

# ナノスケール現象をも取り入れた 人工物デジタルツインの構築

東京大学大学院工学系研究科 システム創成学専攻

沖田 泰良

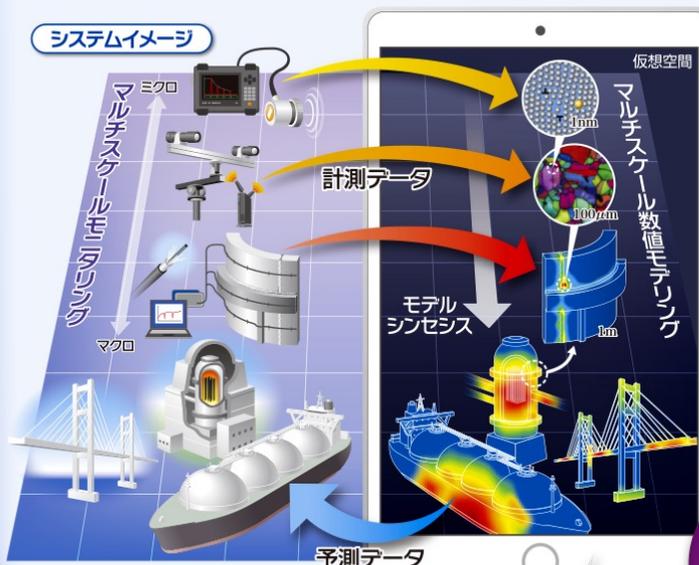
# 次世代人工物システム

人工物デジタルツインによる予測により、人工物の安全・高効率な運用と、将来に向けた新たな価値の創造を実現する人工物システム

## 人工物デジタルツインとは

- 実機における検査・モニタリングデータから、数値モデルをマルチスケール的に随時送信
- 数値モデルシミュレーションによる精緻な仮想実機を構築

### システムイメージ



### 画期的な設計技術の推進と迅速な標準化への活用

- 大胆な設計思想変更への明確な判断材料の提供
- 標準化活動迅速化



競争力強化で強い社会を実現

### レジリエンス性評価と災害に強い技術の開発と蓄積

- ストレステスト+リスク低減
- 過酷状況(自然災害)時のシステム構造変化を瞬時把握



次世代防災技術開発への発展

迅速な新しい価値の提案

仮想シミュレーション

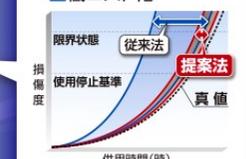
持続的な社会の変化と発展

活用と検証

データ・技術の蓄積

### 現有設備メンテナンス・運用への活用

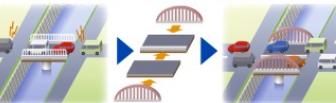
- 検査・運用の最適化
- 低コスト化



最適運用技術・ノウハウの構築

### 巨大構造物への可塑性付与と次世代構造物への新提案

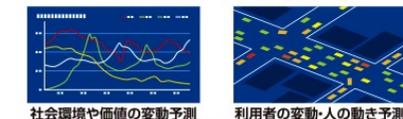
- 予測される社会構造・需要の変化に応じた巨大構造物の形態変化の先取り



現有設備の継続的な発展と利用・次世代構造物への新提案

### 人の動きや価値の変動まで含めた緻密な仮想空間シミュレーション

- 実測データから構築した仮想空間で、人や社会の動きや価値変動まで含めた予測を行う



迅速かつ信頼性の高い予測の実現

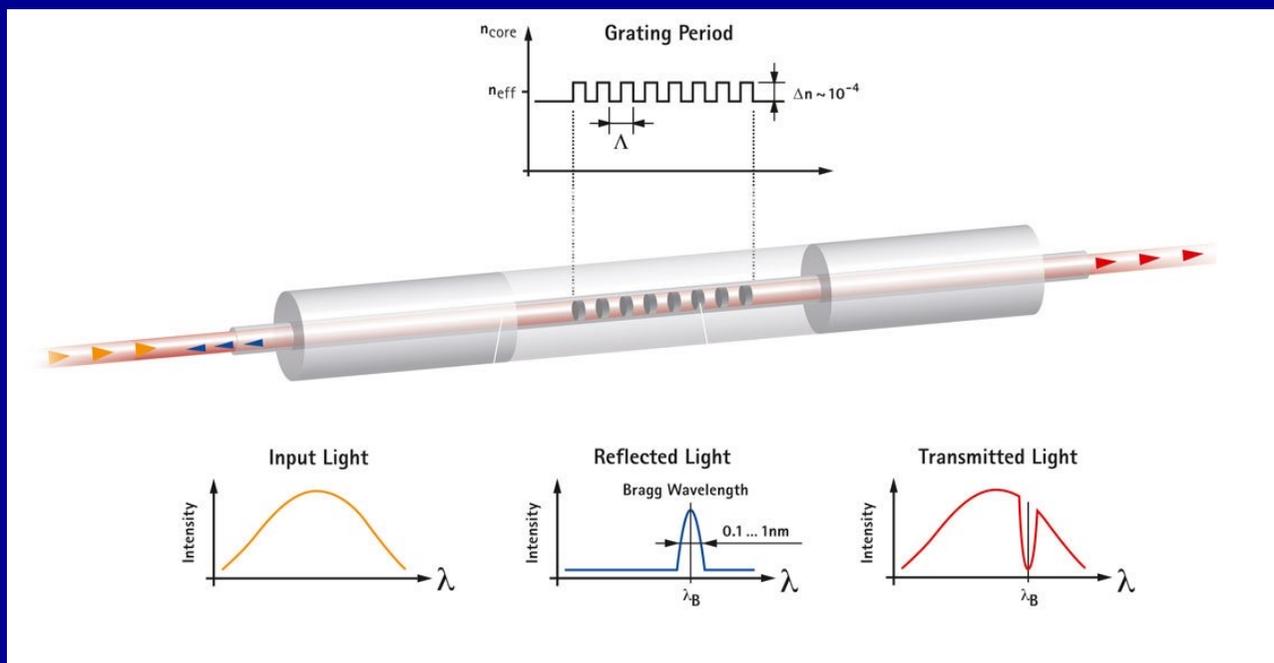
将来的な価値変動まで含めた仮想空間での予測・提案により、次代につながる社会発展に貢献



