

配管の現実的耐力評価のための 弾塑性有限要素解析を用いた疲労亀裂進展評価 手法の検討

2023年5月18日(木)

技術基盤グループ 地震・津波研究部門

東 喜三郎

本報告資料は、基盤Gにおける人材育成の取り組みの一環として、報告者が海外研究機関にて実施した研究の内容をまとめたものです。

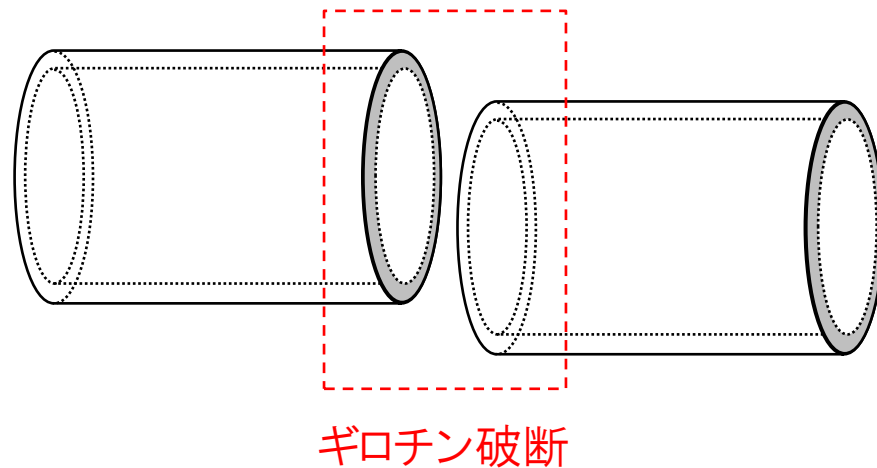
渡航期間: 2021年9月～2022年9月

渡航先: 英国、ブリストル大学(有限要素解析、疲労試験)

フランス、ラウエ・ランジュバン研究所(中性子回折試験)

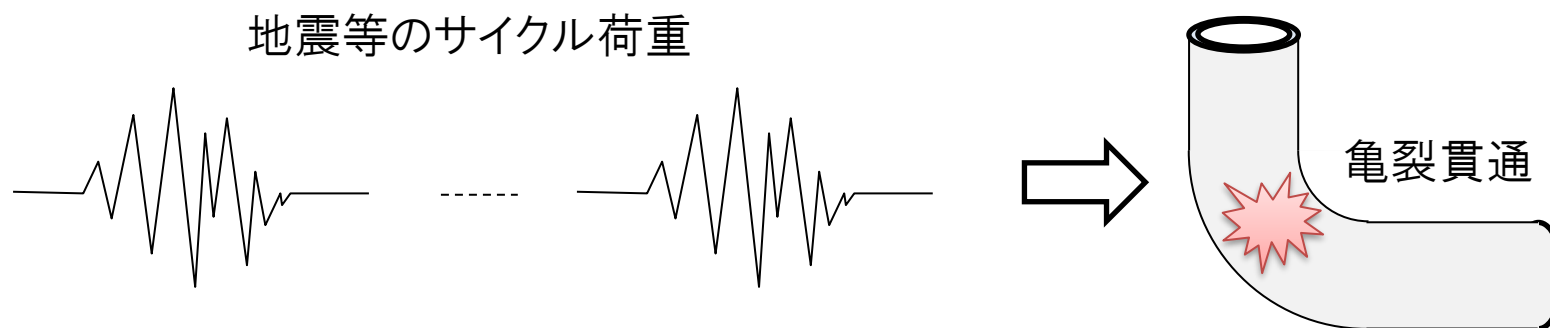
本研究の遂行においては、ブリストル大学のH. E. Coules講師及びM. A. Probert氏、並びにラウエ・ランジュバン研究所のT. Pirling氏及びS. Cabeza氏に多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

- 原子力規制検査で定める検査指摘事項の重要度評価では、可能な範囲でPRAによる計算結果等の定量的なリスク情報(例えば、炉心損傷頻度(CDF)等)を活用することが求められる。
- 特に配管は安全上重要なシステム・機器の構成部品であり、原子力施設で使用される数も膨大であることから、適切にフラジリティを評価することが重要である。
- 従来の地震PRAは、配管の損傷モードとして塑性崩壊からのギロチン破断を想定し、地震時に発生する応力に基づいて損傷を評価する手法が広く用いられている。この手法は概して保守的な評価となるものの、実際の地震時の配管の損傷モードとは異なることが指摘されている[1]。



配管の疲労損傷に係る国内の研究動向

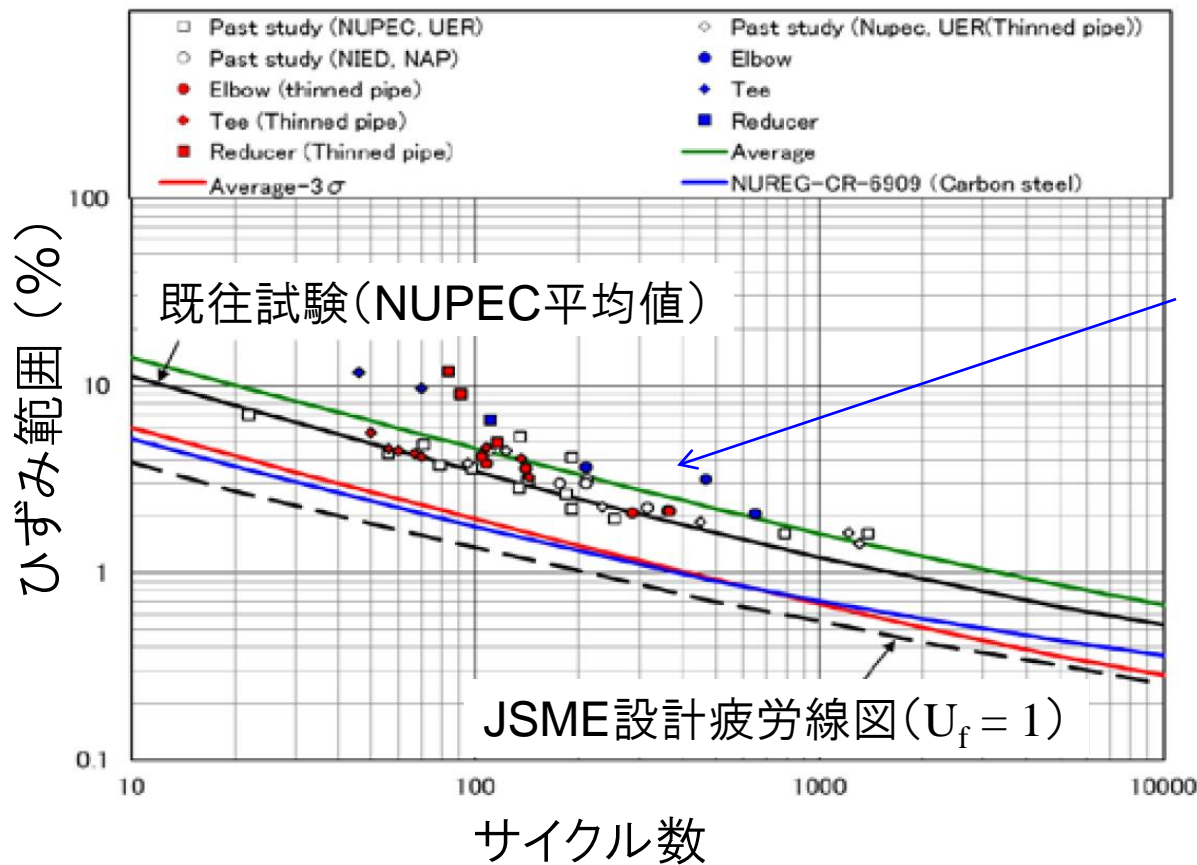
- 一般に既設プラントの配管系は、過去の地震や累積的な運転影響による疲労損傷が問題になりやすい。
- 疲労損傷の形態は、低サイクル疲労*と高サイクル疲労**に分類される。このうち低サイクル疲労は、地震荷重を受ける配管の主要な損傷モードであることが、過去の振動試験で確認されている。
- 近年、国内の学協会では、地震時の配管の現実的な損傷モードを低サイクル疲労であると想定して、耐震設計やリスク評価を行う手法が提案されている [1-3]。



