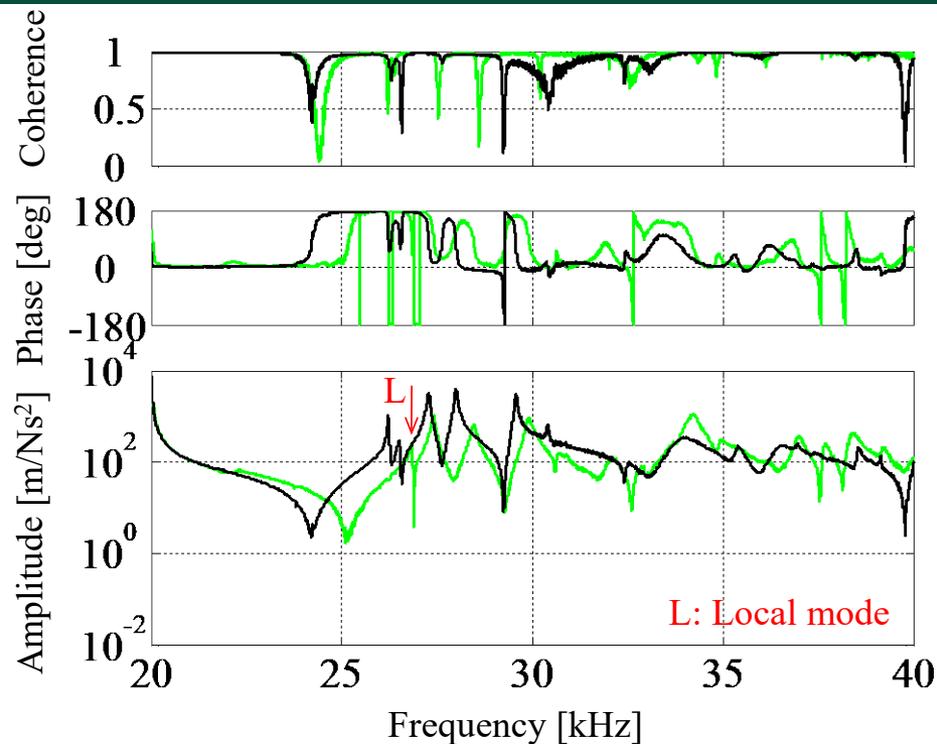
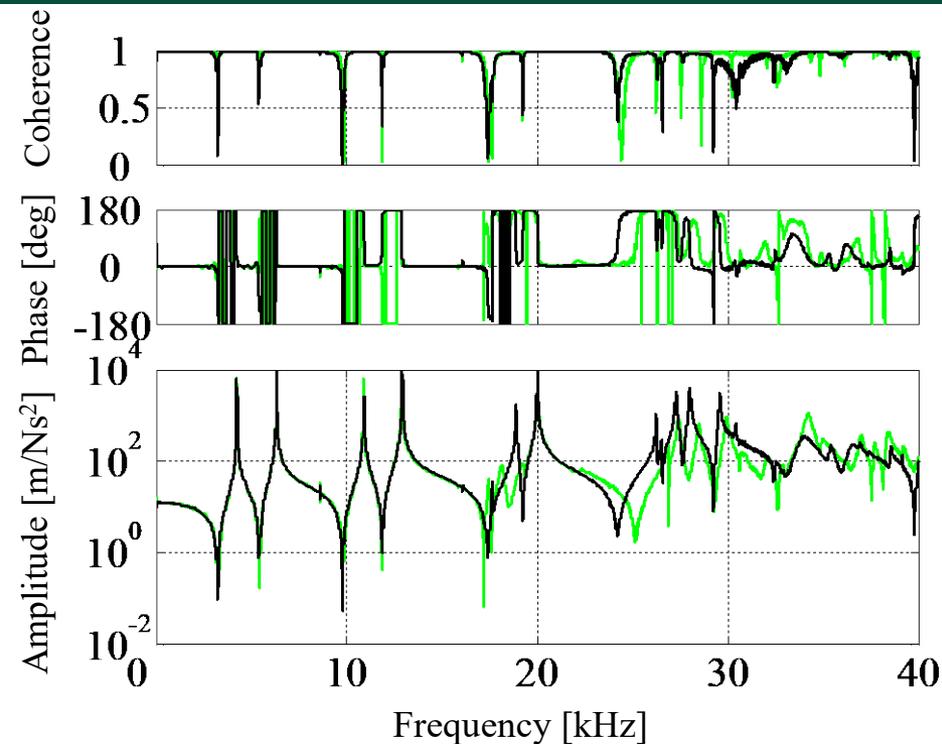
CASE 0: 全てボルトが軸力比1.0 (適正軸力)

CASE 1: ボルトAの軸力比が0.1

CASE 2: ボルトAの軸力比が0.5

CASE 3: ボルトCの軸力比が0.1

CASE 1: ボルトAの軸力比が0.1



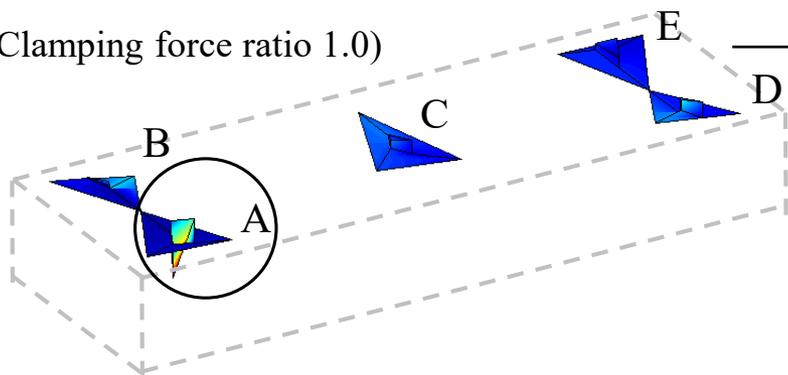
— : Clamping force ratio 0.1

— : Proper (Clamping force ratio 1.0)