# マクロスケールのモニタリング・ 数値シミュレーション

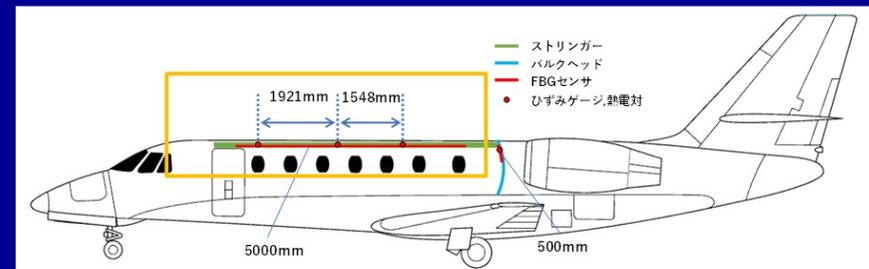
— 外的因子の定量化と構造物の応答 —

光ファイバセンサを用いたひずみ計測

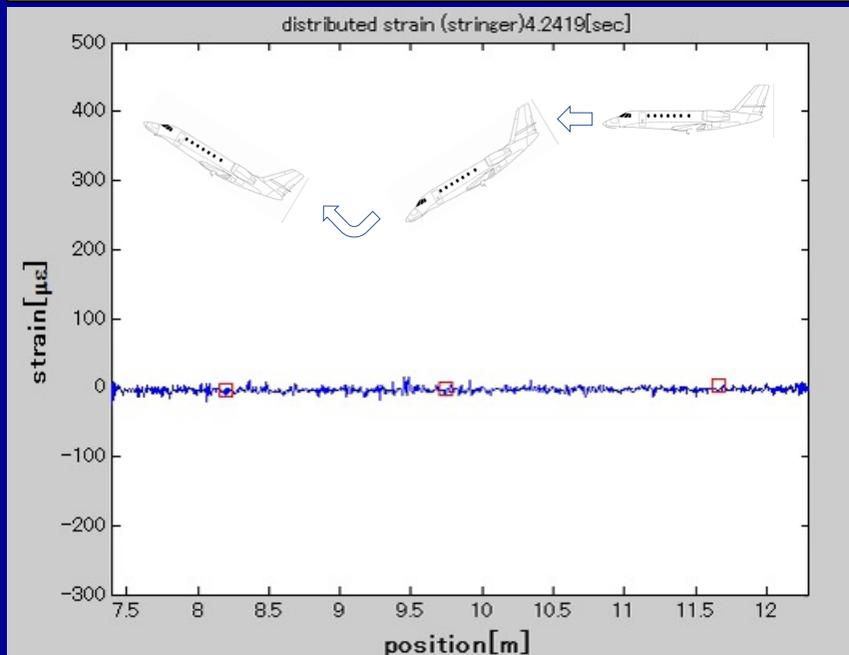


# マクロスケールのモニタリング・ 数値シミュレーション

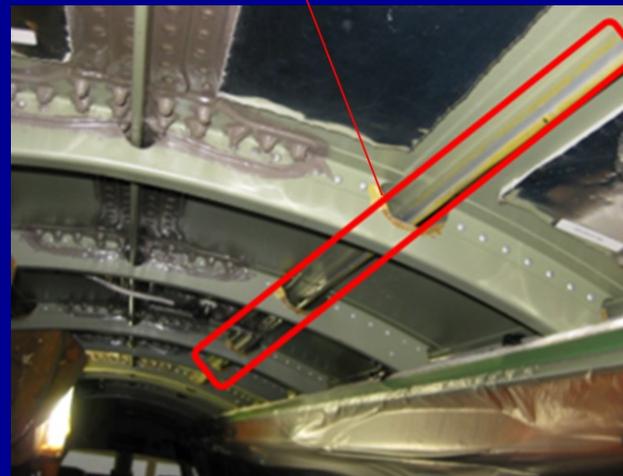
— 外的因子の定量化と構造物の応答 —



## 光ファイバセンサを用いたひずみ計測

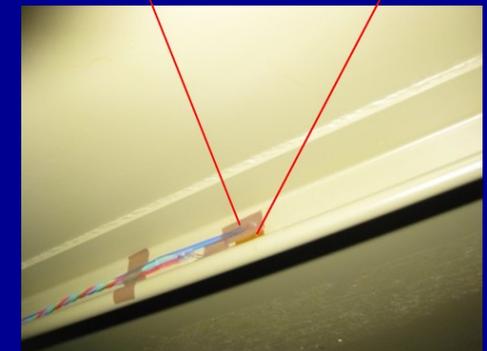


FBGセンサ



熱電対

ひずみゲージ



JAXA 飛翔に設置された光ファイバセンサ

エレベータ操舵時の胴体ひずみ分布(動画)

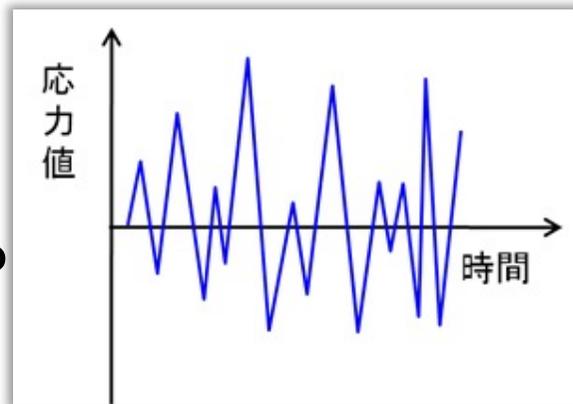


# メゾスケールでの検査・ 数値シミュレーション

— 構造材料の微細応答と損傷蓄積の定量化 —  
局所ひずみ集中箇所を対象としたき裂発生進展のモデル化

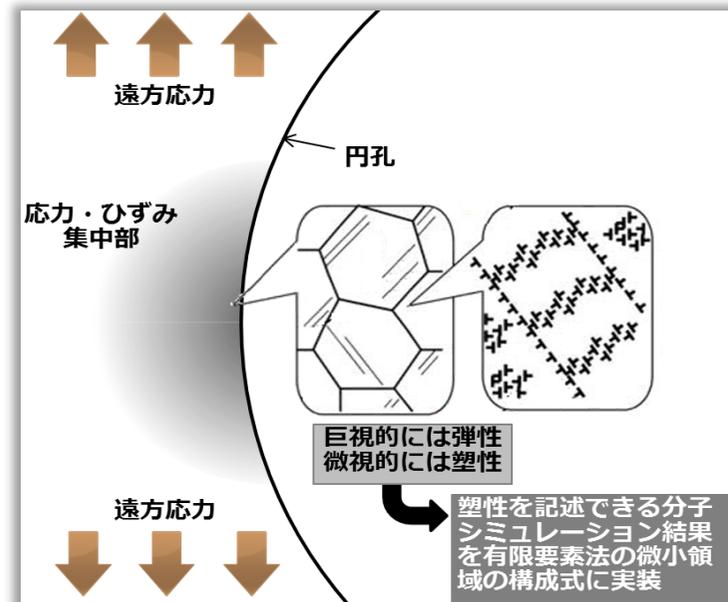
## <着目すべき荷重の特徴>

機器・構造物に  
負荷される外荷  
重は正負交番か  
つランダムである  
場合が多い。



## <着目すべき部位の特徴>

疲労亀裂発生サ  
イトは幾何学的応  
力集中により外力  
が増幅負荷され、  
かつ強い引張溶  
接残留応力が分  
布している箇所  
であることが多い。



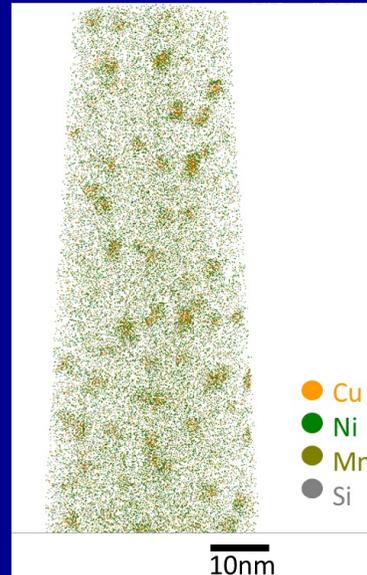
課題：疲労発生タイミングの予知→損傷蓄積進行状況の高精度予測

# ナノスケールでの検査・ 数値シミュレーション

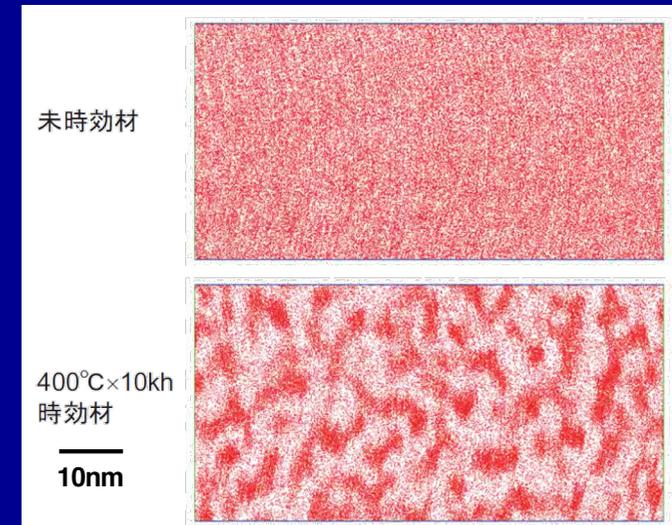
— 損傷の前兆を検出する技術の開発 —



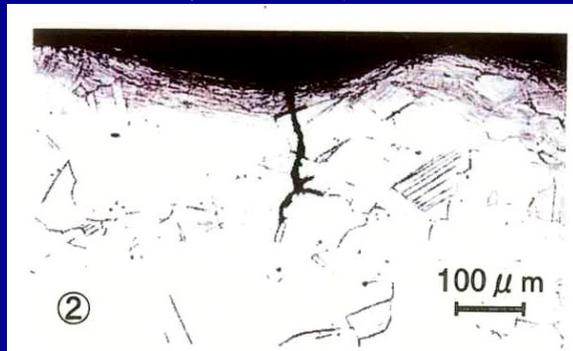
Fe中に形成した第二相（析出物） [1]



