

令和6年度
JAEA-NRA安全研究成果報告会

配管の弾塑性有限要素解析における
不確定要因

令和6年11月14日

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
地震・津波研究部門

東 喜三郎

本研究の一部は東京電機大学との共同研究「機器配管系の耐衝撃性及び耐震性に係る研究」の成果である。



背景

研究プロジェクトの目的: 既設の原子力施設の安全裕度の評価

- 規制基準により、耐震重要施設は、基準地震動による地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものであることが確認される。
- 既設の原子力施設の安全裕度の評価では、過去に経験した地震の影響（繰り返し地震の影響）を考慮し、その設計基準地震動を超える領域までの耐震性を明らかにすることが重要。
- 繰り返し地震の影響が想定される静的設備として、配管が挙げられる。配管設計では運転中に想定される様々な荷重を分類し、対応する各損傷モードに対し、十分な保守性を持たせなければならない。

配管の耐震設計で想定される損傷モード

損傷モード	設計上の制限	荷重形態の例
→ <u>塑性崩壊</u> 過大な進行性変形	1次応力 1次+2次応力範囲	内圧、 <u>慣性力</u> 熱応力、相対変位
→ <u>疲労損傷</u>	1次+2次+ピーク応力	<u>応力集中等による増加分</u>

本発表で対象とする損傷モード

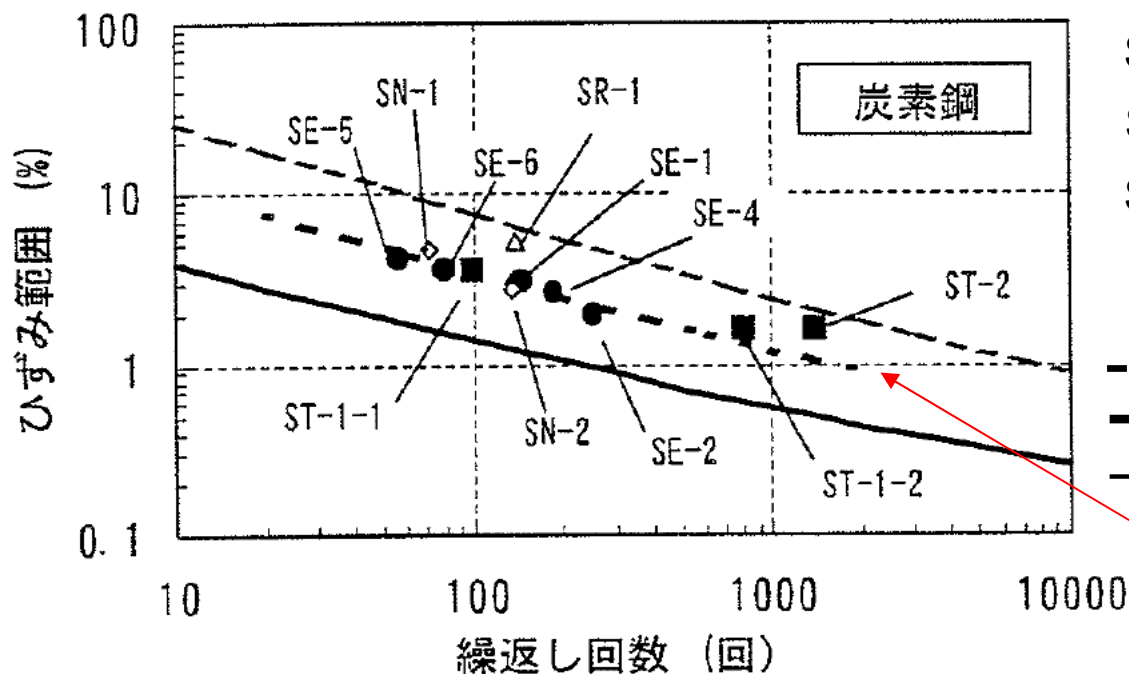


既往研究

配管系の特徴

地震荷重を受ける配管系では、配管要素に最大応力が発生

既往研究



評価手法や形状の影響等による
配管要素試験と材料試験の差異

既往の配管要素の疲労試験*

既往試験で代表的な配管要素の損傷限界の分析が行われているものの、複雑な形状の配管要素については試験事例が少なく、その損傷メカニズムは十分に把握されていない。

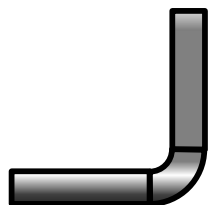


目的

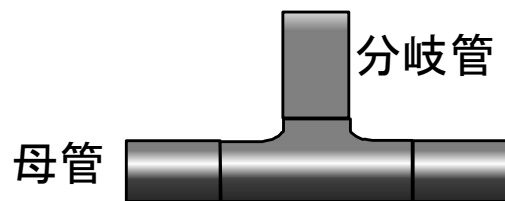
研究課題

従来研究では試験データの多いエルボ等を中心に設計上の裕度を分析

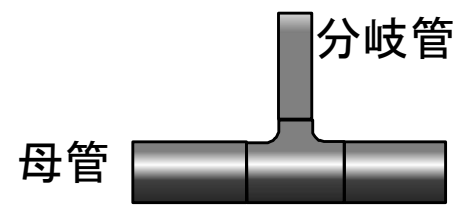
➡ 耐震設計の保守性を広く確認するためには、複雑な形状の配管要素の試験データの拡充が重要。