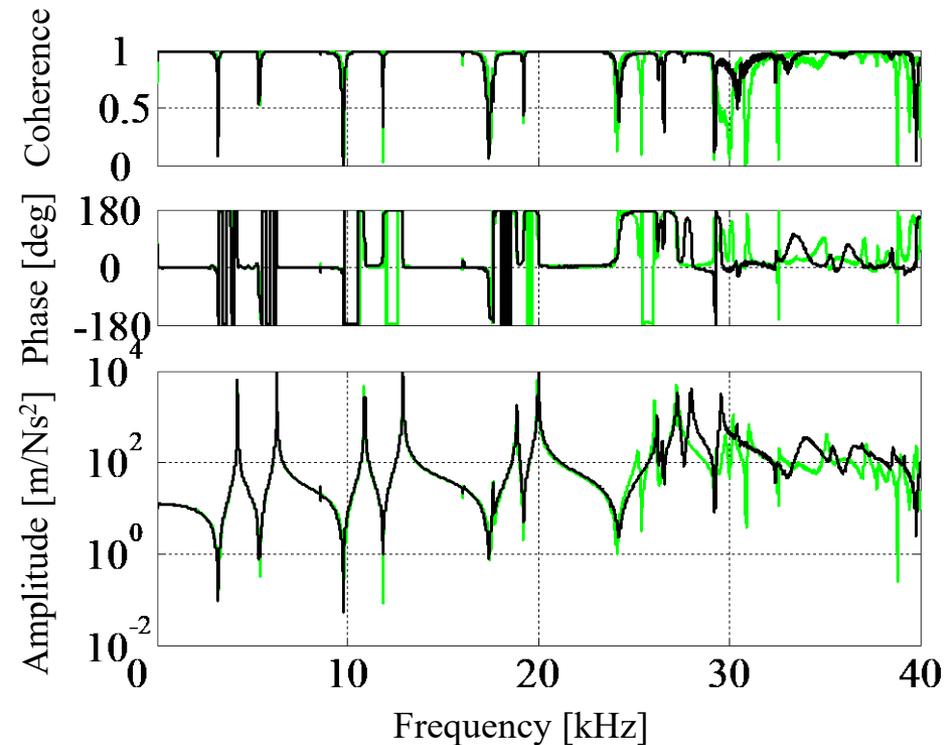
— : Clamping force ratio 0.1

— : Proper (Clamping force ratio 1.0)