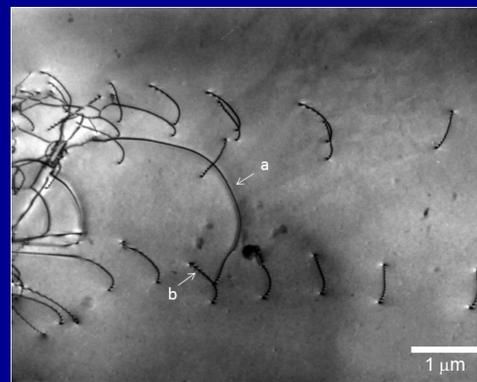
相分離（Fe-Cr合金で観察されるスピノーダル分解） [2]



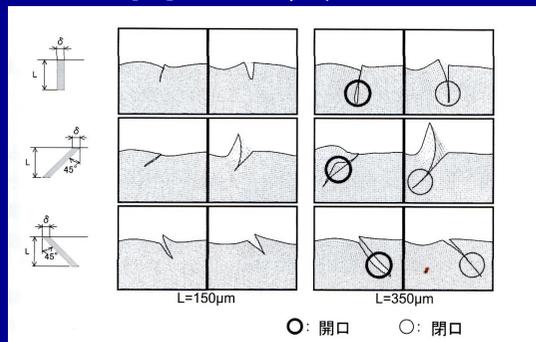
表面き裂



転位



閉口き裂

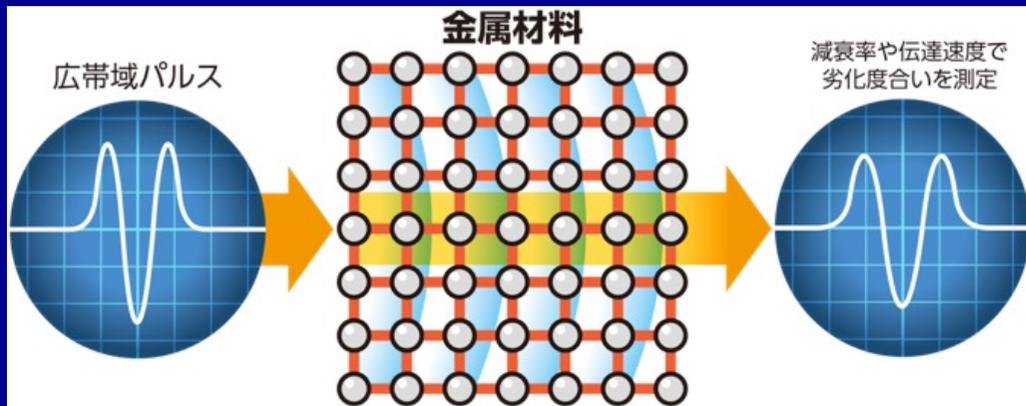


[1] 九大・渡辺英雄先生のご厚意による。  
[2] K. Fujii et al, 2012

# 超音波を用いた材質劣化検出

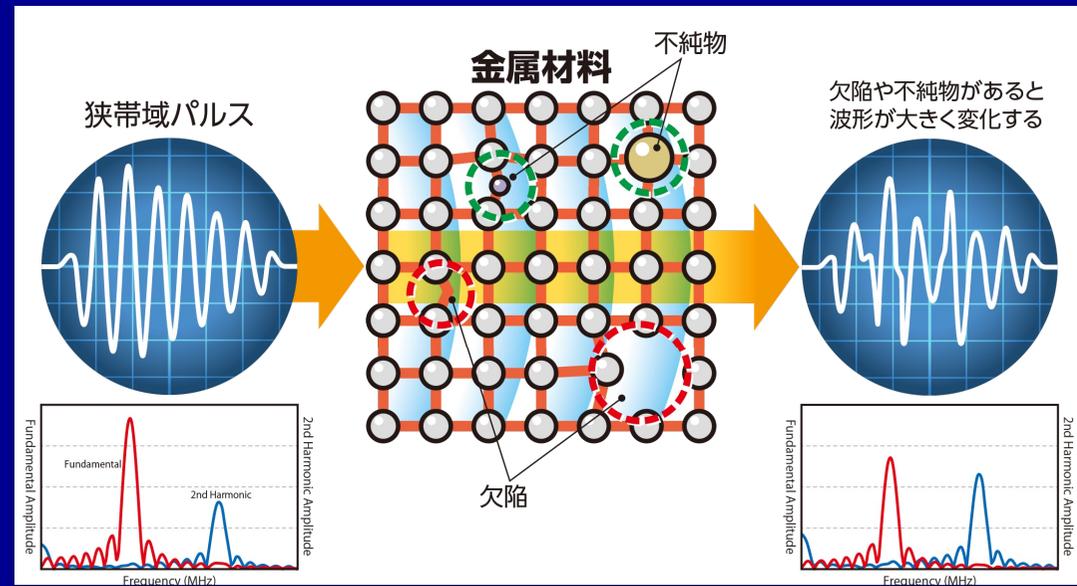
## 線形超音波

従来から広範に使用されてきた方法で、音速や減衰率等を信号として用いる。



## 非線形超音波

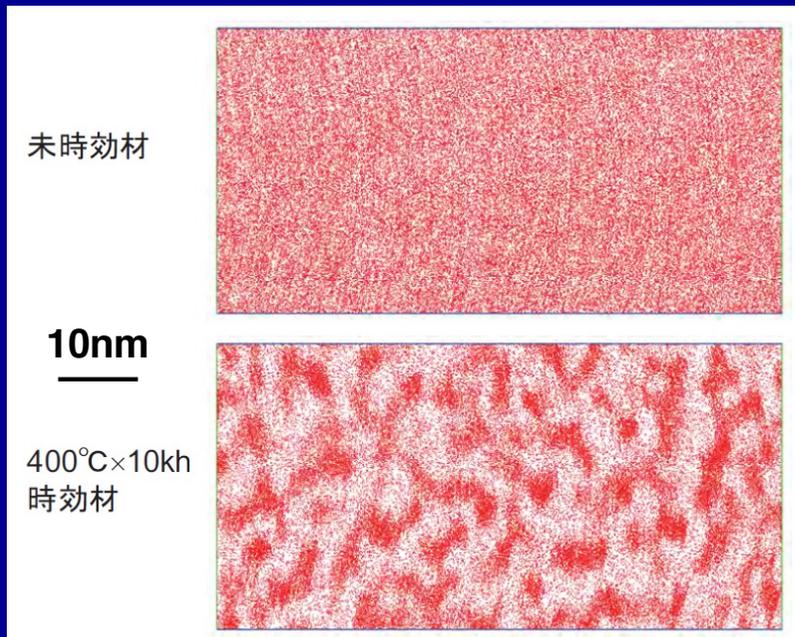
材料の非線形に起因する信号を取得する手法で、主に送信波と異なる周波数成分を検出する。