エルボ



同径ティ
(母管と分岐管の径が同じティ)



異径ティ
(分岐管の径が異なるティ)

研究目的

異径ティを含む代表的な配管要素の試験・解析を実施

➡ 設計の保守性を確認するとともに、解析上の留意点を整理する。

配管要素試験: 破損モード及び破損限界の把握

有限要素解析(FEM): 弾塑性応答挙動の分析

➡ 現行の規制基準で規定される耐震設計手法の妥当性確認

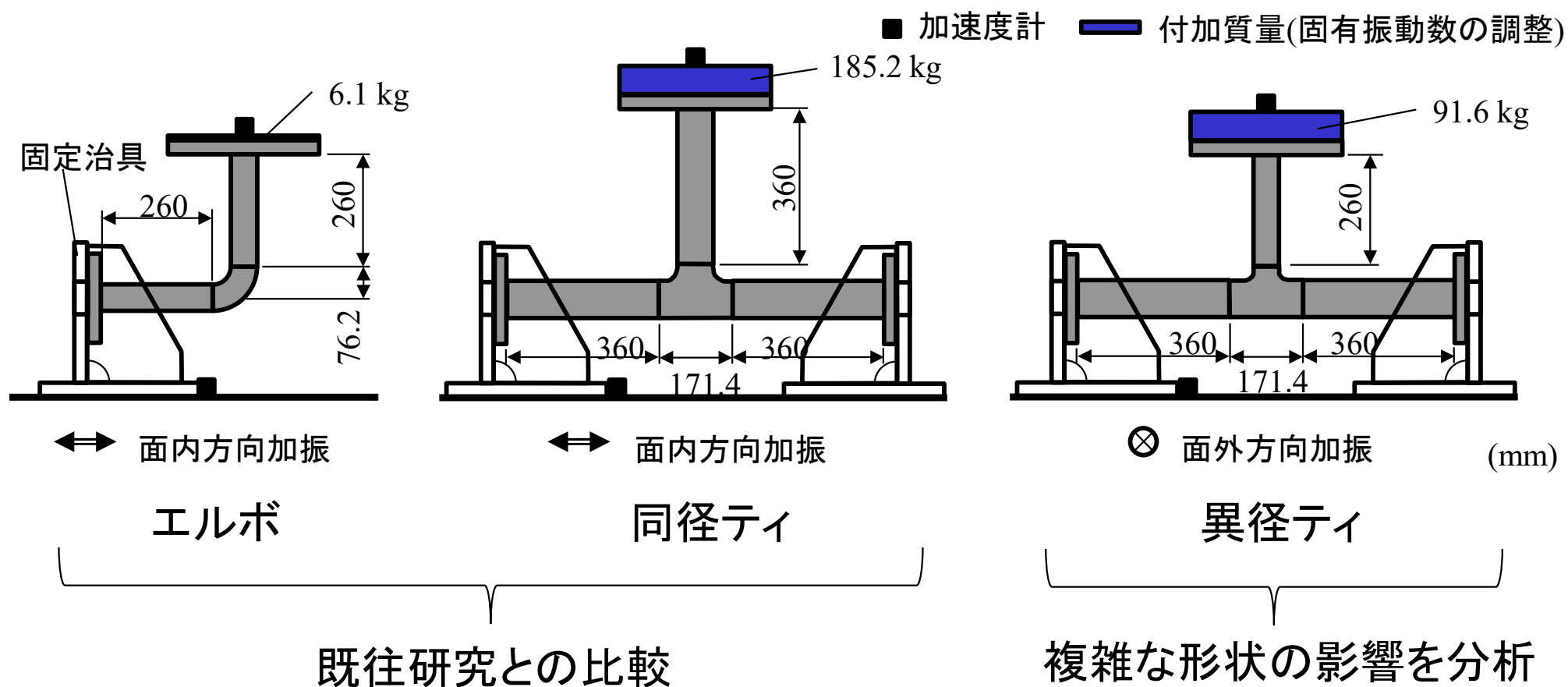


振動試験



試験体形状

- 炭素鋼の配管要素(エルボ、同径ティ、及び異径ティ)を模擬した試験体を製作した。
- 振動台の加振限界を鑑み、試験体のサイズは実機の給水系の1/5.6程度に縮尺した。