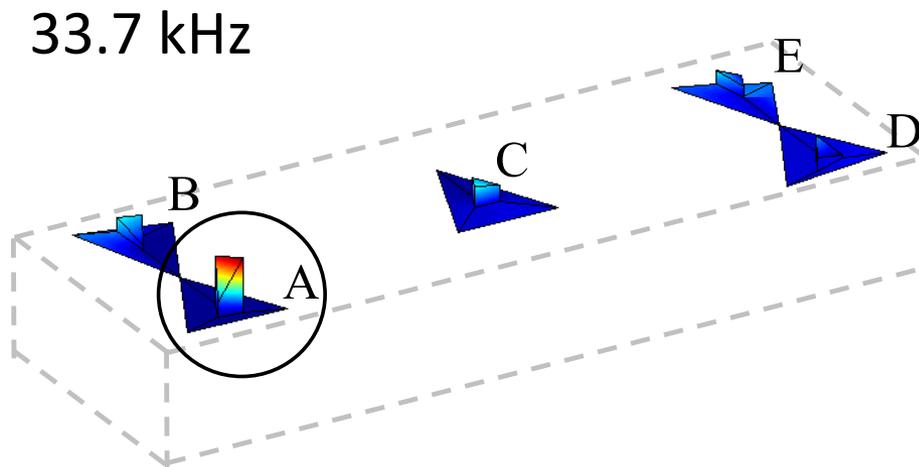
26.2 kHz

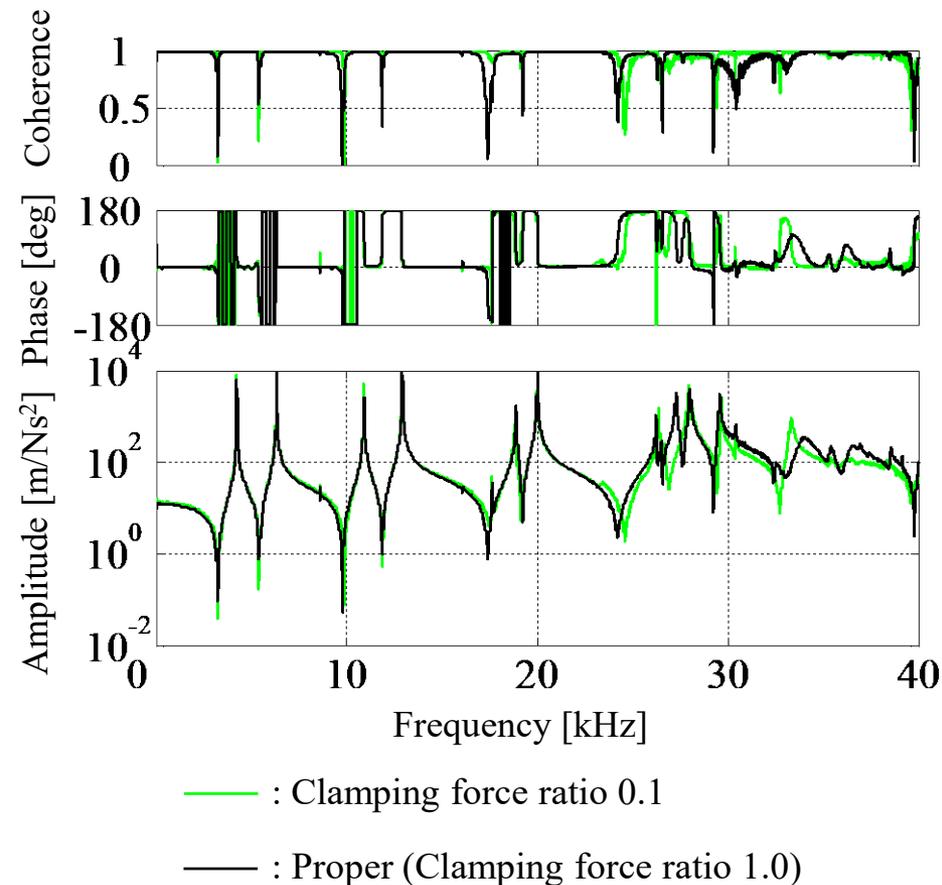


CASE 2: ボルトAの軸力比が0.5

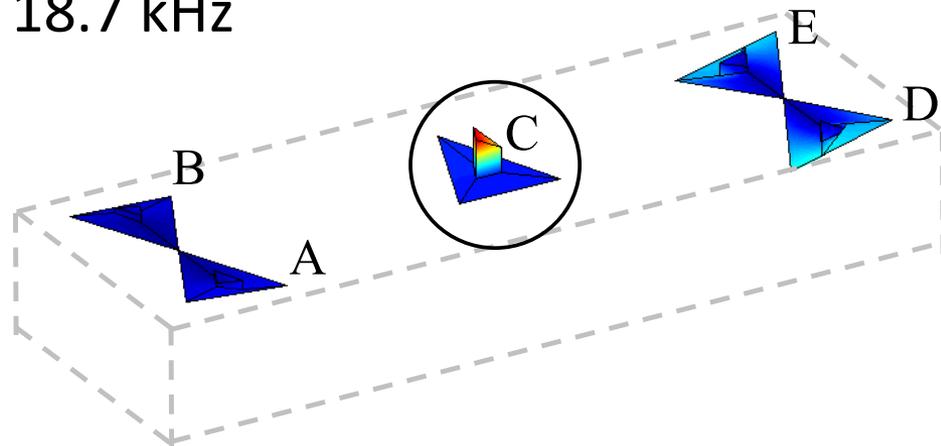


— : Clamping force ratio 0.5
 — : Proper (Clamping force ratio 1.0)