*低サイクル疲労：塑性ひずみが生じるような10,000回程度以下の繰り返し荷重で、亀裂が発生・貫通する現象

**高サイクル疲労：10000回程度を超える繰り返し荷重で、弾性域であっても亀裂が発生・貫通する現象

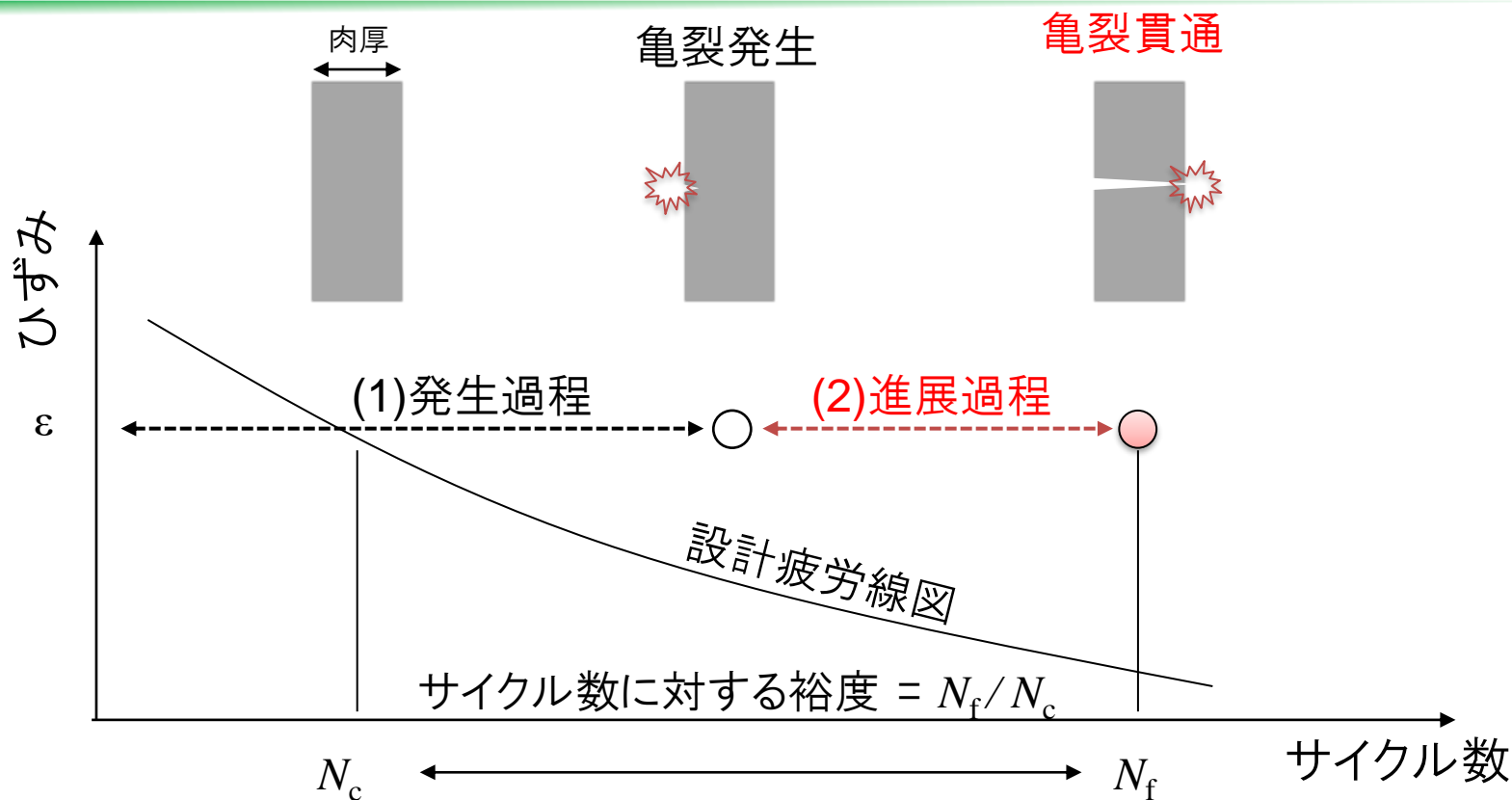
S-N曲線に基づく配管の疲労評価研究の例



想定されるバラツキの要因

- 形状の影響 (肉厚の違いなど)
- 荷重形態の違い
- 材料物性
- モデル化の方法
- パラメータの取り方

- 疲労評価では、S-N曲線(サイクル数とひずみ範囲の関係)に基づいて、設計疲労線図を超えない(疲労累積係数 $U_f < 1$ である)ことが確認される。
- 既往の配管要素の振動試験結果[4]から、設計疲労線図には損傷までに一定の裕度がある。しかし、試験結果にはバラツキがあり、その要因は明らかではない。



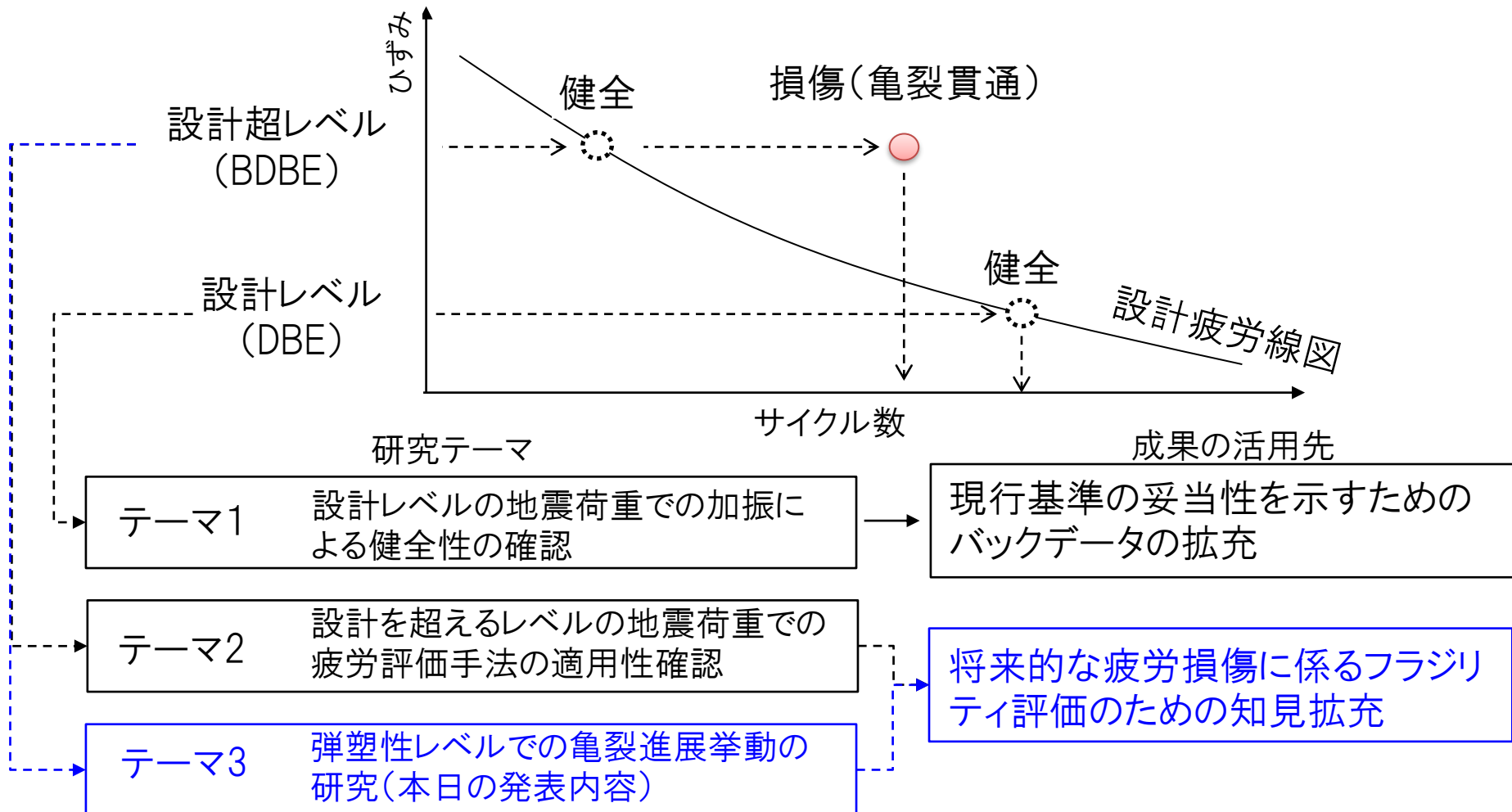
- 配管試験体のS-N曲線は亀裂貫通までのサイクル数を表すことが多い。従って、S-N曲線には(1)亀裂発生過程と(2)亀裂進展過程が含まれている。
- 後者(2)の過程では、必要なサイクル数が肉厚によって大きく異なる。