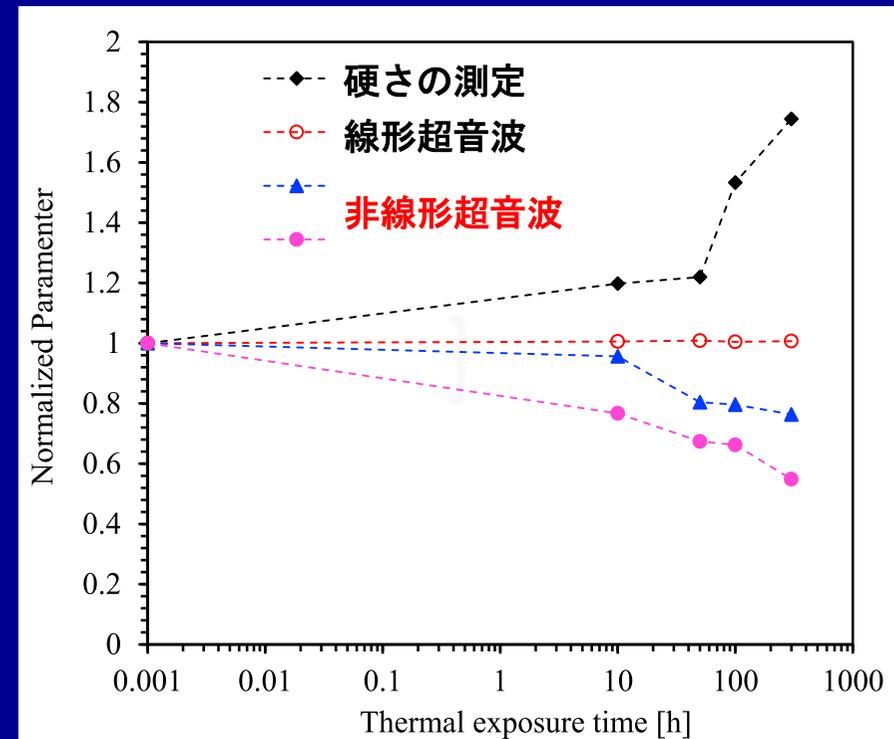
# 非線形超音波による材質劣化検出 (1)

## スピノーダル分解

3D Atom Probe によるFe-Cr合金の  
Cr濃度微少変調マップ測定 [1]



Fe-Cr合金特性変化の時効時間依存性 [3]

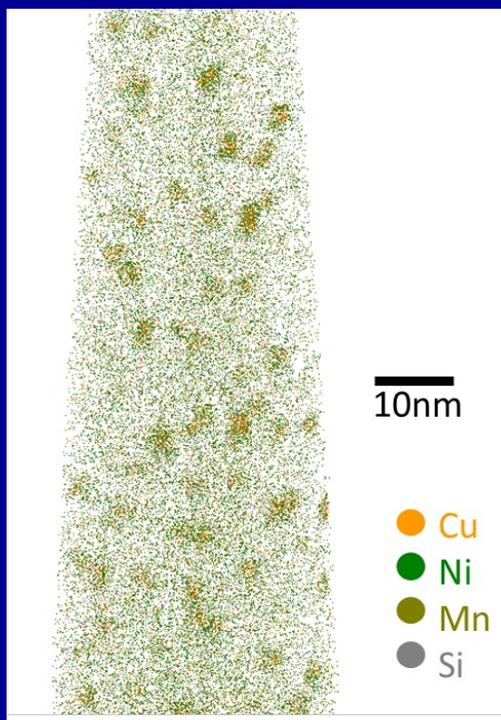


- 体積変化を伴う組織, 弾性定数を著しく変化させる組織以外等でも, 微細組織検出技術として適用できる可能性がある.

# 非線形超音波による材質劣化検出 (2)

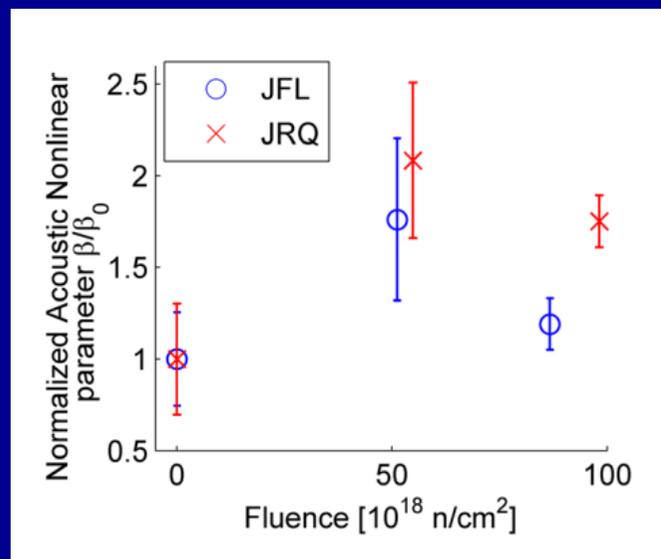
## 照射脆化

中性子照射によりFe中に  
形成する析出物 [1]



JMTR irradiation  
 $3.4 \times 10^{-3}$  dpa, 288 °C

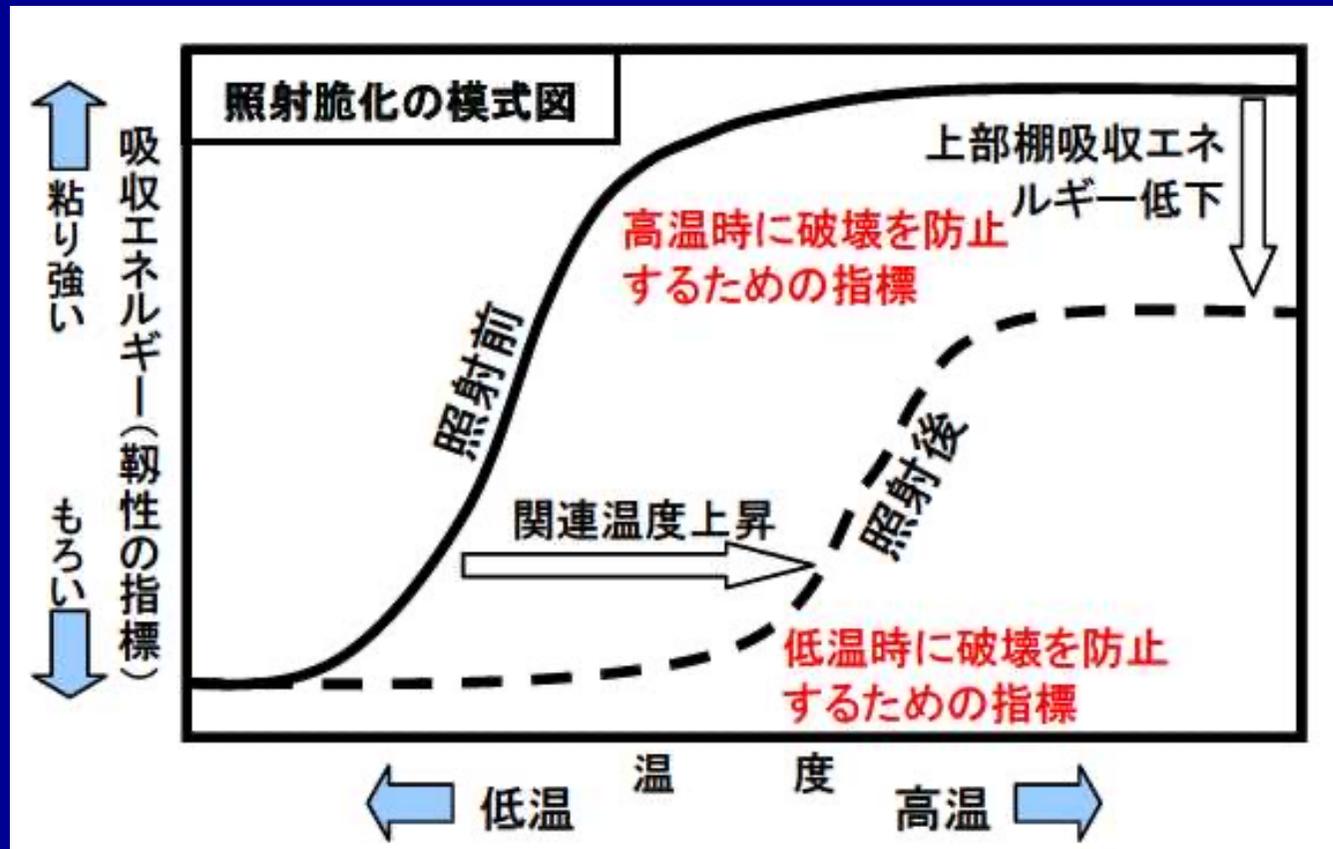
非線形超音波応答の  
中性子照射量依存性 [4]



Rheinsberg irradiation  
255 °C

- 非線形超音波応答は、析出物形成、相分離など、ナノスケールの組織変化を検出する手法として、高い可能性を秘めている。

# 軽水炉圧力容器鋼の照射脆化



- 原子炉圧力容器の胴部（炉心領域部）においては、中性子照射によって関連温度が上昇し、上部棚吸収エネルギーが低下することは広く知られており、JEAC4201及び4206に評価方法や基準が定められている。