18.7 kHz



✓ ボルト締結体の軸力変化とローカルモードの振動数変化との関係を調べることで、軸力を検出できる

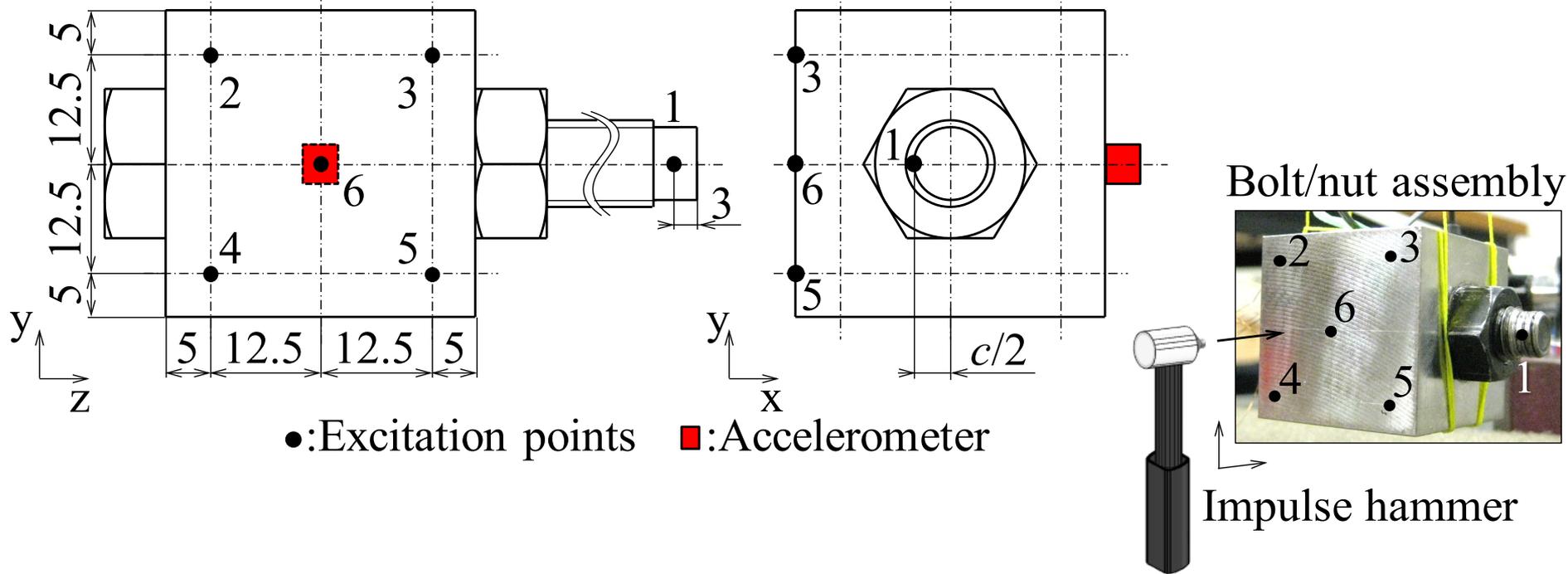
- ✓ ボルト締結体の緩み検知
- ✓ ボルト・ナット締結体の緩み検知

【ボルト・ナット締結体】

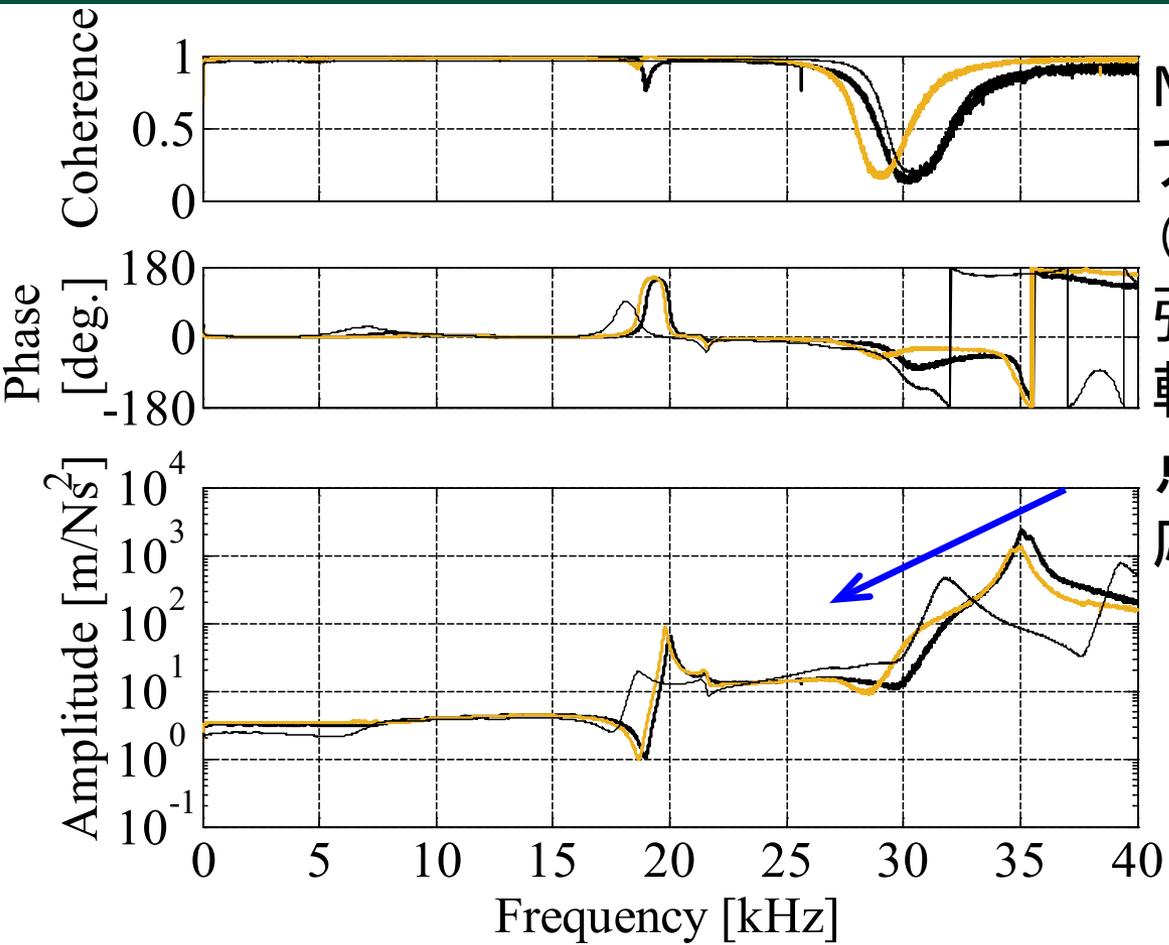
→被締結物間に発生する摩擦，ボルト締結体の固有振動数などがローカルモードの振動数に及ぼす影響を排除するため，計測対象振動数範囲に固有振動数を有さない単純な形状の一体構造物とした。

【ボルトの大きさ】

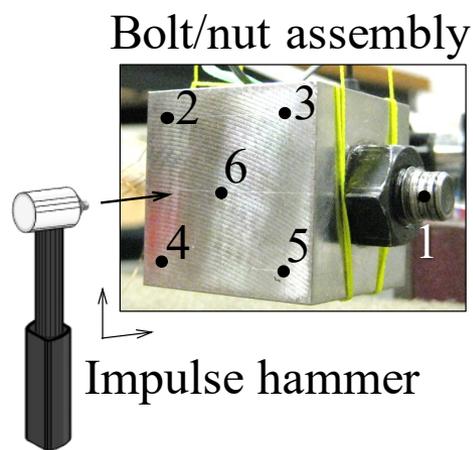
M8, M10, M12 (機械構造物で実用的に用いられることが多い大きさ)



軸力低下とねじ突出部の固有振動数の関係



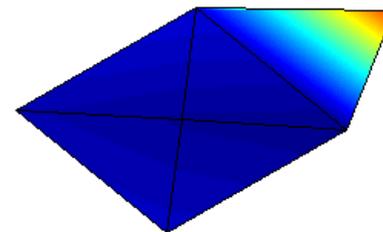
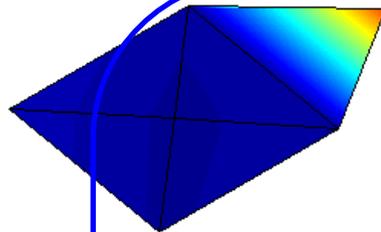
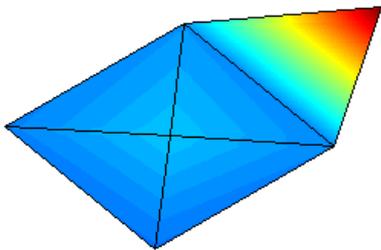
M10
アスペクト比0.7
(ねじ突出部長さ／呼び径)
強度区分10.9
軸力100%, 50%, 10%
点1加振点6応答の周波数
応答関数



- ✓ 軸力が低下するに従い、固有振動数が低下している
- ✓ どこが揺れているか、確認する必要がある

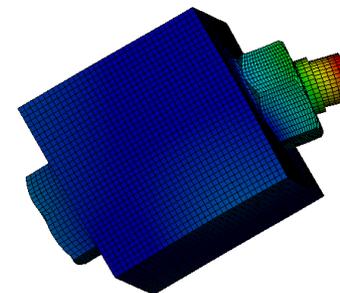
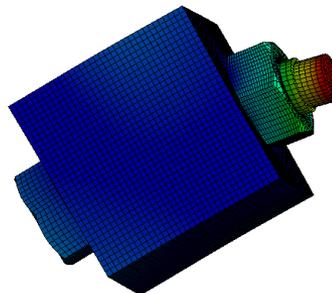
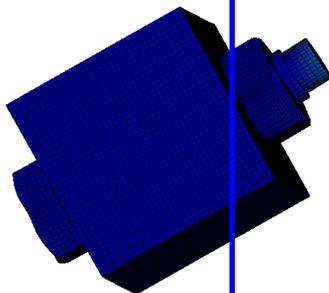
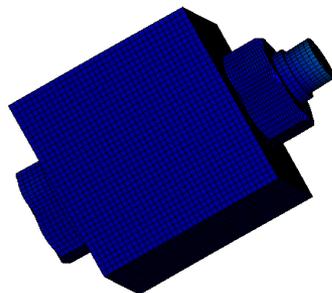
固有振動モード形の確認