⇒ 後者(2)の過程の亀裂進展速度を明らかにすることは、疲労損傷メカニズムを理解し、配管の現実的耐力を予測する上で有用である。

プロジェクトの全体概要

地震・津波研究部門では、配管の疲労損傷に係る知見を拡充するため、以下の3つのテーマの研究を実施している。

本日は、中長期の研究テーマとして、報告者が英国ブリストル大学にて実施した研究の内容を報告する。(テーマ3)



課題と目的

着眼点

- 低サイクル疲労荷重下の亀裂進展速度の推定は、疲労損傷メカニズムを理解し、配管の現実的耐力を予測する上で有用である。



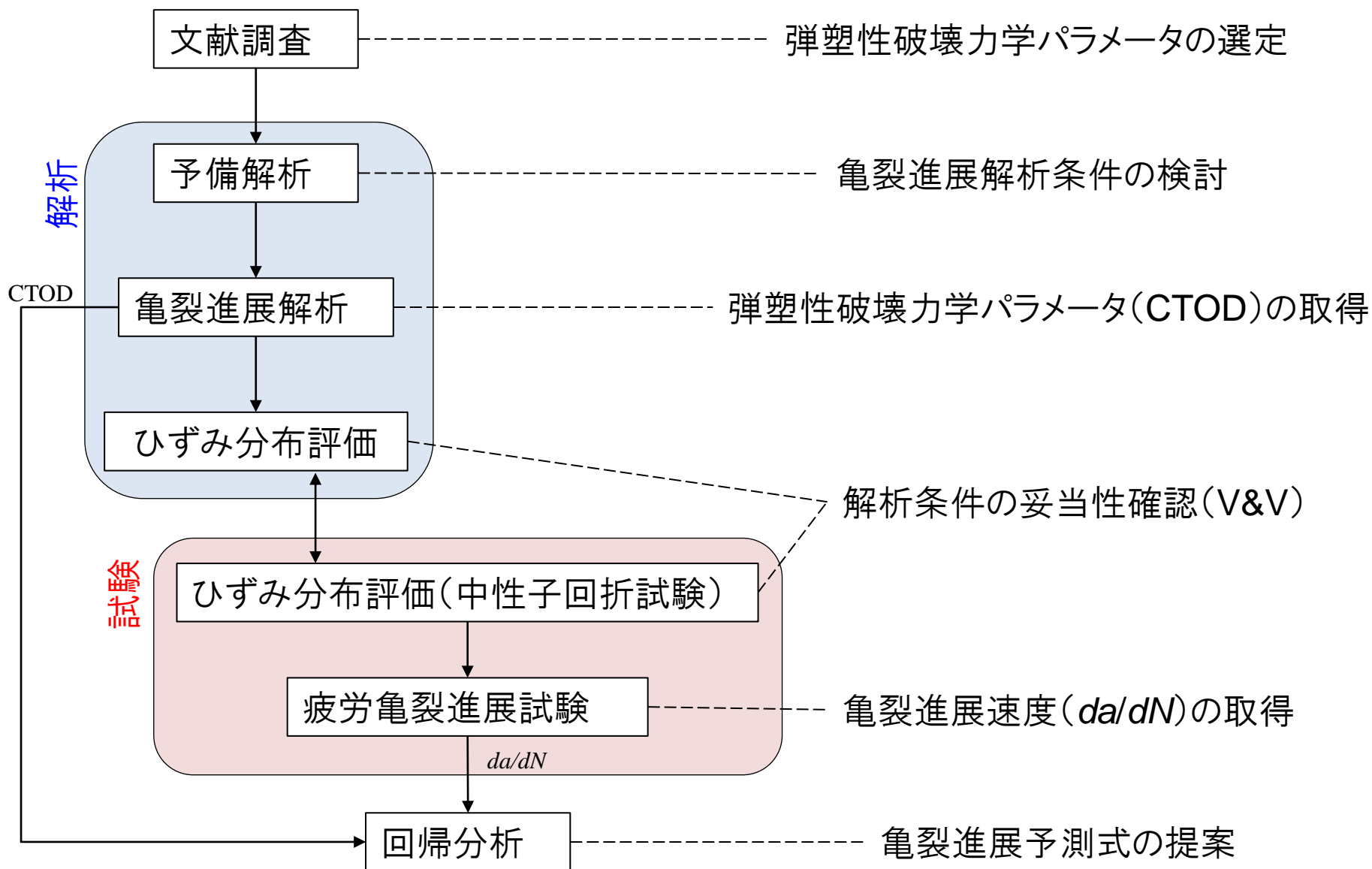
課題

- 配管要素試験体で亀裂発生の有無を観測することが困難であるため、従来試験では亀裂進展過程がどの程度疲労寿命に寄与しているのか明らかにされていない。
- 低サイクル疲労荷重下の亀裂進展を評価するための評価手法(弾塑性破壊力学手法)が確立されていない。

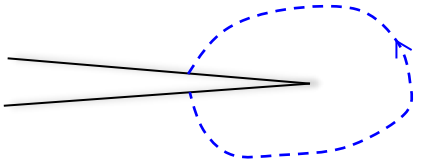
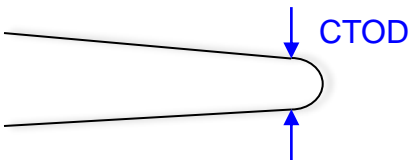


目的

- 弾塑性破壊力学に基づいて、炭素鋼の低サイクル疲労荷重下の亀裂進展過程を詳細に模擬し、その進展速度を予測する手法を提案する。



代表的な弾塑性破壊力学パラメータ

	J積分	亀裂先端開口変位(CTOD)
	 <p>亀裂成長に伴うポテンシャルエネルギーの解放率</p>	 <p>亀裂先端の開口量</p>
長所	<ul style="list-style-type: none"> 線形破壊力学(応力拡大係数K)との類似性が多く、扱いやすい。 汎用FEMソフトで容易に算出できる。 	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂閉口挙動*を表現することができる。 亀裂進展解析を連続的に行うことで、負荷履歴の効果を取り入れることが可能。 通常の矩形のメッシュで解析可能なため、亀裂進展解析が比較的容易。
短所	<ul style="list-style-type: none"> 亀裂閉口挙動*を表現するためには経験式に基づく補正が必要[5]。 特別なFEMメッシュ形状が必要なため、亀裂進展解析が困難。 	<ul style="list-style-type: none"> J積分に比べると、FEMで算出することが容易でない。