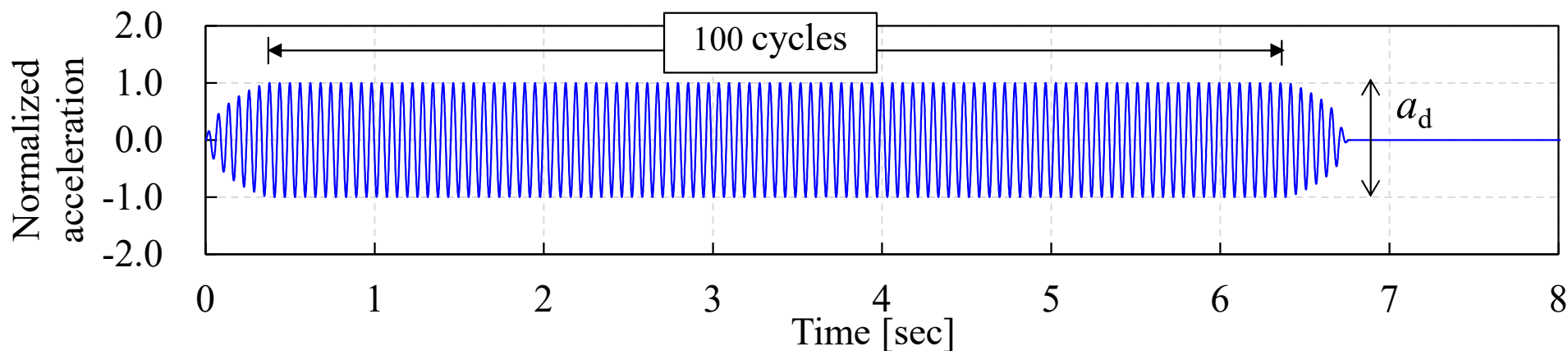




正弦波加振

加振方針

- 入力波は試験体が共振する正弦波(16.6 Hz、100サイクル以上)とする。
- 入力加速度は、弾性応答を仮定した場合に、設計上許容される最大の1次応力が発生するレベル(a_d)以上とする。
- 1000サイクルまで繰り返して加振しても損傷が確認されない場合は、入力加速度を増加させる。($a_d \rightarrow 3.3a_d \rightarrow 6.7a_d$)



入力加速度レベル		エルボ [m/s ²]	同径ティ [m/s ²]	異径ティ [m/s ²]
設計レベル	a_d	14.4	5.73	5.32
中レベル	$3.3 a_d$	48.1	19.1	17.7
大レベル	$6.7 a_d$	-	38.2	35.5



振動試験の様子

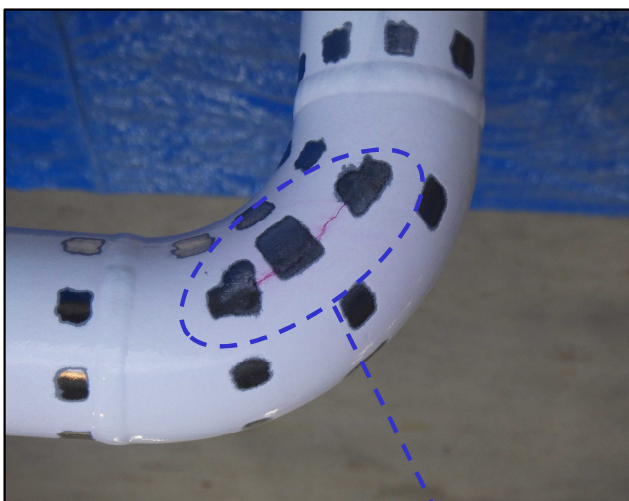




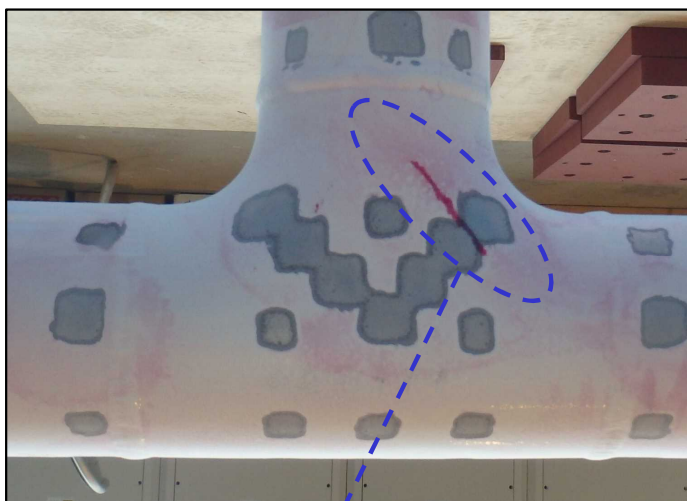
振動試験後の疲労亀裂の様子

- 正弦波加振を継続し、圧縮空気(約0.5 MPa)の漏洩を確認
- 試験後には試験体表面の浸透探傷試験(表面亀裂を検査する手法)を行い、貫通亀裂が発生した位置を確認

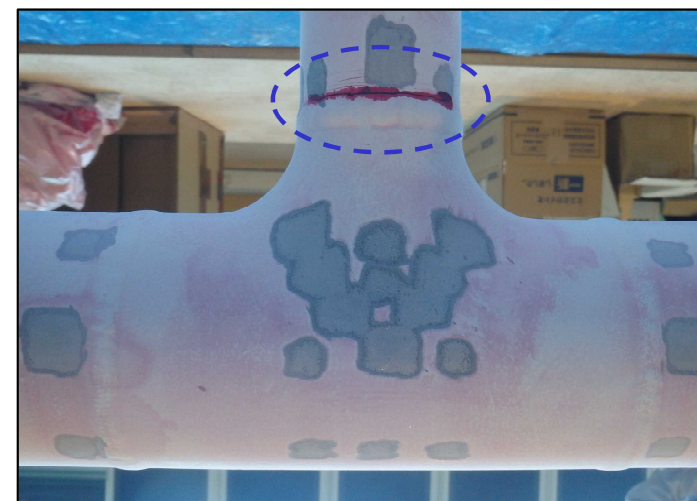
エルボ



同径ティ



異径ティ



亀裂発生位置は既往試験の結果と良く一致

全ての試験体で疲労亀裂が貫通していることから、損傷モードは疲労損傷であると判定した。



設計裕度の分析

試験で入力した加速度及び繰り返し回数から、設計上の裕度を分析

加速度	エルボ	同径ティ	異径ティ
最大入力加速度 a_a	$3.3a_d$	$6.7a_d$	$6.7a_d$
設計上許容される加速度 a_d	a_d	a_d	a_d
塑性崩壊に対する裕度 $M_a = a_a/a_d$	> 3.3	> 6.7	> 6.7