[Experiment]



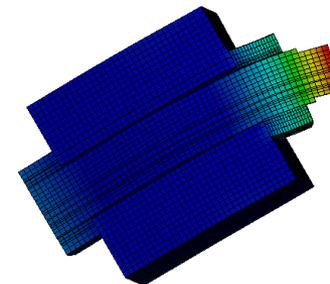
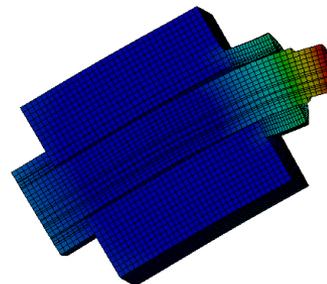
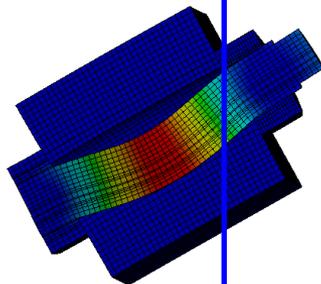
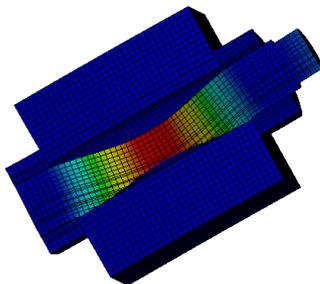
1st mode (19,970 Hz) 2nd mode (35,048 Hz) 3rd mode (35,442 Hz)

[FEA]



ねじ突出部の固有振動数は35 kHz

Cross section



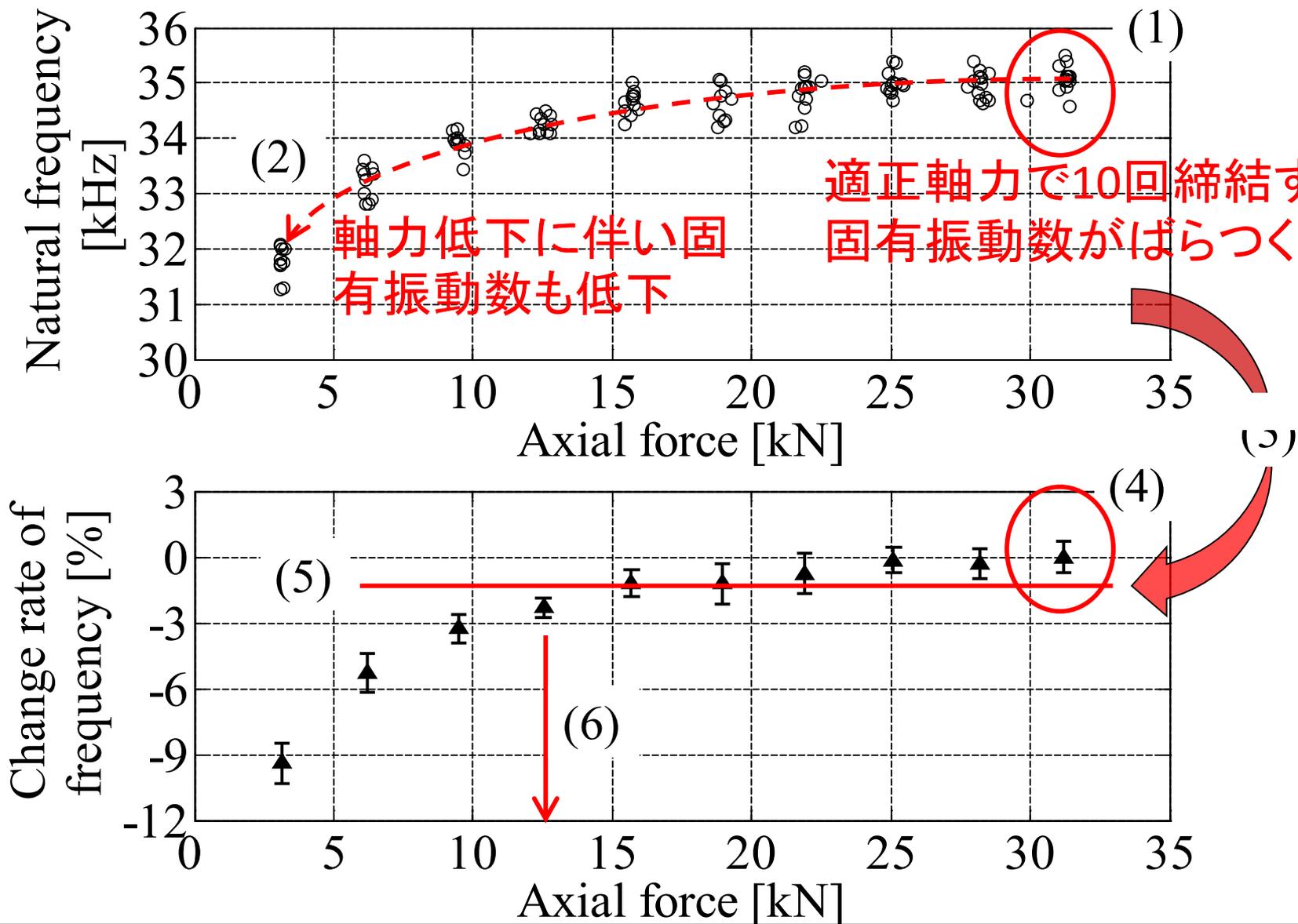
1st mode
(21,578 Hz)

2nd mode
(21,739 Hz)