CTODを用いることで、繰り返し荷重下の亀裂閉口挙動*及び負荷履歴の効果をも適切に取り入れて亀裂進展を評価することができると考えられる。

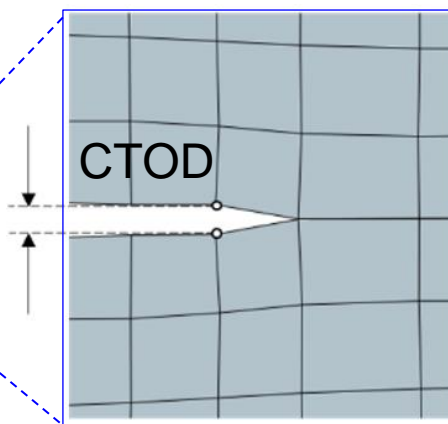
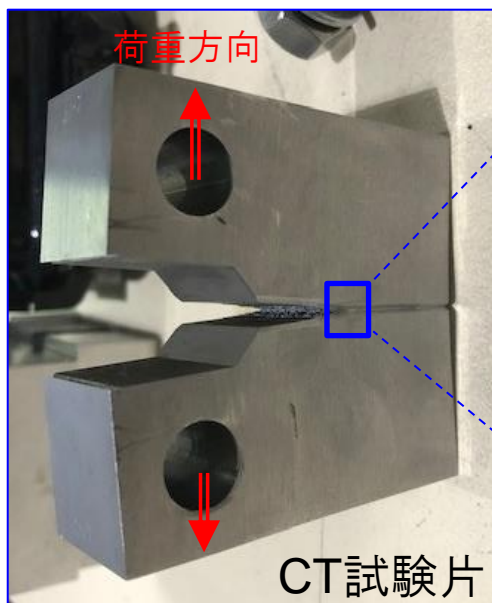
*亀裂閉口挙動: 引張・圧縮サイクル荷重下で亀裂が閉じる現象。亀裂が閉じている間は亀裂が進展しないと考えられているため、この挙動のモデル化が亀裂進展量に大きく影響する。

弾塑性破壊力学パラメータの選定(2/2)

- 近年の研究により、サイクル荷重下の亀裂先端開口変位の変動範囲($\Delta CTOD$)を弾性成分($\Delta CTOD_e$)と塑性成分($\Delta CTOD_p$)に分類した場合、 $\Delta CTOD_p$ は亀裂進展量との間に強い相関があることが報告されている。
- 国内の原子力施設で広く用いられる炭素鋼材料においても、 $\Delta CTOD_p$ は亀裂進展の支配的なパラメータになる可能性がある。



本研究では、有限要素解析(FEM)によって亀裂進展過程を模擬し、 $\Delta CTOD_p$ を算出することを試みる。

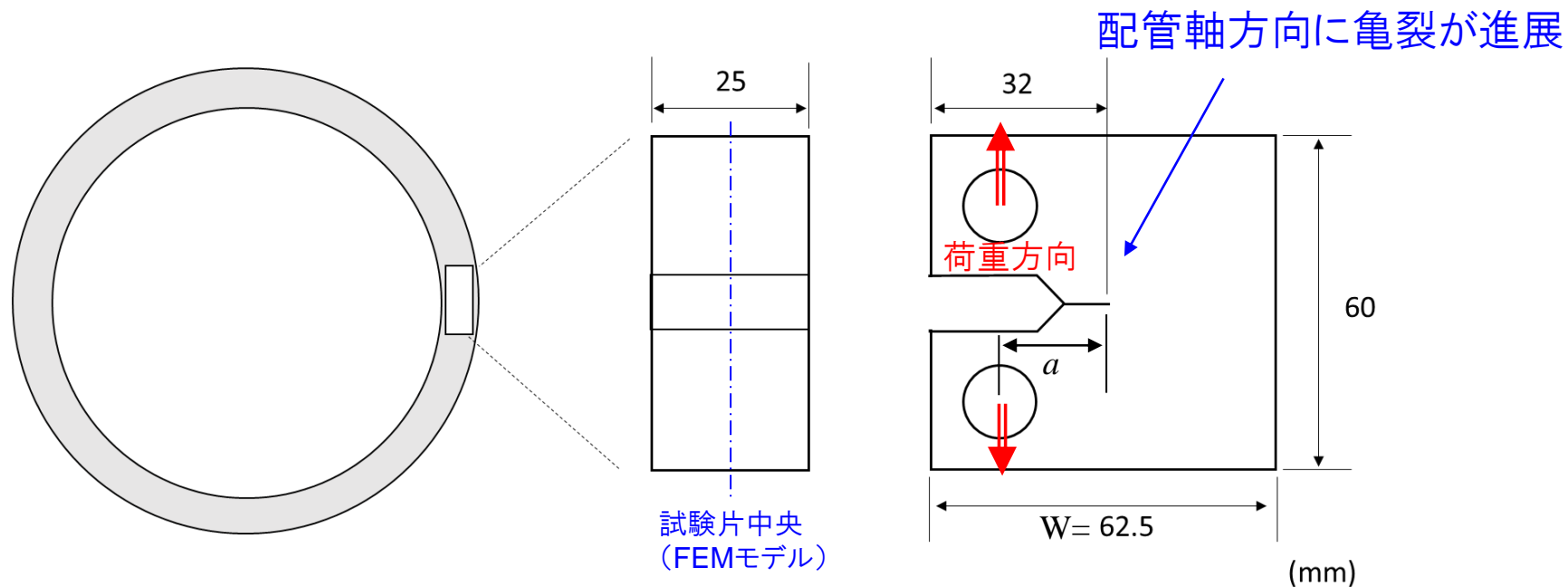


亀裂近傍の FEMモデル



亀裂進展解析(1/5) - FEMモデルの作成

- 本研究では、中性子回折試験の実績があるCT試験片を対象とした。
- 炭素鋼配管から切り出した試験片を用いて、引張試験及び繰返しひずみ試験を実施し、FEMに用いる材料物性を決定した。