繰り返し回数	エルボ	同径ティ	異径ティ
加速度 a_d で入力した繰り返し回数 N_a	1000	1000	1000
設計上許容される繰り返し回数 N_d	104	95	90
繰り返し回数に対する裕度 $M_N = N_a/N_d$	> 9.56	> 10.5	> 11.1

既往試験と同様に、塑性崩壊及び疲労損傷の発生までに十分な余裕があることを確認。

複雑な形状の配管要素であっても、十分な裕度を持つことを確認。



弹塑性有限要素解析

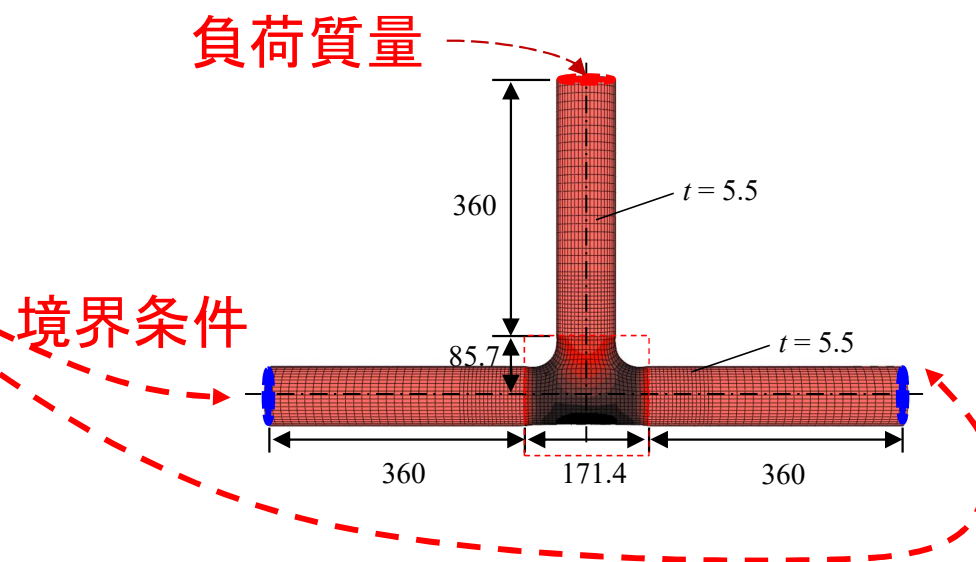
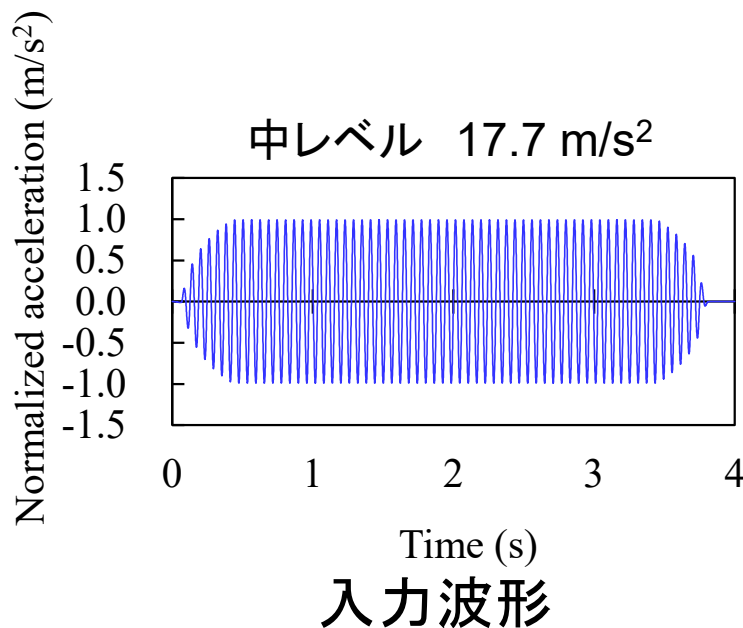


弾塑性FEMの解析方針

解析方針

- 汎用FEMコード(ABAQUS)を用いて、振動試験を模擬した時刻歴応答解析を行う。
- 弾塑性FEMにおいて、影響が大きいと予想されるパラメータを変化させ、モデル化手法に起因する誤差を評価する。
 - 形状モデル(配管肉厚分布等)
 - 材料モデル(硬化則等)