# 科学的根拠に基づいた検査技術構築に向けて



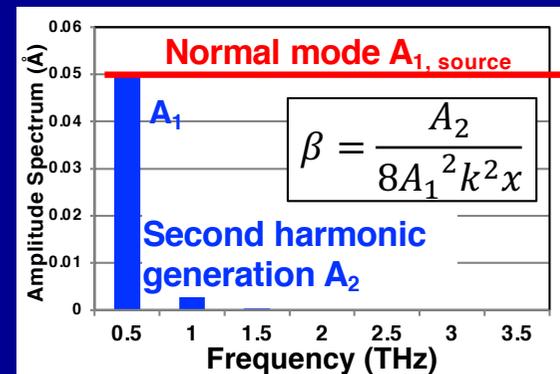
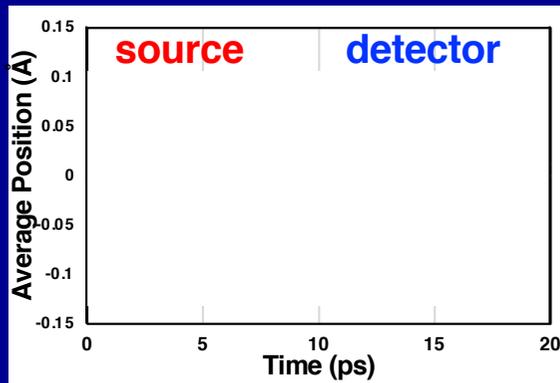
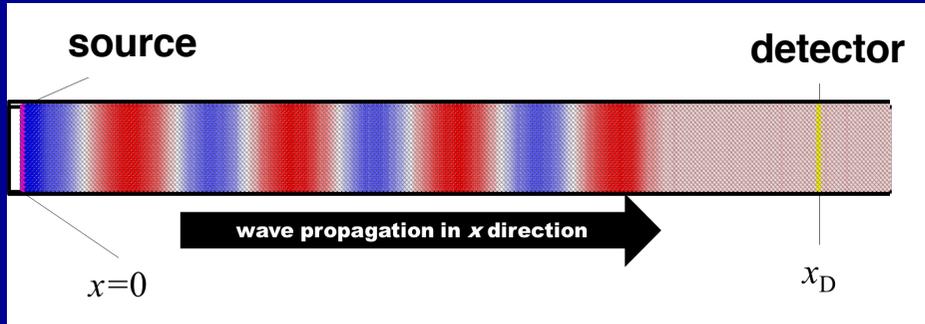
- 科学的根拠に基づいた検査技術構築のためには、微細組織と信号変化を物理メカニズムに基づいて定量化することが求められる。

# MD法による非線形超音波応答の定量化 (1)

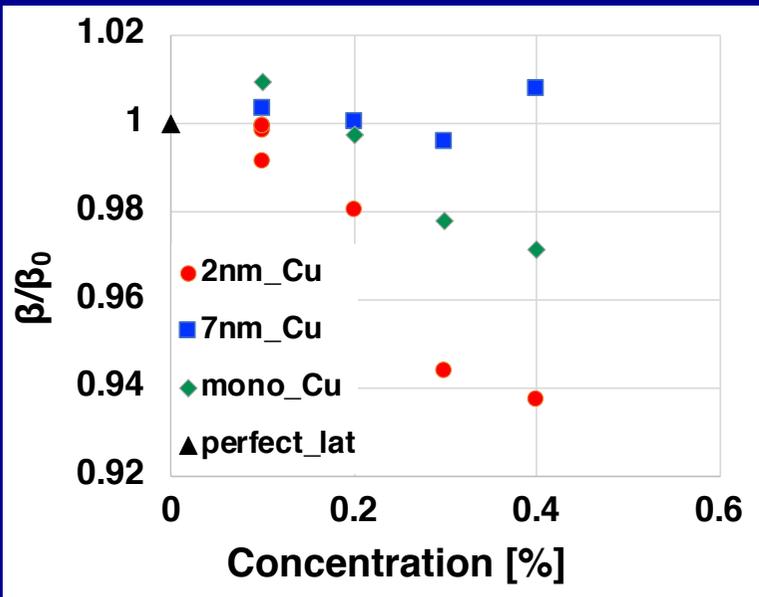
弾性波  $x = x_0 + a_{0s} \sin(2\pi f_0 t) + a_{1s} \sin(2\pi f_1 t)$  を4周期与える.

( $a_{0s}, a_{1s} = 0.1 \text{ \AA}$ ,  $f_0 = 500\text{GHz}, f_1 = 200\text{GHz}$ )

detector regionの各原子の変位の平均を各タイムステップごとに記録し, 検出信号とする.