JIS G3456 STPT370配管

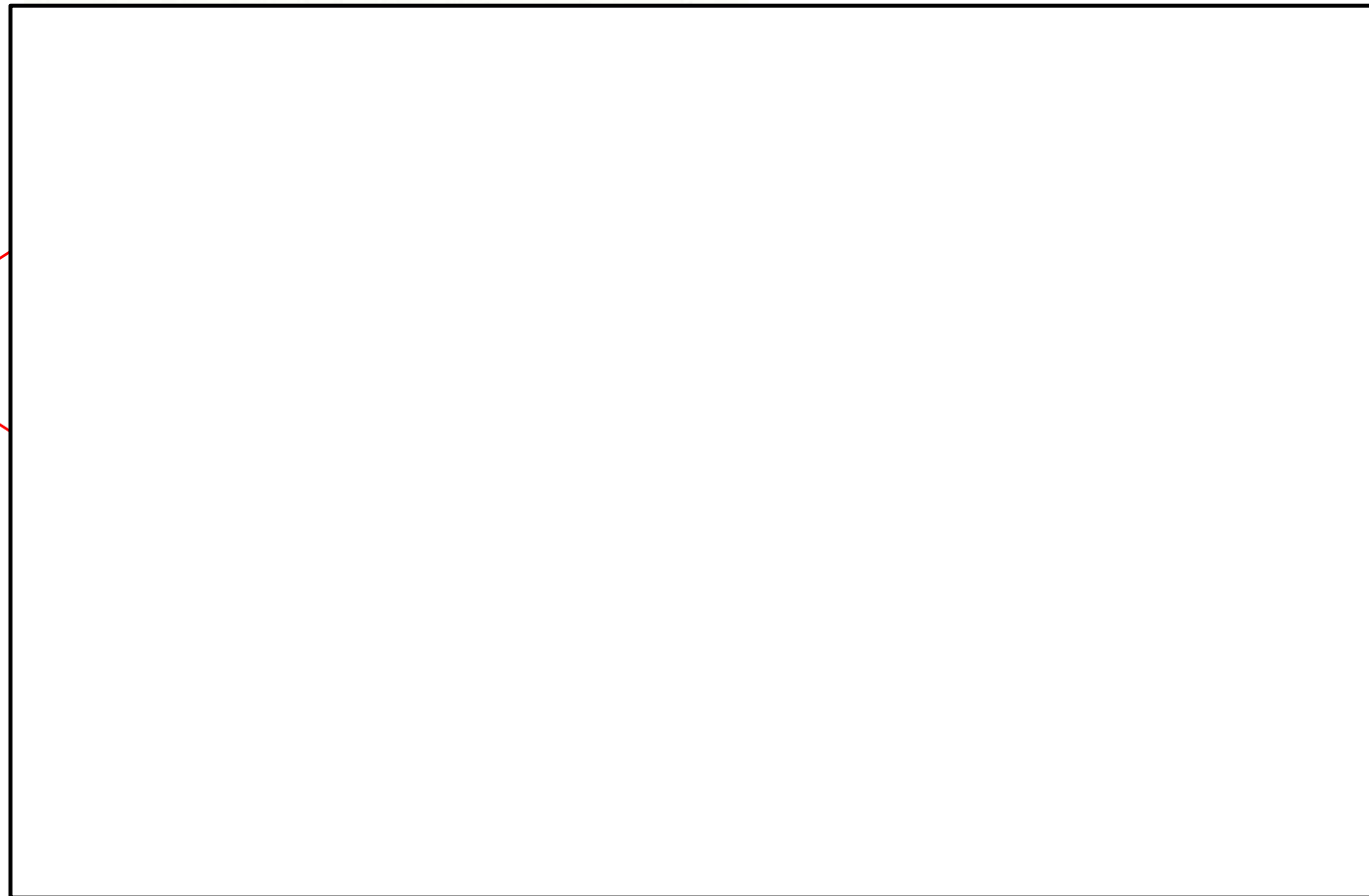
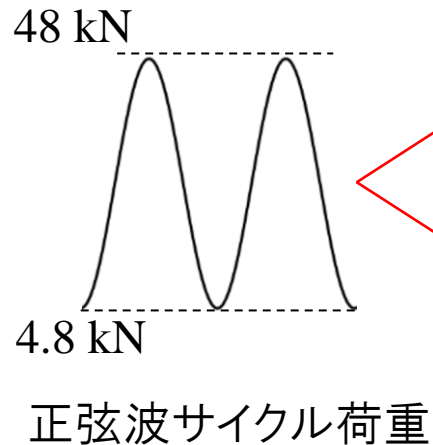
C(T)試験片

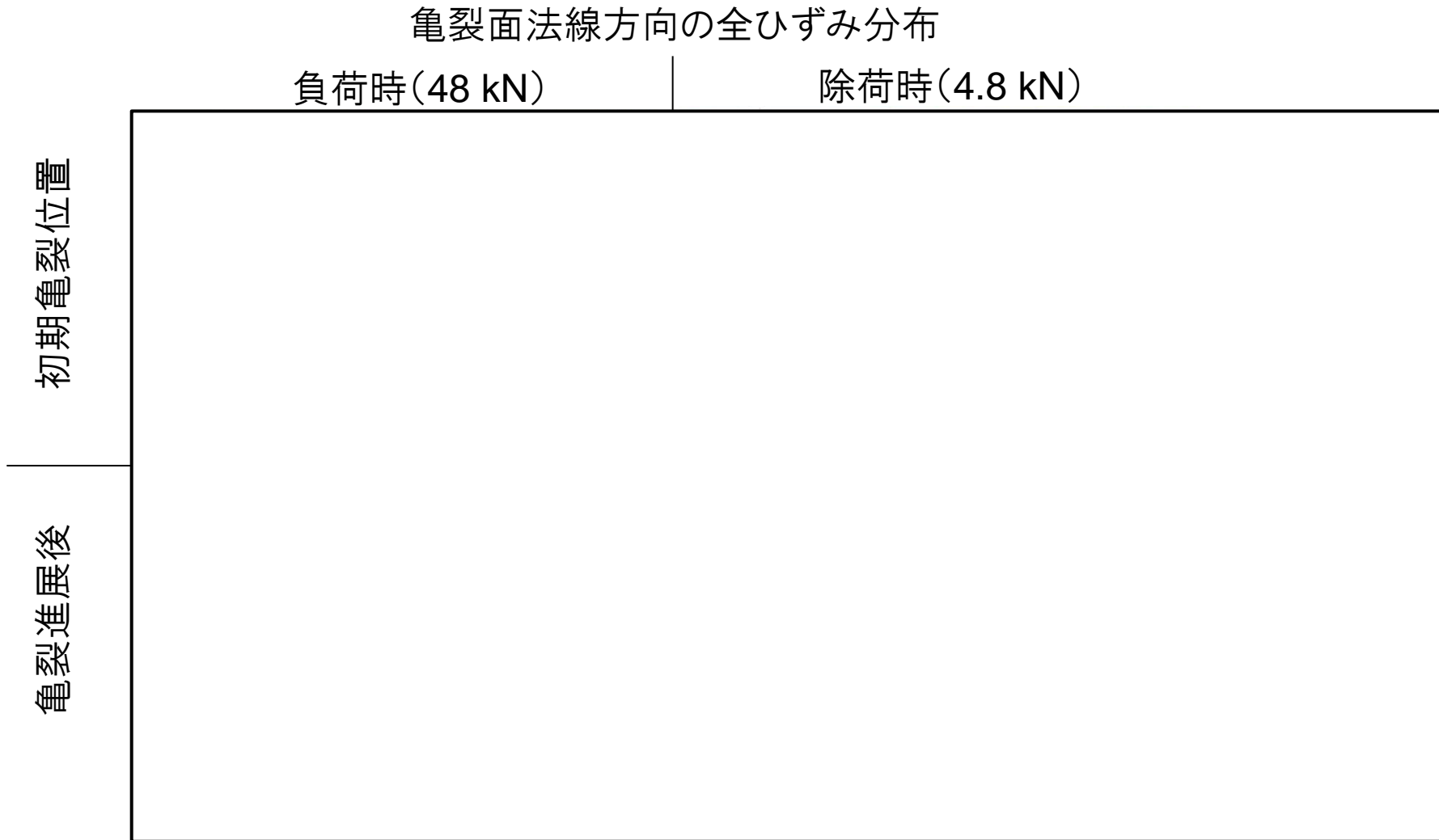
材料物性(Chabocheの複合硬化モデル)

E (GPa)	ν	σ_y^0 (MPa)	Q_∞ (MPa)	b	C_1 (MPa)	γ_1	C_2 (MPa)	γ_2
207	0.3	205	111	8.6	24795	285	4100	1

亀裂進展解析(2/5) - FEMメッシュの例

- 亀裂が最も進展しやすい試験片中央断面を対象に、平面2次元のFEMモデルを作成した。
- 既往研究を参考に、弾塑性挙動を表現する上で十分に詳細なFEMメッシュを作成した。(メッシュサイズが亀裂前縁で50 μ m程度)