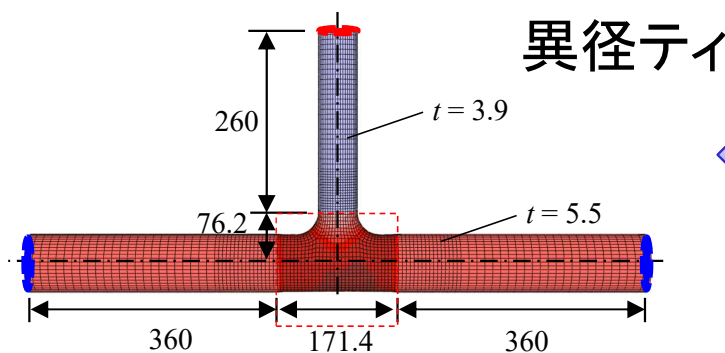
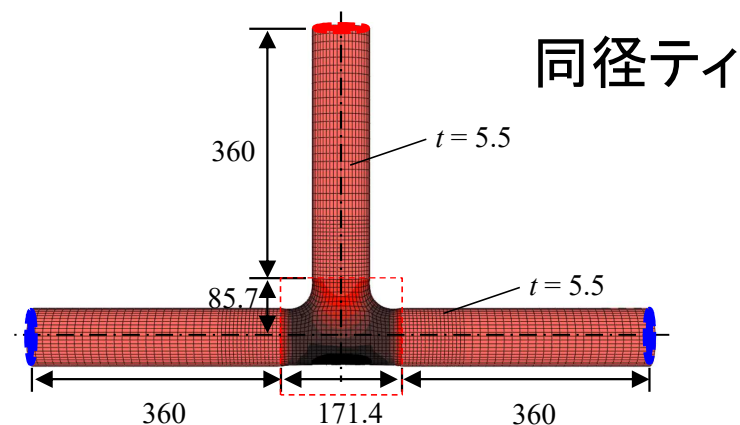
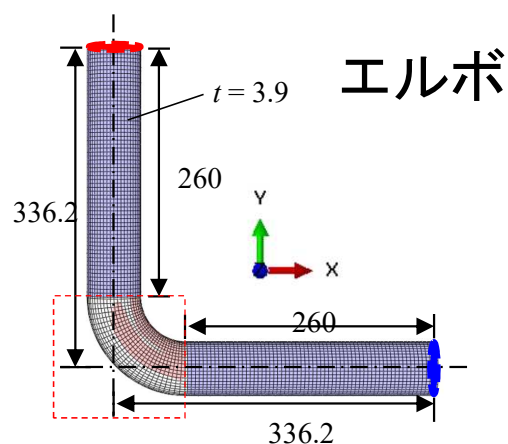
本発表で着目するパラメータ



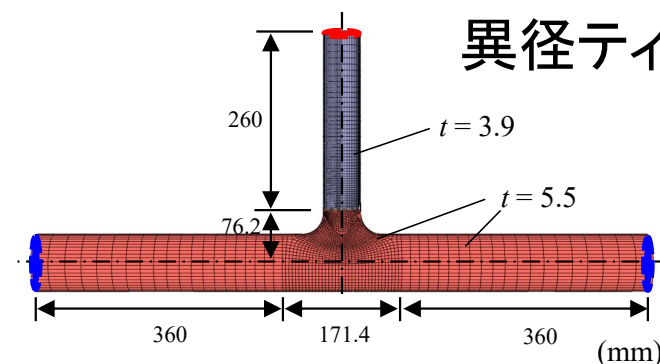


FEMモデルの誤差要因：配管肉厚分布

- エルボ、同径ティ、及び異径ティの3種類の配管要素を、シェル要素（薄板要素）によってモデル化した。
- 配管要素の肉厚分布には3次元計測の結果を反映した。ただし、比較のため、異径ティには公称肉厚のモデル（肉厚が一定のモデル）も作成した。