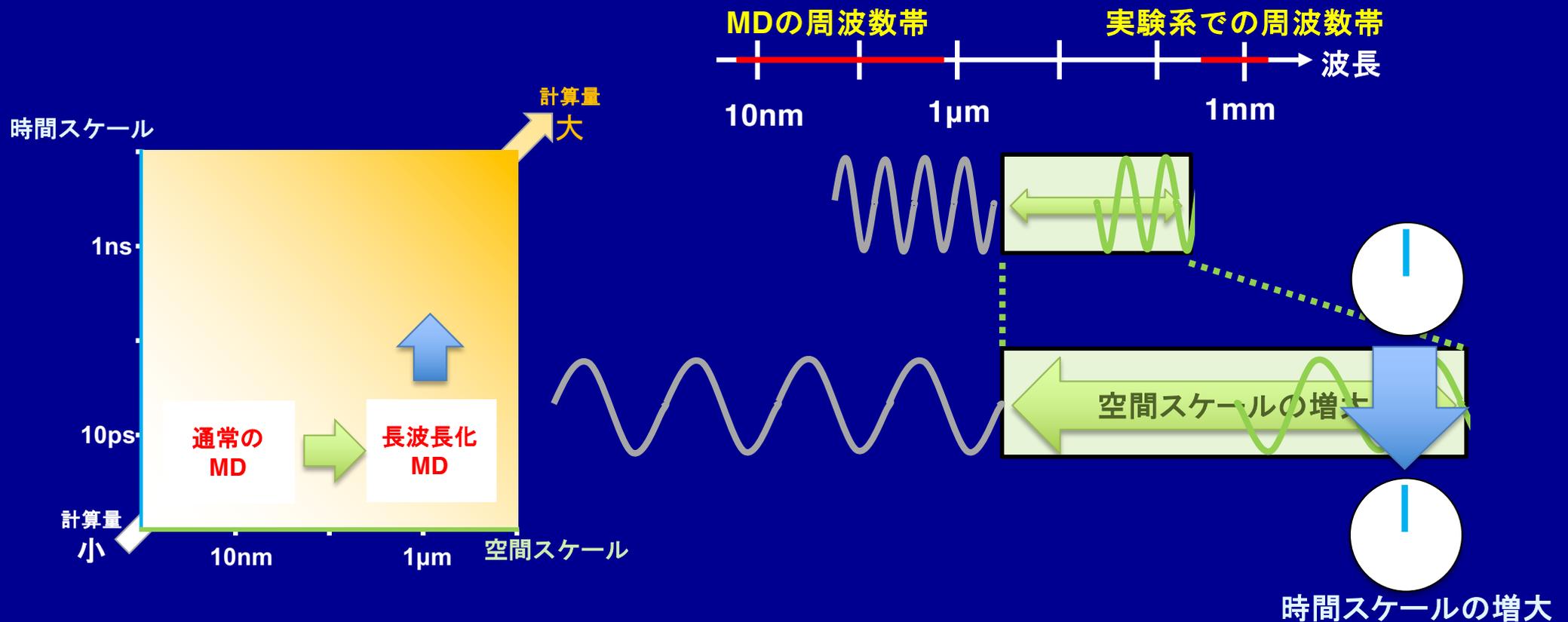


フーリエ変換



# MD法による非線形超音波応答の定量化 (2)

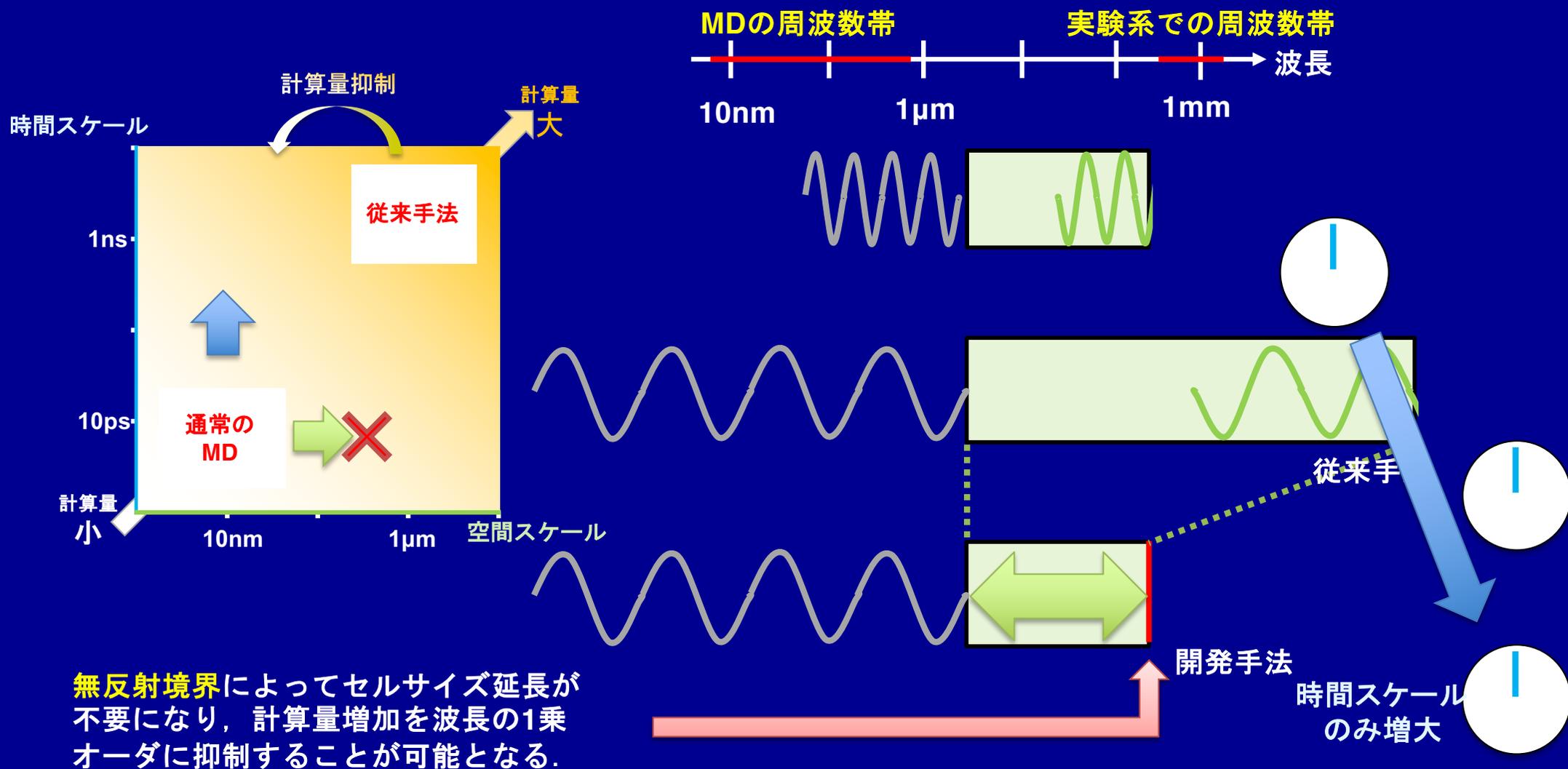
## 長波長導入法の開発



波長の2乗オーダーで計算量が増える。

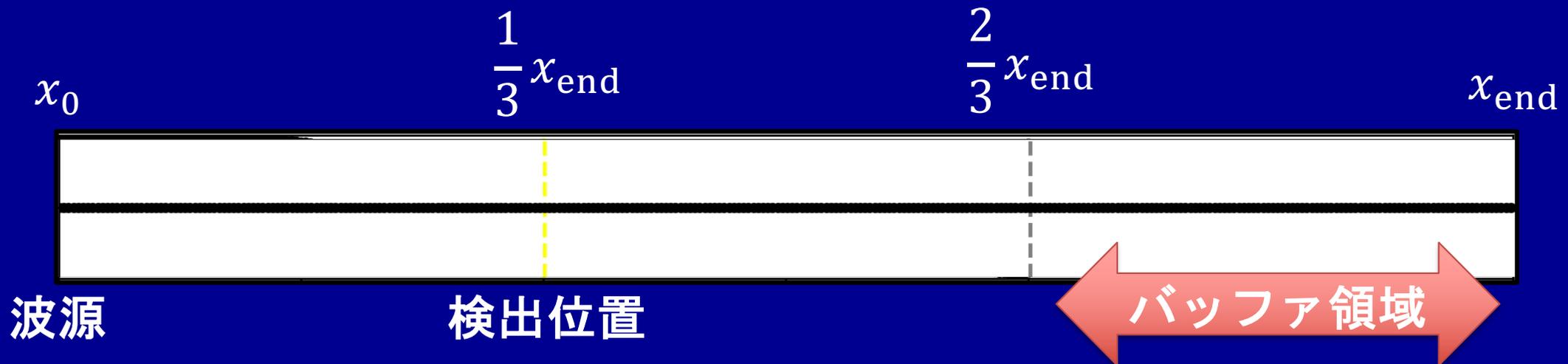
# MD法による非線形超音波応答の定量化 (3)

## 長波長導入法の開発



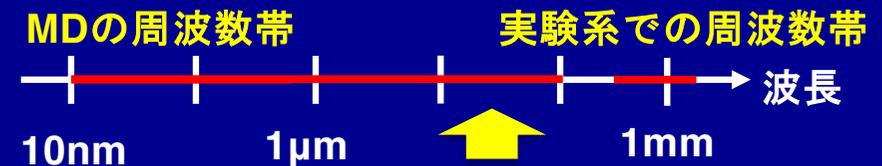
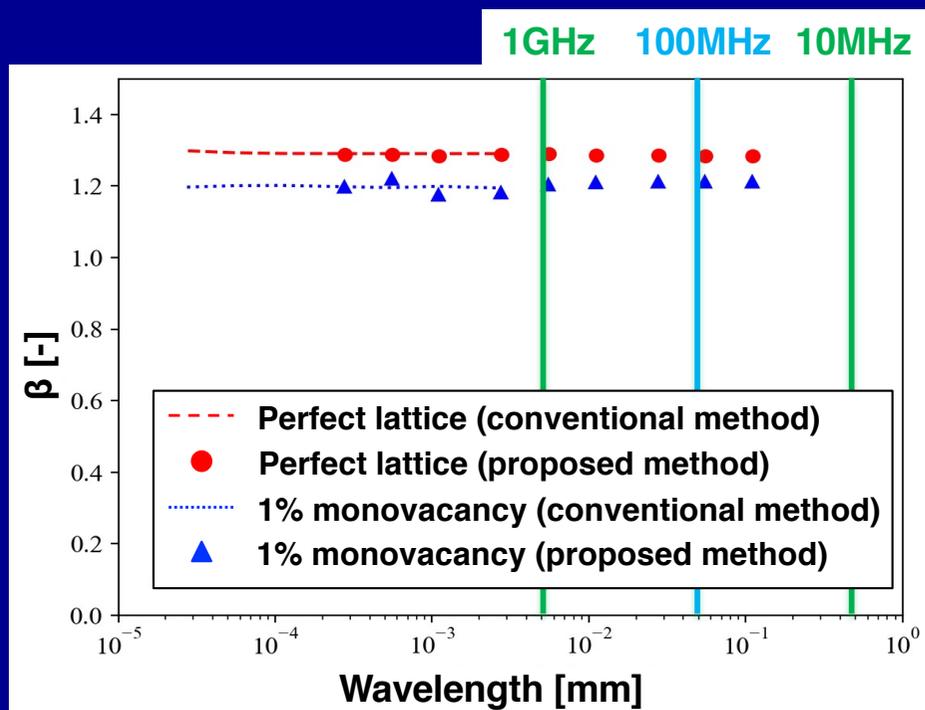
# 無反射境界MDによる長波長化 (1)