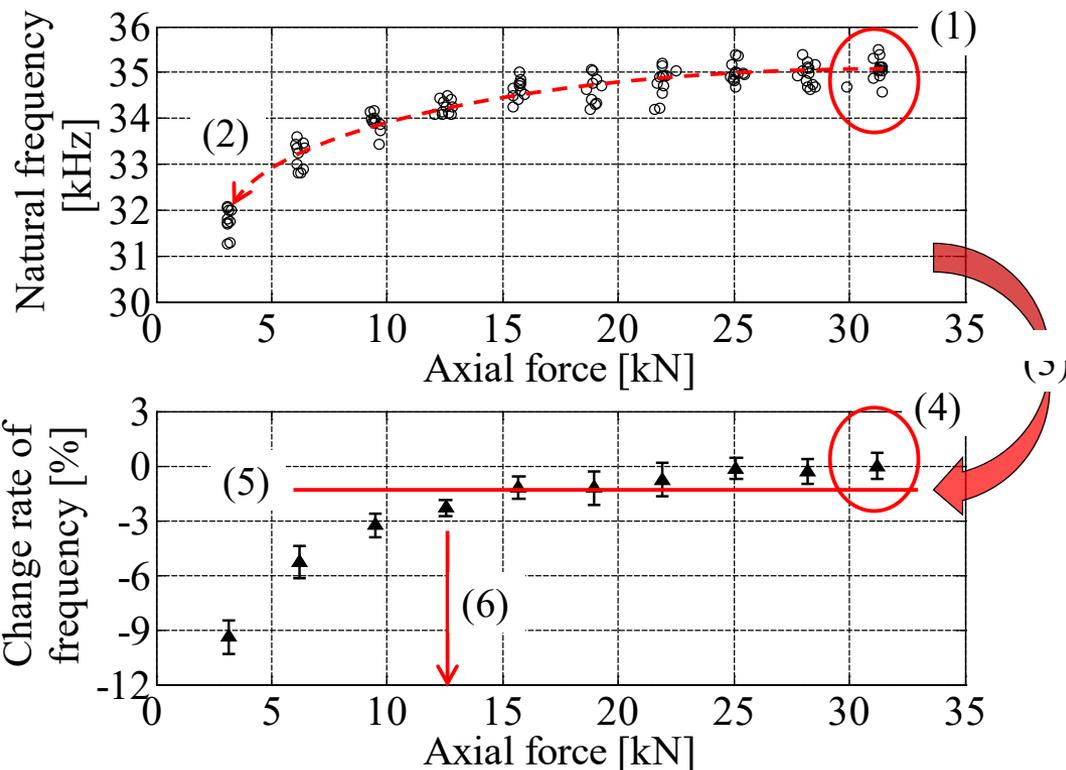
3rd mode
(36,968 Hz)

4th mode
(37,139 Hz)

締結のばらつきを考慮 (締結および解放を10回)



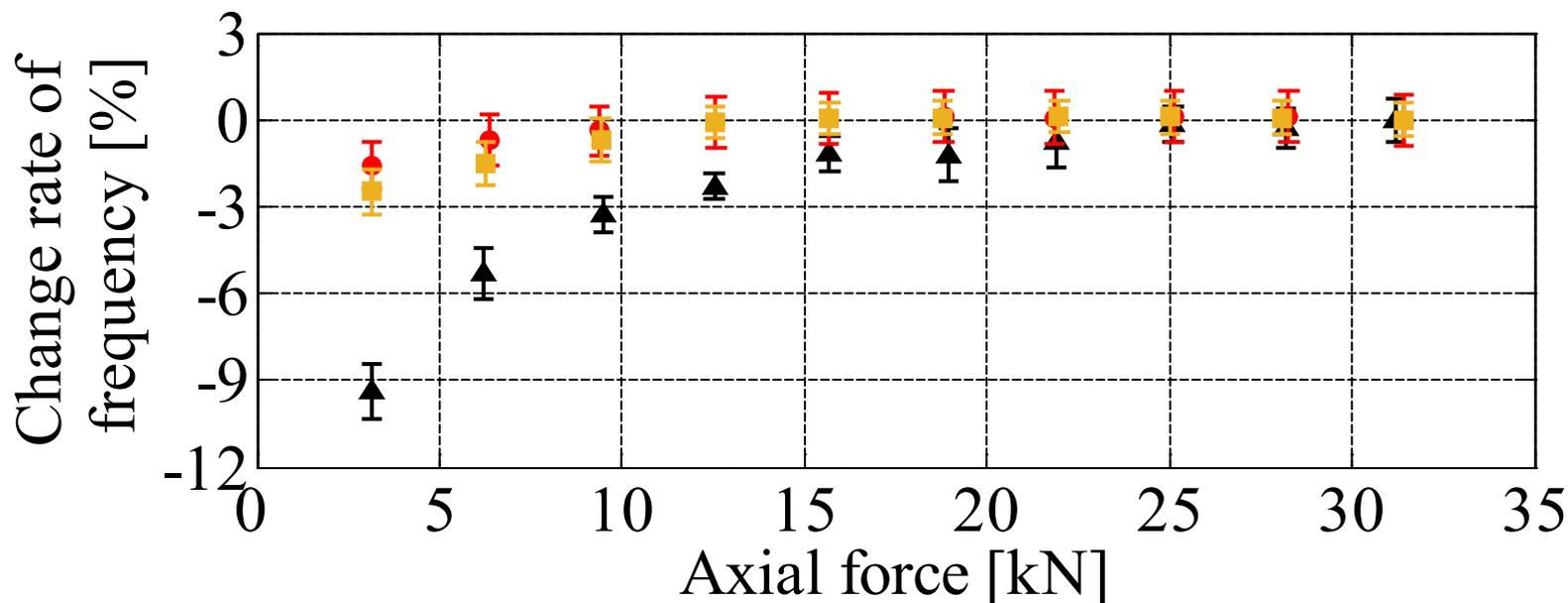
軸力検出の手順



- (1) 適正軸力において、締結および解放を繰り返し、適正軸力における固有振動数のばらつきを計測する
- (2) 軸力を低下させ、(1)と同様に締結および解放を繰り返し、所望の軸力における固有振動数のばらつきを計測する