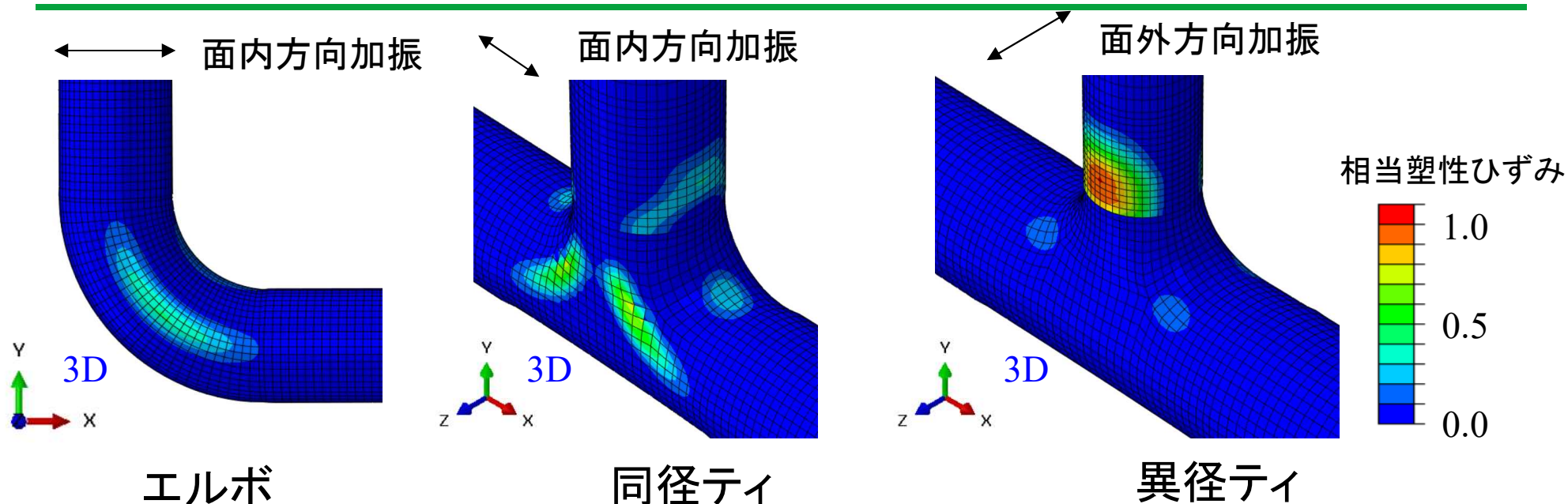
3次元計測モデル



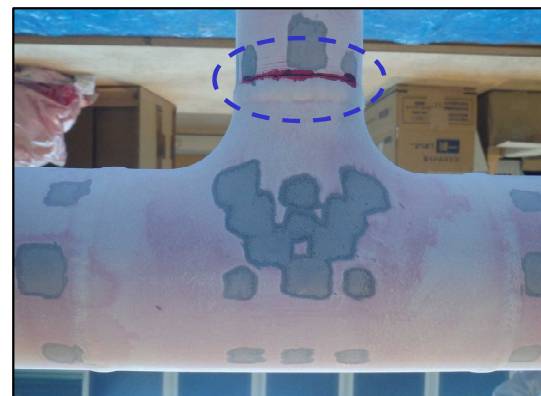
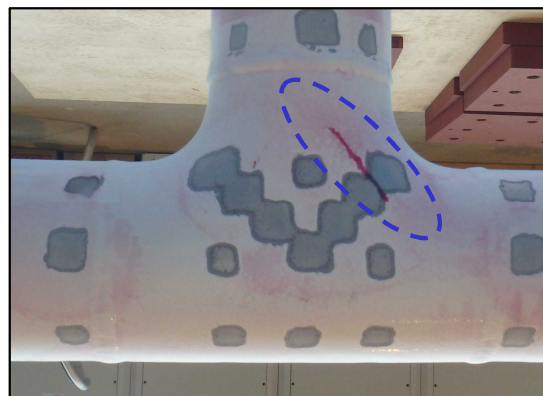
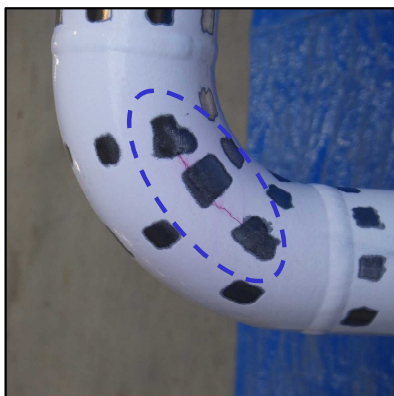
公称肉厚モデル 13



解析結果：相当塑性ひずみ分布(1/2)



3D: 3次元計測モデル



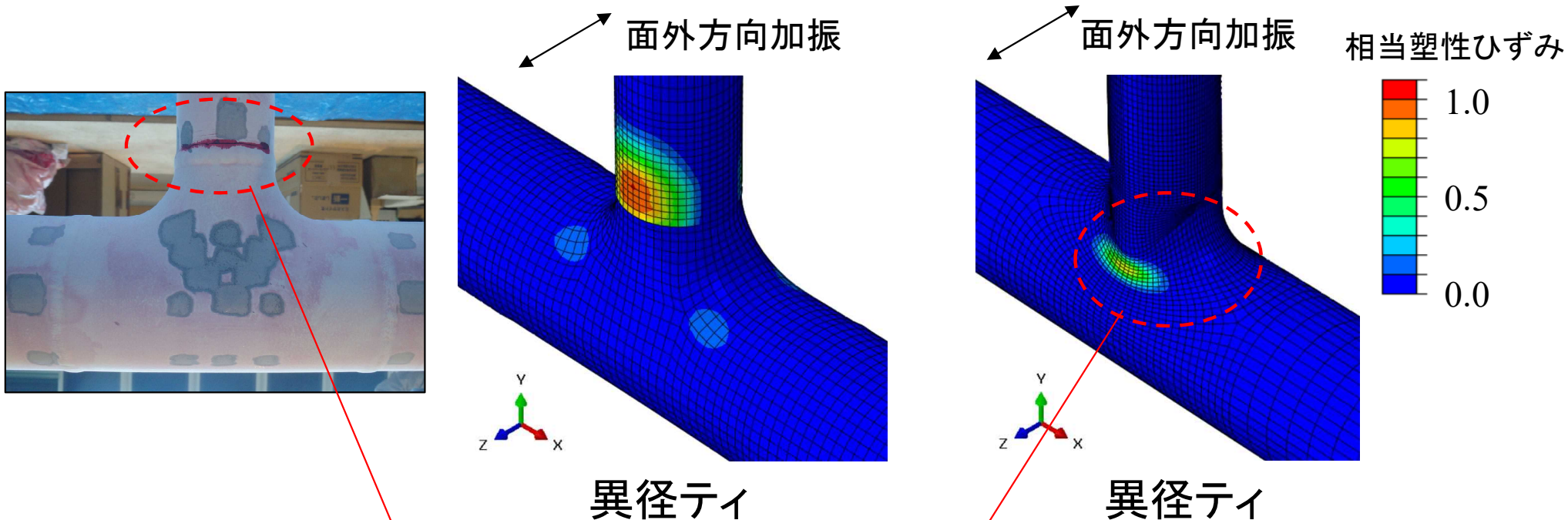
3次元計測モデルの場合、最大ひずみ(相当塑性ひずみ)が発生する位置は、振動試験で貫通亀裂が確認された箇所と良く一致した。