- 計算セルの外側にバッファ領域を設定し，この領域に存在する全原子の変位及び速度を定期的に0にリセットした。
- 既往研究にはない新しい手法であり，すべての反射波を除去できる。



# 無反射境界MDによる長波長化 (2)

周波数 (MHz)	$2 \times 10^4$	$2 \times 10^3$	$1 \times 10^3$	$5 \times 10^2$	$2 \times 10^2$	$1 \times 10^2$	$5 \times 10^1$
波長 (mm)	$2.8 \times 10^{-4}$	$2.8 \times 10^{-3}$	$5.5 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$	$5.5 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$
振幅 (Å)	2.5	25	50	100	250	500	1000

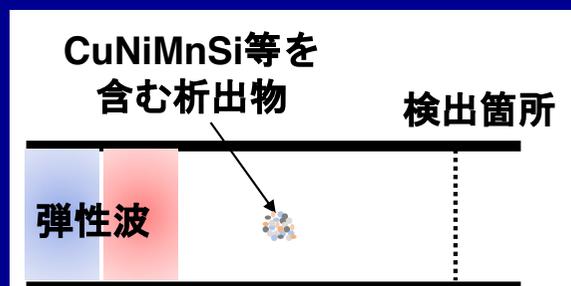
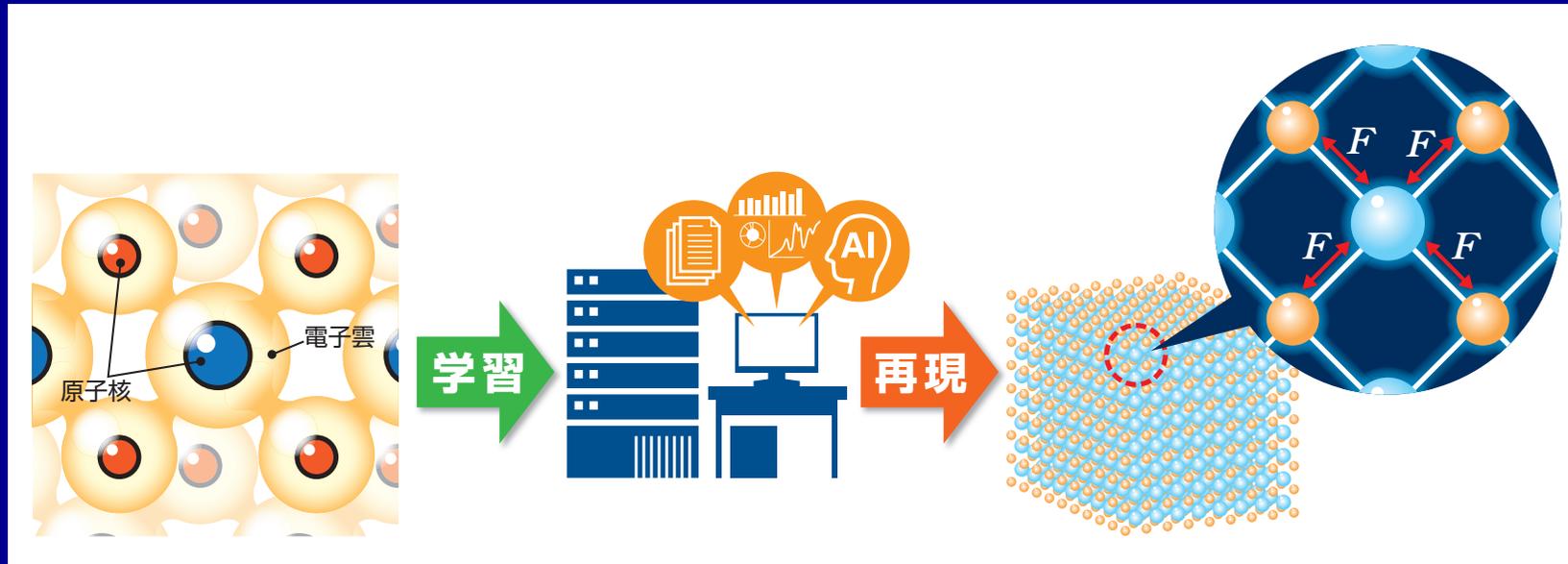


無反射境界により、**実験と同じ周波数帯**である**10MHzオーダー**まで計算が可能になった。

これにより、史上初めて、**実験とMD計算を直接比較**することができる。

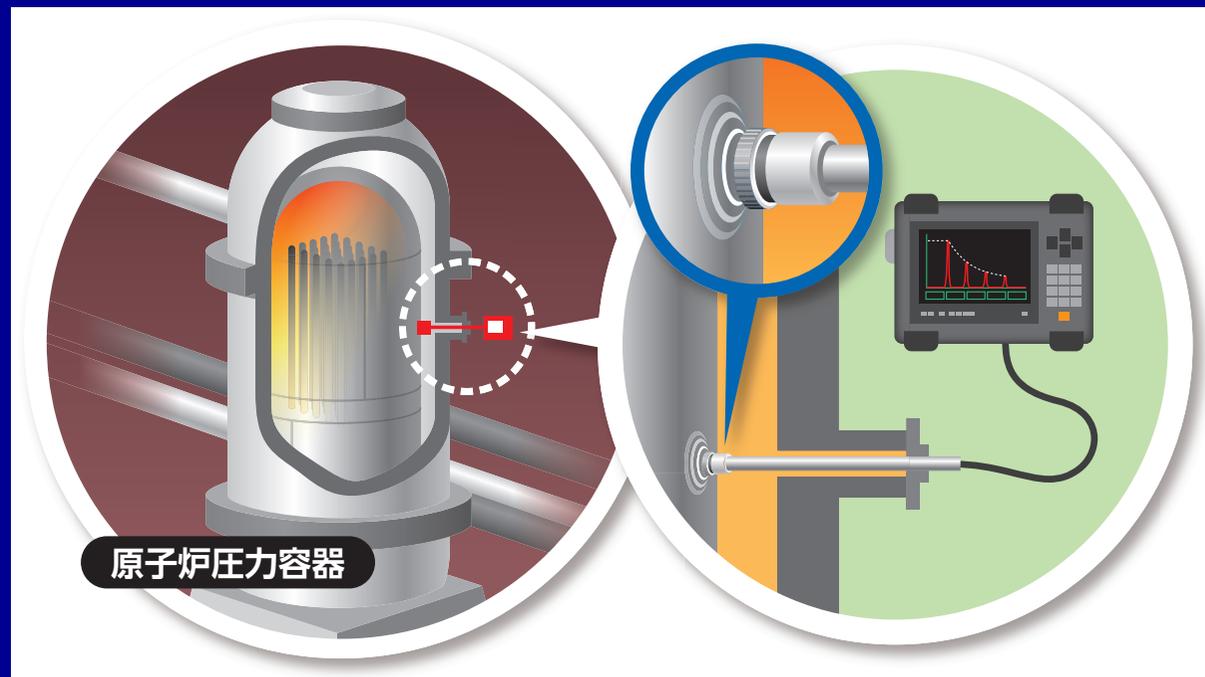
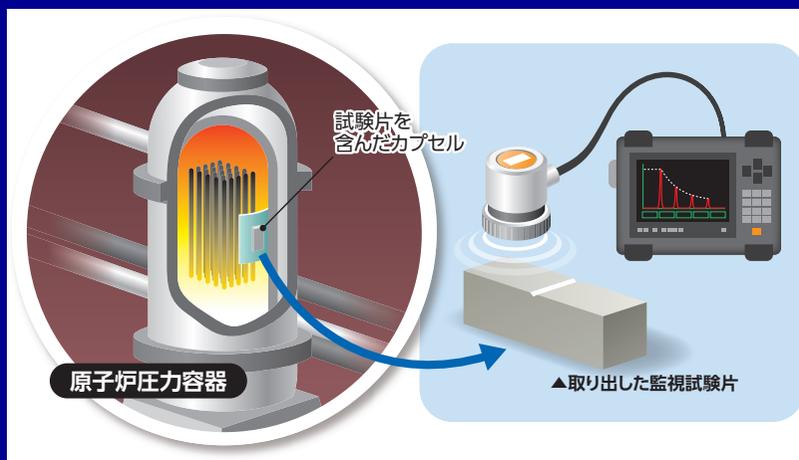
# MD法による非線形超音波応答の定量化 (4)