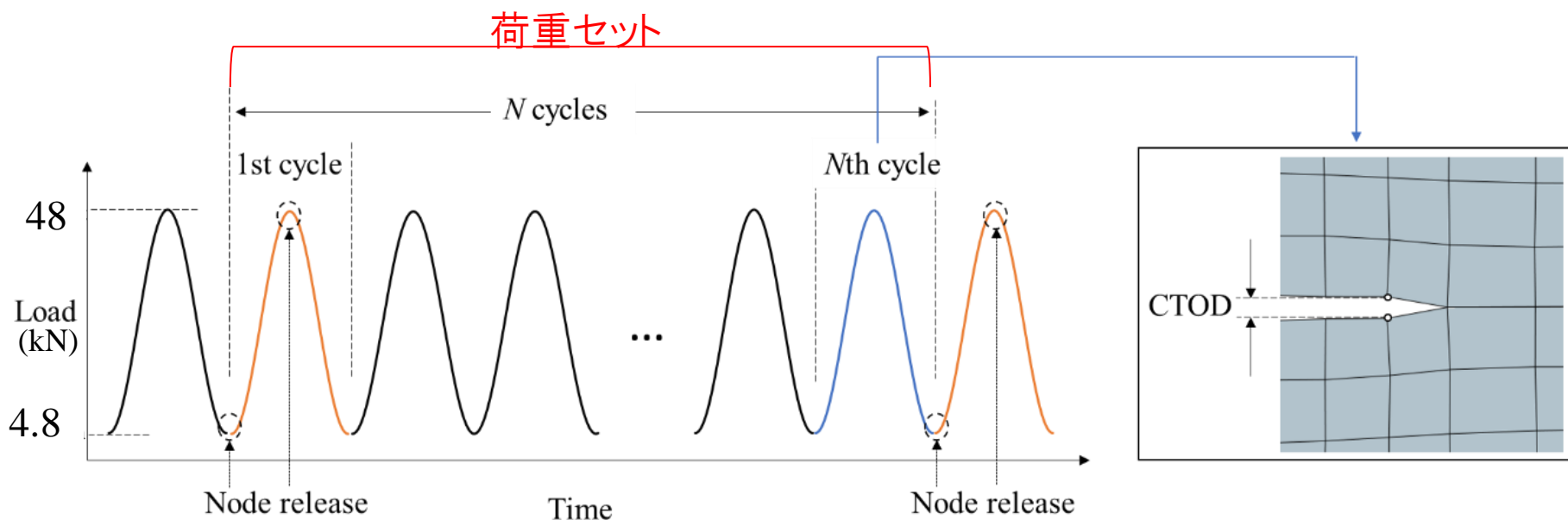




- 弾塑性レベルの亀裂進展では負荷履歴の影響が無視できないため、進展過程を含めて模擬し、その影響を適切に反映する必要がある。

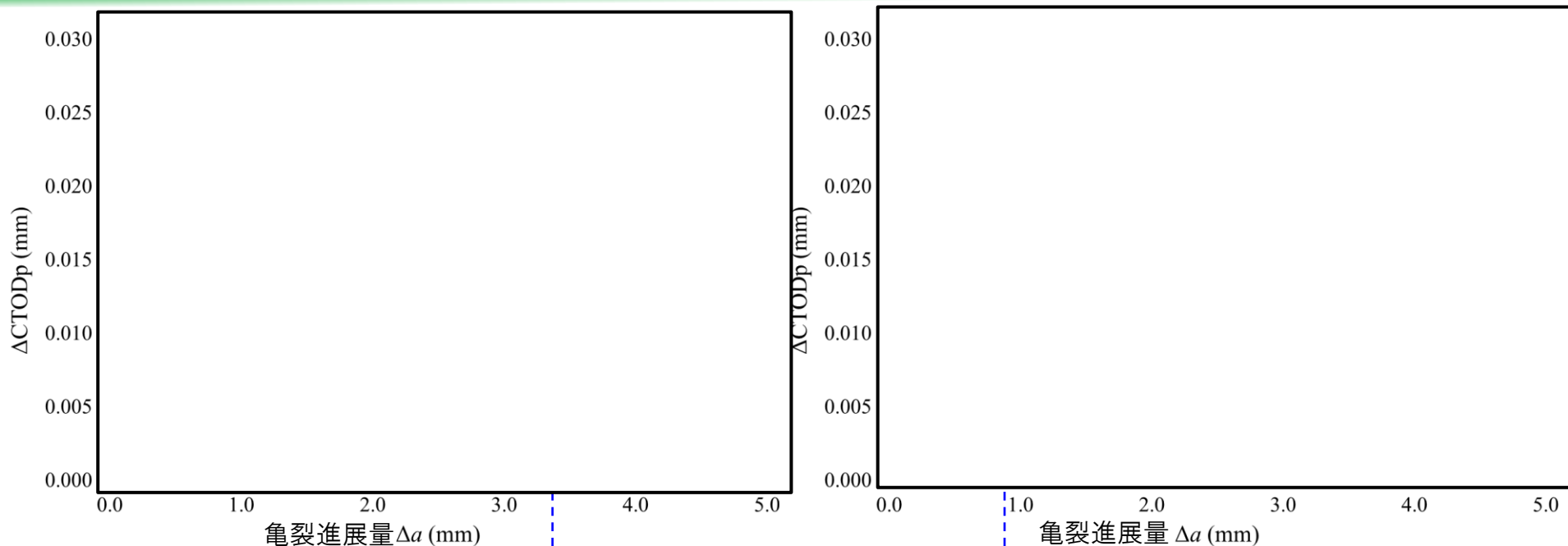
亀裂進展解析(4/5) - 亀裂進展評価モデルの検討

- 亀裂進展解析では、各荷重セット毎に亀裂先端の節点を切り離すことで、亀裂進展を模擬した。
- 亀裂進展解析を進めるにあたって、はじめに各節点を切り離す際の荷重レベルと荷重サイクル数(N)がCTODの計算値に与える影響を調べた。



計算条件	初期亀裂長さ/試験片幅比 a/W	0.45
	最大荷重 P_{\max}	48 kN
	最小荷重 P_{\min}	4.8 kN
	$R = P_{\min}/P_{\max}$	0.1 (片振り振幅)

亀裂進展解析(5/5) -各評価モデルの比較



- 20サイクル(N=20)で $\Delta CTOD_p$ は十分に収束する。

- 節点を切り離す際の荷重レベルは $\Delta CTOD_p$ に影響しない。
- 最終荷重セット(CTODを算出する荷重セット)のみ20サイクルとれば、途中のサイクル数は問題にならない。

本研究では、進展解析中のサイクル数は5サイクル以下とし、最終サイクルのみ20サイクル加えることとする。また、最小荷重で節点を切り離す手法を採用する。

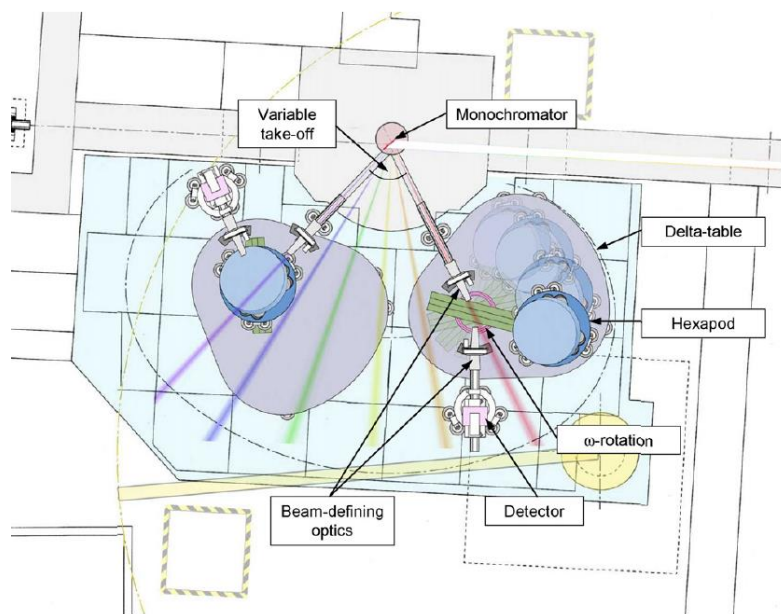
この方法により負荷履歴の影響を適切に反映して、 $\Delta CTOD_p$ の評価できると考えられる。

ひずみ分布評価(1/2) - 中性子回折試験

- 従来ひずみ評価手法の多くは、部材表面を対象とするため、材料内部の情報を得ることができない。
- 一方で、中性子は金属材料であっても表面から数cm程度まで貫通するため、中性子回折法であれば、荷重時に生じる格子面間隔 d の変化に基づき、材料内部の弾性ひずみ分布を観測できる。