解析結果：相当塑性ひずみ分布(2/2)

3次元計測モデル

公称肉厚モデル



公称肉厚モデル(肉厚一定のモデル)では、最大ひずみ発生位置を精度良く予測することができない。

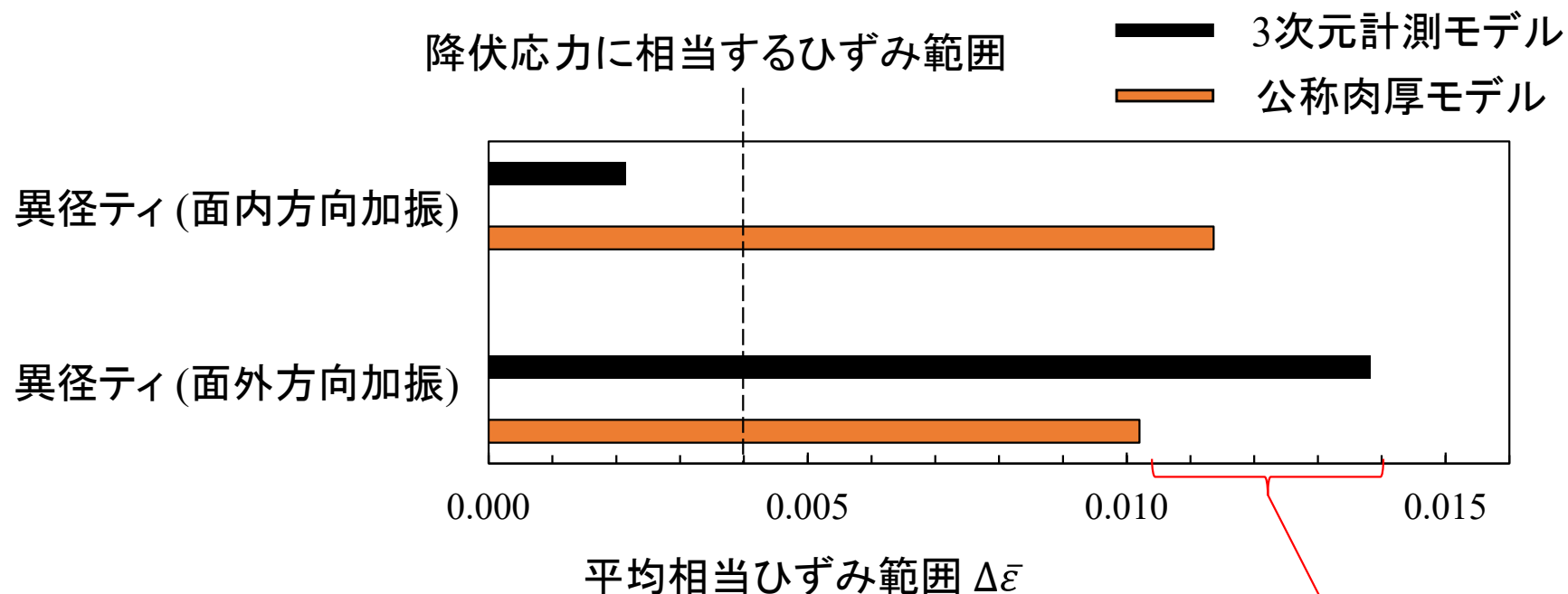


複雑な形状では3次元形状を精度良くモデル化することが重要。



解析結果：相当ひずみ範囲

異径ティの各モデルについて、相当ひずみ範囲の評価を行った。



- 3次元計測モデルと公称肉厚モデルで、ひずみレベルが大きく異なる。
- 公称肉厚モデルは、最大ひずみ発生位置が異なる場合があるため、必ずしも保守的な評価とはならない。



弾塑性FEMで実機の配管系の疲労評価を行う場合には、公称肉厚モデルに大きな誤差があることに留意しなければならない。



結論

結論

- 代表的な配管要素の振動試験の結果、従来の耐震設計手法には、許容応力及び繰返し回数に対して、十分な余裕がある。
- 弾塑性FEMでは、複雑な形状の配管要素の場合、幾何学形状のモデル化方針が、最大ひずみレベルに大きく影響することに留意しなければならない。