- (3) グラフの縦軸を固有振動数の変動係数としたグラフに変換する
- (4) 適正軸力における固有振動数の変動係数を確認する
- (5) (4)の変動係数を考慮し、閾値を決定する
- (6) 固有振動数が閾値を超えたとき、軸力が検出される

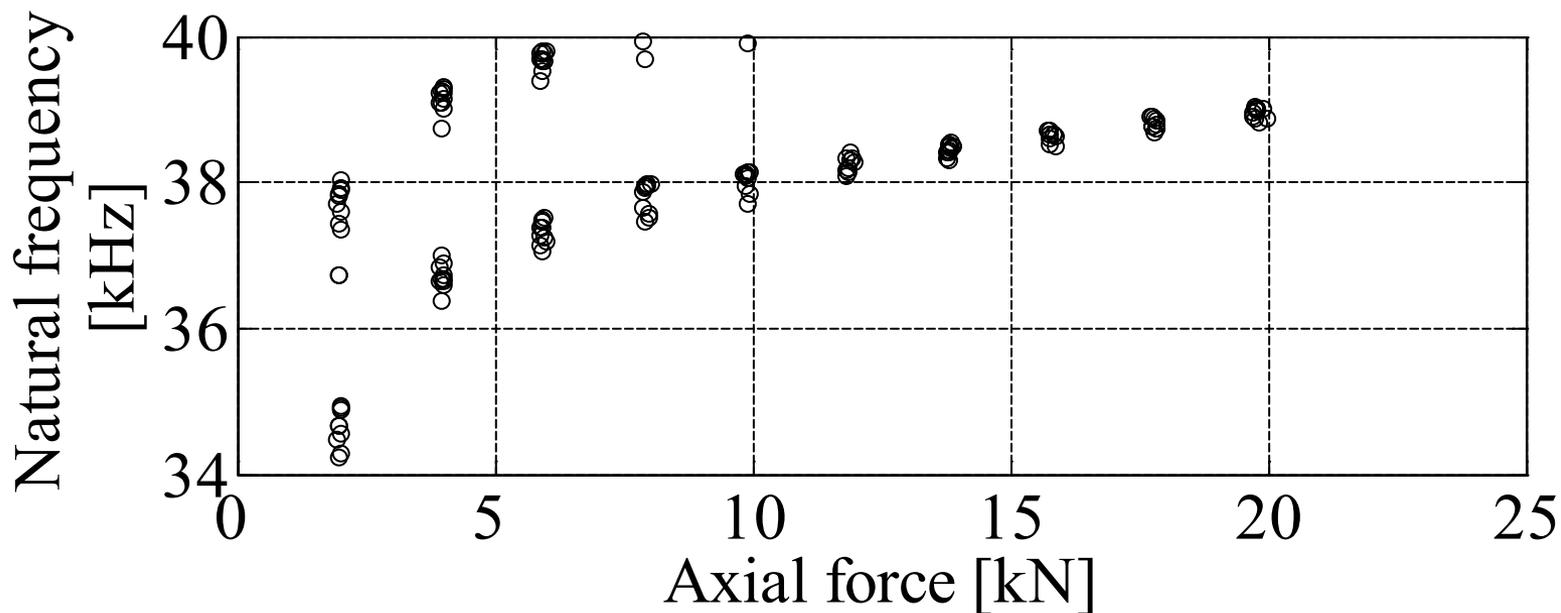
✓ 本手法では、正確な軸力を検出できる



▲ Aspect ratio 0.7 ● Aspect ratio 1.7 ■ Aspect ratio 3.7

アスペクト比が大きい(ねじ突出部が短い)ほど、軸力の検出精度が高くなる(高感度)