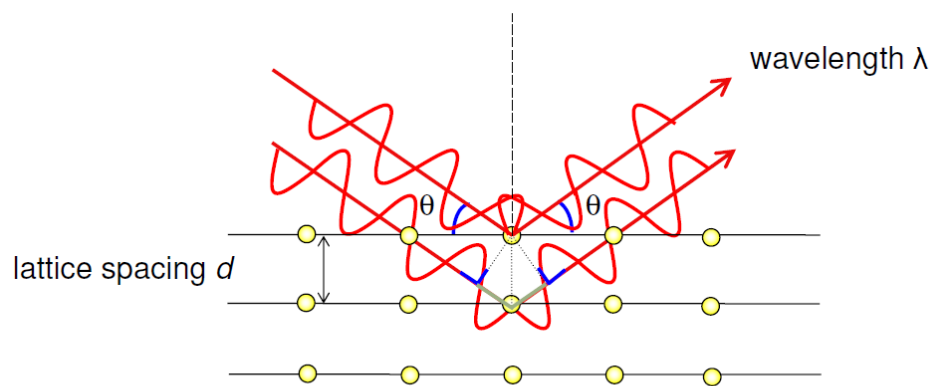


本研究のように構造物内部の変形を問題にする場合は、中性子回折法が有効



中性子回折試験装置の例[6]

The Bragg law



The Bragg law $2d \sin\theta = n\lambda$

格子面間隔と中性子の波長の関係

ひずみ分布評価(2/2) -弾性ひずみ分布の比較

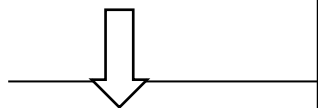
中性子回折試験

FEM

亀裂進展前

$$a/W=0.45$$

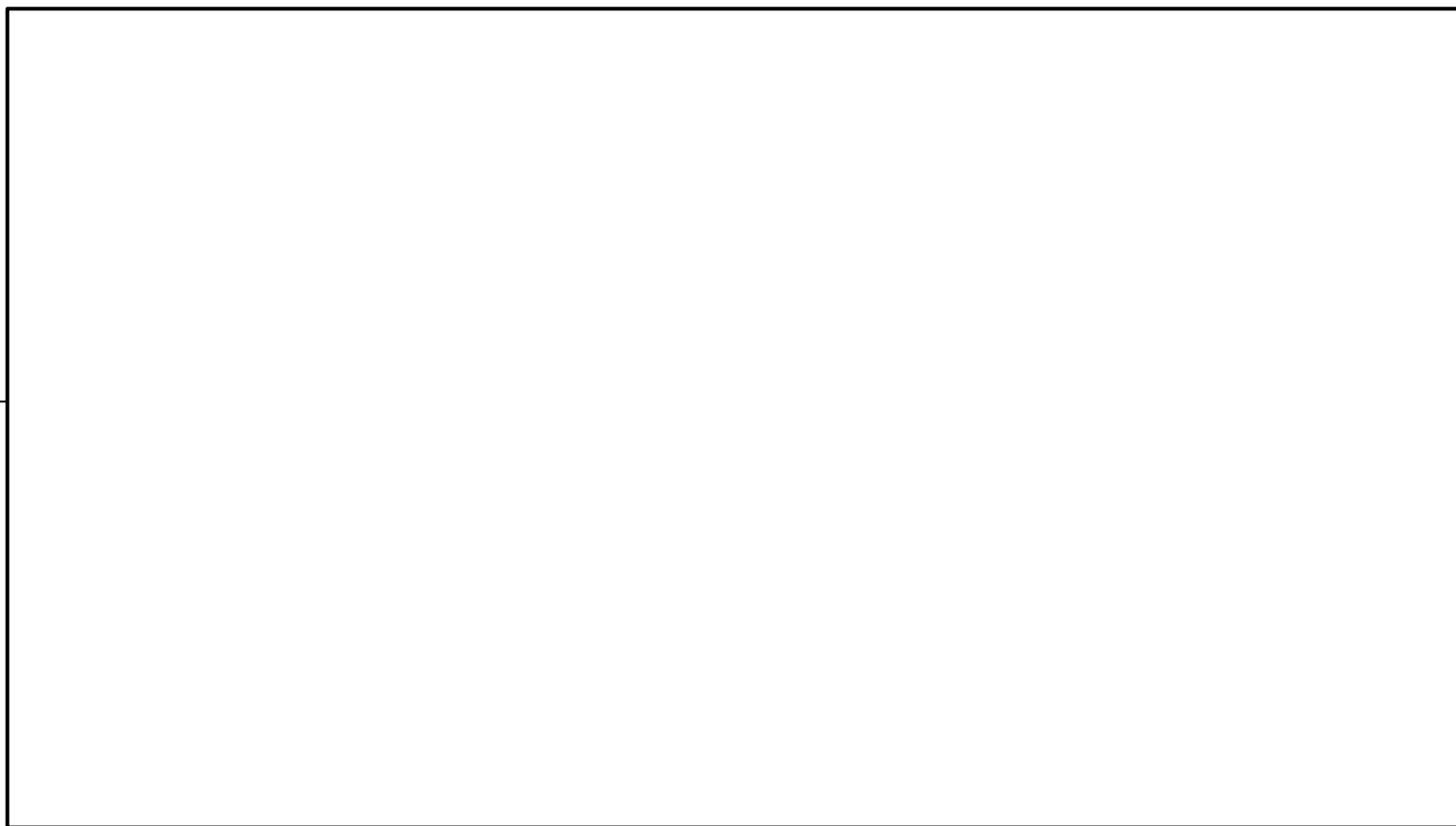
$$P=48 \text{ kN}$$



亀裂進展後

$$a/W=0.54$$

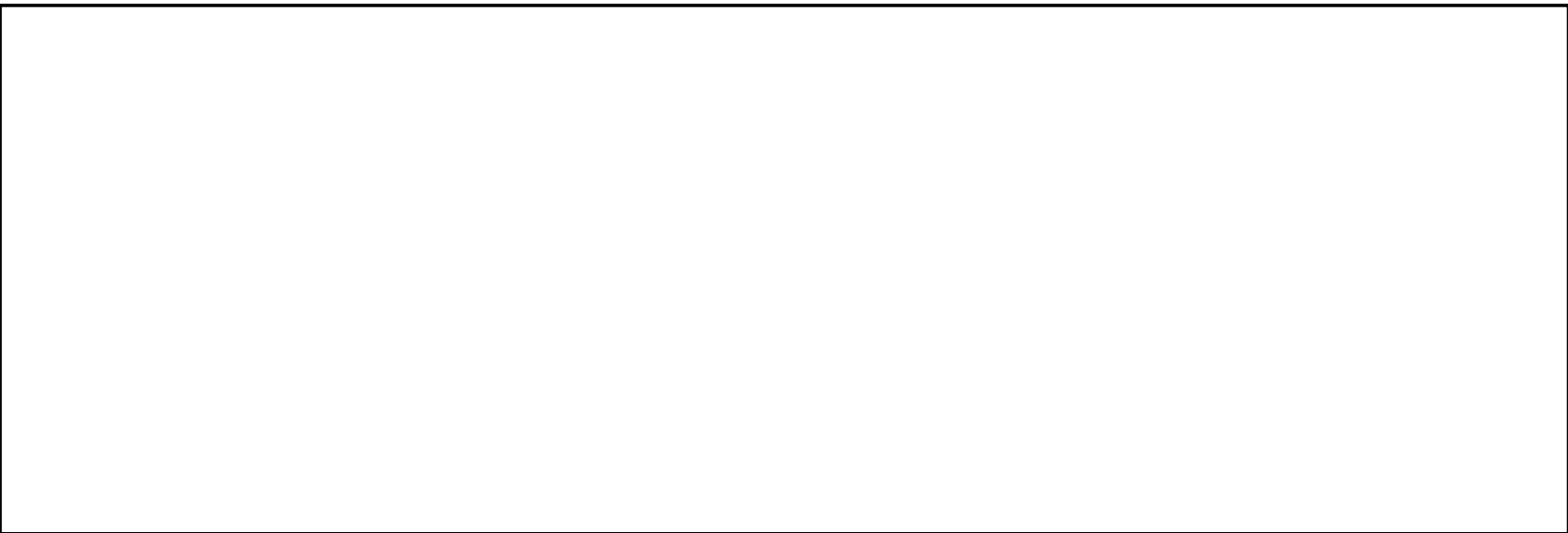
$$P=48 \text{ kN}$$



- FEMは、引張応力場を良く再現しており、亀裂進展時の材料内部(試験片中央断面)のひずみ状態を適切に表現できていることを確認した。
- 一方、FEMは亀裂先端後方の圧縮ひずみを過大評価する傾向があるため、両振り試験(圧縮を含むサイクル)への適用性は、今後慎重に検討する必要がある。