今後の研究課題

- 従来耐震設計手法が有する保守性の要因分析
- 有限要素解析による試験結果の一般性の確認



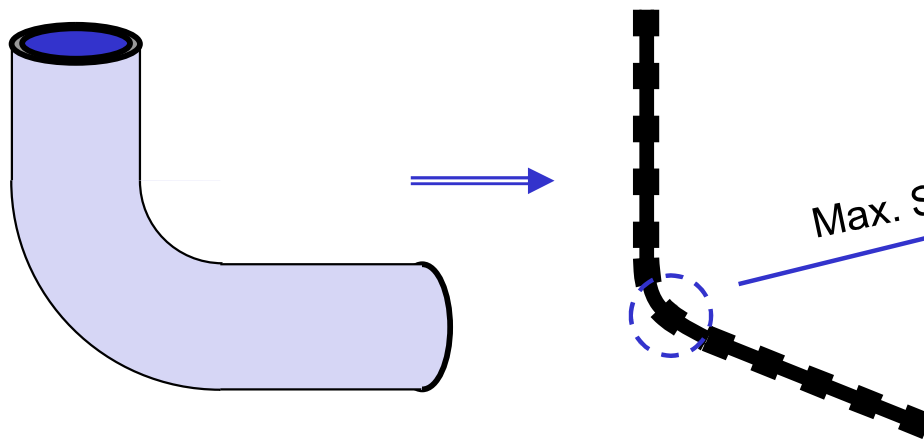
【参考文献】

- Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., “Uncertain factors in elastic-plastic finite element analysis for elbows and tees,” Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference 2023, PVP2023-106166, 2023.
- Azuma, K., Fujiwara, K., Kai, S., Otani, A., Furuya, O., “Design margins of fatigue life of carbon steel elbows and tees subjected to reversing dynamic loads,” Proceedings of the ASME Pressure Vessels & Piping Conference 2024, PVP2024-123304, 2024.
- 財団法人原子力発電技術機構、“平成13年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書その2 配管終局強度”、平成14年
- The Japan Society of Mechanical Engineers, 2019, “Codes for Nuclear Power Generation Facilities, Rules on Design and Construction for Nuclear Power Plant: Alternative Design for Seismic Design of Seismic S Class Steel Piping Based on Elastic-Plastic Response Analysis,” JSME S NC1 NC-CC-008, Tokyo, Japan.

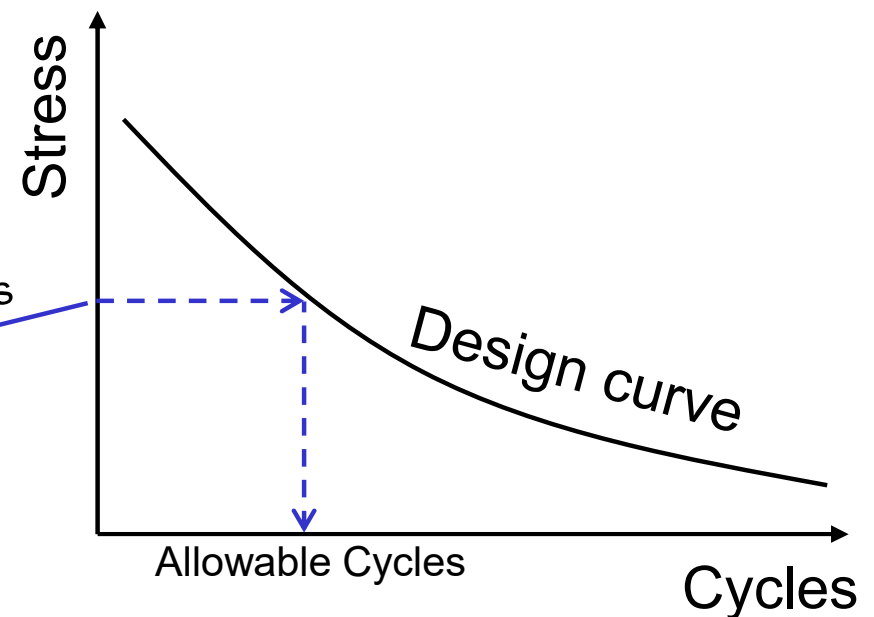


耐震設計における疲労評価

- 配管の耐震設計では、線形梁モデルで発生応力を評価し、設計疲労曲線 (S-N 曲線) に基づいて、対応する許容繰返し数が算出される。
- 疲労損傷に至るまでの繰返し数にはバラツキがあるため、設計疲労評価には応力レベル及び繰返し数の両方に対して、十分な保守性を持たせる必要がある。



Linear beam model



S-N approach



振動試験と解析の比較

- 従来評価手法の保守性の度合いを確認する方法として、振動試験が有効
- 一方、解析と比べて試験体形状・試験ケース数に制限があり、結果の一般性を議論することが難しい。

振動試験

試験の利点	試験の欠点
実耐力を評価可能	試験体形状に制限がある ケース数が制限される

有限要素解析

解析の利点	解析の欠点
現実的な応答を再現可能 モデル形状に制限が少ない 試験よりも容易にケース数を増やせる	解析だけでは実耐力を評価できない



材料特性

Chemical Composition

	C	Si	Mn	P	S
JIS G3456 STPT370 (equivalent to ASTM A106 Grade A)	< 0.25%	0.1 – 0.35%	0.3 – 0.9%	< 0.035%	< 0.035%

Mechanical parameters

		Elbow	Equal tee	Reducing tee
Allowable stress intensity	S_m [MPa]	126	126	126
Yield stress				
• Design value	S_y [MPa]	215	215	215
• Mill test certificate	σ_y [MPa]	280	384	294
Ultimate tensile strength				
• Design value	S_u [MPa]	370	370	370
• Mill test certificate	σ_u [MPa]	443	478	448
Young's modulus	E [GPa]	203	203	203



Elbow



振動特性

	Elbow	Equal tee	Reducing tee
Direction	In-plane	In-plane	Out-of-plane
Natural frequency [Hz]	19.7	18.6	17.4
Damping ratio	0.0041	0.0037	0.0025