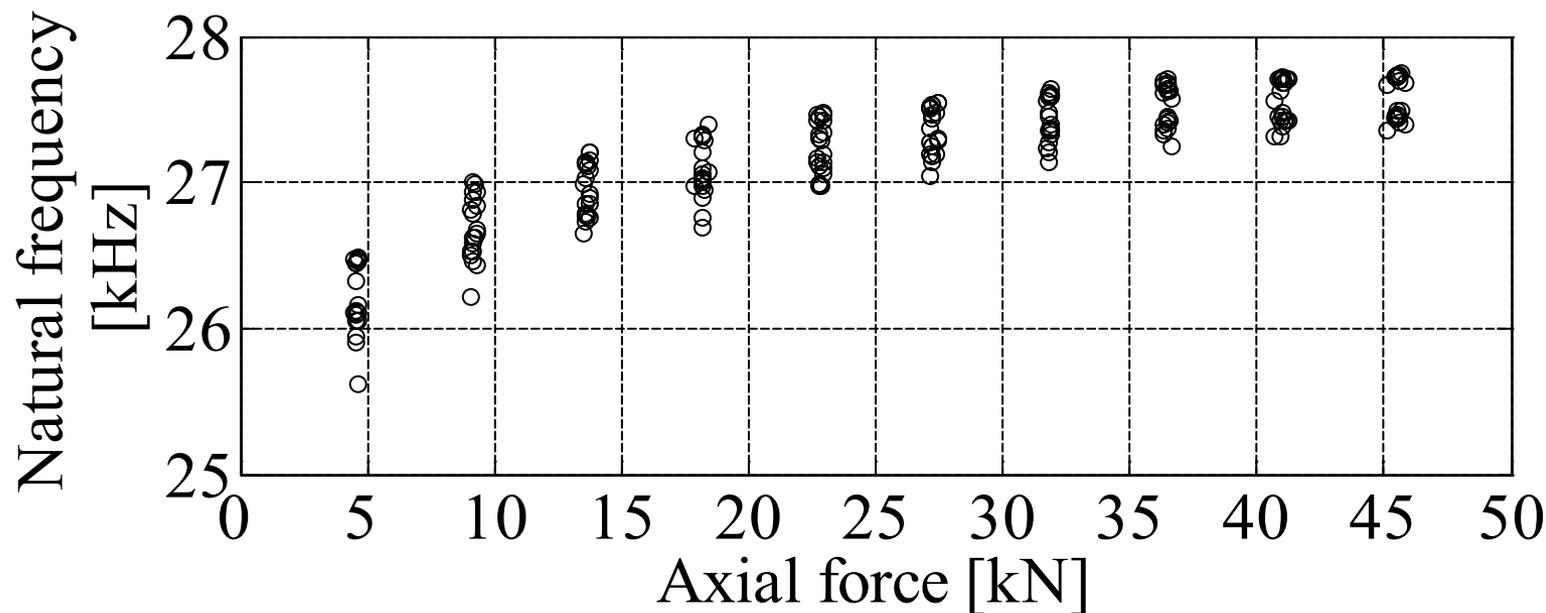
✓ 本実験の範囲においては、アスペクト比は小さい方が良い



M8 アスペクト比(ねじ突出部長さ／呼び径) 0.7

強度区分10.9

- ✓ M8の場合, ねじ突出部の固有振動数がM10に比べ上昇
- ✓ インパルスハンマによる検査員の加振においては, 40 kHz以上の入力は困難
- ✓ 加振方法を変化させることで対応可能(物体射出法)

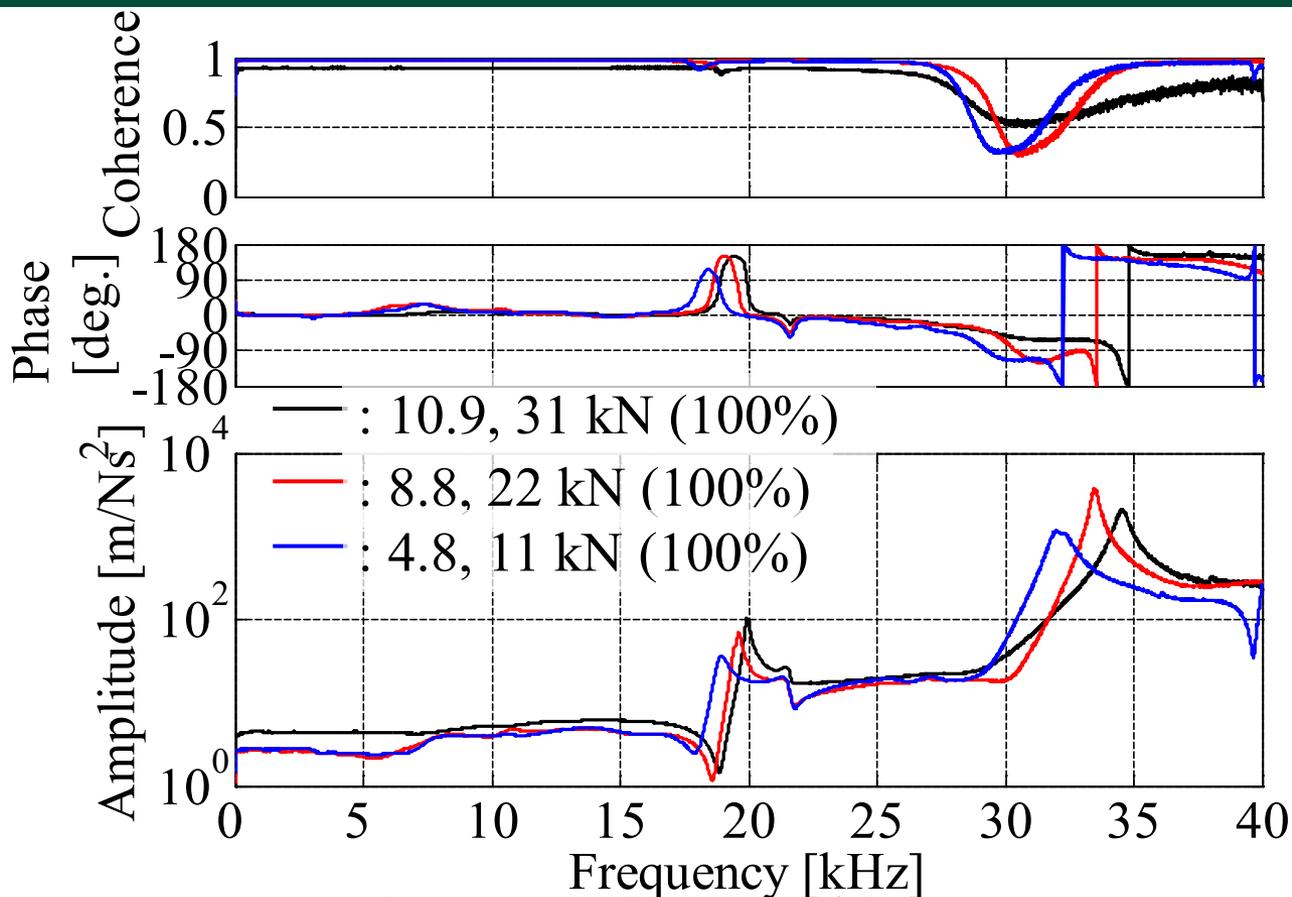


M12 アスペクト比(ねじ突出部長さ／呼び径) 0.7

強度区分10.9

- ✓ M12の場合, ねじ突出部の固有振動数がM10に比べ低下
- ✓ インパルスハンマによる検査員の加振で十分に対応可能

実用化のために(強度区分の比較)



M10 アスペクト比(ねじ突出部長さ／呼び径) 0.7

強度区分10.9, 8.8, 4.8, 適正軸力(強度区分により適正軸力が異なる)

✓ 固有振動数を比較すると, 固有振動数が低下しているように見える
 →間違える!

- ✓ 打撃試験と実験モード解析により、ボルト締結体（ボルト・ナット締結体）の軸力の変化を、ボルト頭部およびねじ突出部の局所的な高周波数帯域における振動モード（ローカルモード）の振動数の変化として捉えることで、ボルト締結体の軸力を検出できる
- ✓ 人間では聞こえない超音波領域の固有振動数を定量的に計測するため、緩み検出におけるばらつきは存在しない
- ✓ 実用化に向け、やるべきことはたくさんある！