疲労亀裂進展試験

- CT試験片に、片振り試験条件で正弦波のサイクル荷重($R = 0.1$ 、 1.0 Hz)を加え、亀裂を進展させた。
- 亀裂進展試験後、亀裂面を観察するため、試験片を液体窒素(-196°C)で冷却し、破断させた。
- 破断面を光学顕微鏡で観察し、亀裂進展試験前後の亀裂長さを計測した。



CT試験片(試験前)

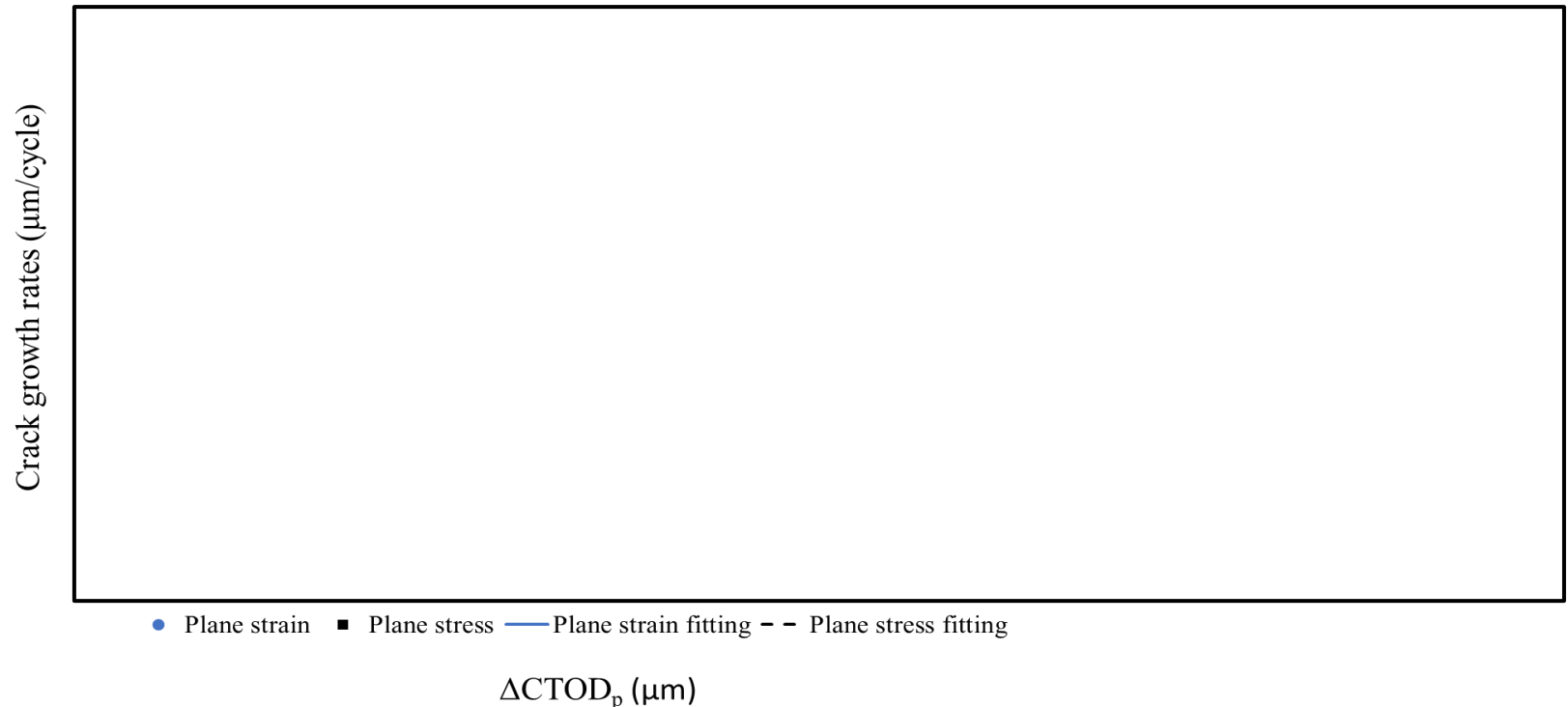
疲労亀裂進展試験

破断面

光学顕微鏡

回帰分析

- 平面ひずみ状態及び平面応力状態を仮定した2次元FEM解析で、それぞれ $\Delta CTOD_p$ を算出した。
- 続いて、対応する亀裂長さ及び荷重条件における亀裂進展速度の試験データをプロットした。



- $\Delta CTOD_p$ と亀裂進展速度には強い相関があることを確認した。
- 今回作成した回帰式を用いることで、 $\Delta CTOD_p$ の計算値から、低サイクル疲労荷重下の亀裂進展を予測できる可能性があることが示された。


疲労試験結果のバラツキの要因を明らかにするため、疲労亀裂進展過程に着目し、低サイクル疲労荷重下の亀裂進展速度を予測する手法を提案した。

- 地震荷重のような引張・圧縮を含む荷重サイクル下の亀裂進展を適切に評価するためのパラメータとして、 $\Delta CTOD_p$ に着目した。
- 炭素鋼を対象とした亀裂進展解析において、 $\Delta CTOD_p$ の収束値を算出するための手法を提案した。
- 中性子回折試験を行い、本研究で提案する亀裂進展解析手法が亀裂進展時の引張応力場を適切に表現できることを確認した。
- $\Delta CTOD_p$ は疲労亀裂進展速度と強い相関があり、 $\Delta CTOD_p$ から低サイクル疲労荷重下の亀裂進展速度を予測できる可能性があることを示した。

今後の課題

今回の評価では、圧縮応力場のひずみ分布を過小評価する傾向が見られた。限られた材料試験データに基づいてFEMモデルを作成したことが影響した可能性があるため、今後、材料物性(複合硬化則)の影響を分析する。

1. 電力中央研究所、“原子力発電所の配管系の地震フラジリティ評価における損傷モードと評価方法の影響”、2021
2. 日本機械学会、“弾塑性応答解析に基づく耐震Sクラス配管の耐震設計に関する代替規定”、NC-CC-008、2019
3. 電気協会、“原子力発電所耐震設計技術規程”、JEAC4601-2021、2021
4. M. Arai, et al., “Investigation on Method of Elasto-Plastic Analysis for Piping System Made of Stainless Steel: Secondary Benchmark Analysis,” PVP2017-65341, 2017
5. R. C. McClung, C. George, Marshall Space Flight Center. “Development of a practical methodology for elastic-plastic and fully plastic fatigue crack growth “, National Aeronautics and Space Administration, Marshall Space Flight Center, 1999.
6. T. Pirling, G. Bruno, P. J. Withers, SALSA—A new instrument for strain imaging in engineering materials and components, Materials Science and Engineering: A, Volume 437, Issue 1, 2006, Pages 139-144, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.083>.



ご清聴ありがとうございました。

英国ブリストル近郊で撮影