## 機械学習ポテンシャルの活用



- 従来のMDでは困難であった複数元素を取り入れることも比較的容易にできるため、圧力容器鋼で実際に観察される析出物の組成 (Cu-Ni-Mn-Si等) を模擬した非線形超音波応答の解析を行う。

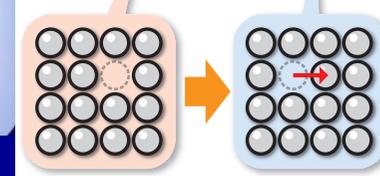
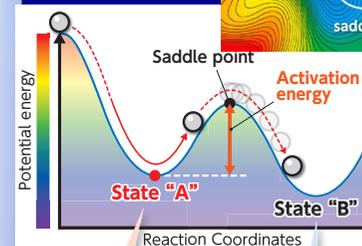
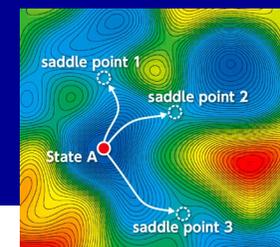
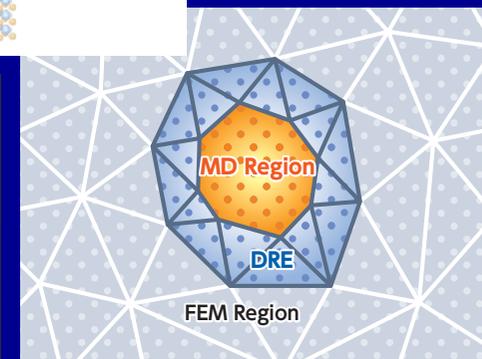
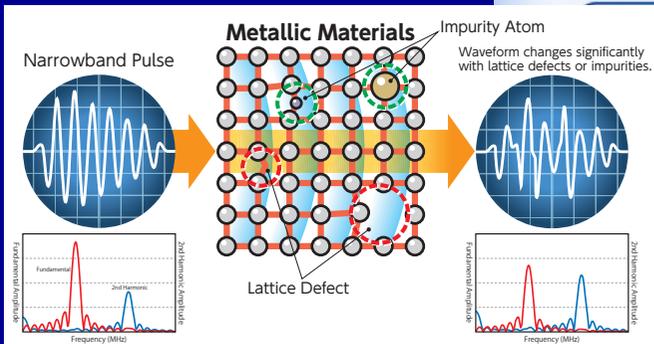
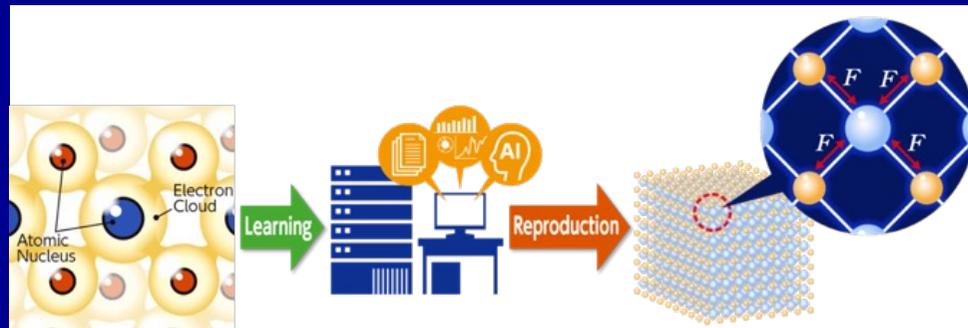
# 照射脆化を検出する非破壊検査技術



圧力容器鋼の直接測定による  
安全尤度の定量化を目指す。

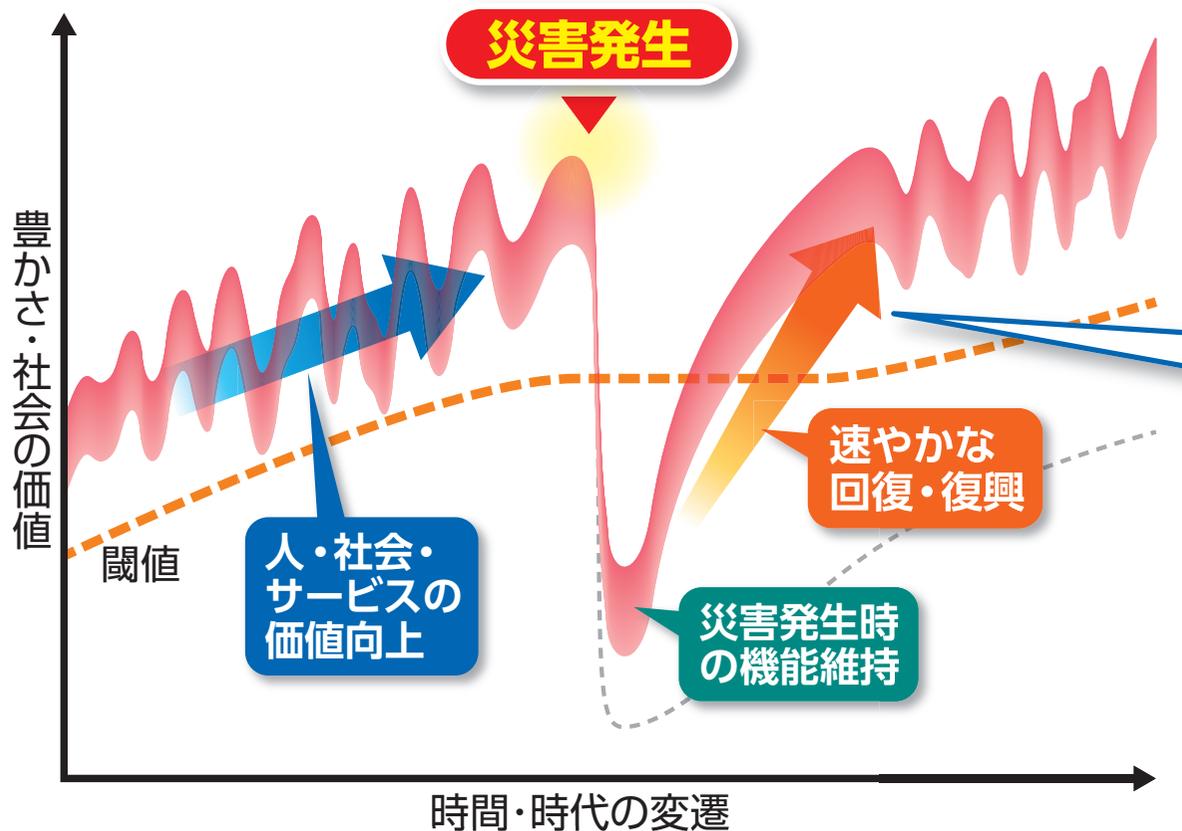
# 次世代人工物システム

人工物デジタルツインによる予測により、人工物の安全・高効率な運用と、将来に向けた新たな価値の創造を実現する人工物システム



# 本発表のまとめ

- 構造材料を対象とした種々のスケールでの検査・モニタリングデータを入力値として、数値モデルのシンセシスにより仮想実機を構築する「人工物デジタルツイン」を構築することで、システムの検査時期や運用計画を適切化するのみならず、想定外事象に対してシステムの強靱化すること、環境変化に対してシステムの可塑性を付与すること、システムの大幅な設計変更と迅速な標準化に寄与することが可能となる。
- 計算機性能の向上、新しい計算手法の開発等により、ナノスケールまでを含めた人工物デジタルツインの構築も可能となった。
- 技術の完成を決定づけるのは、計算機の性能、ビッグデータ活用、新しい検査手法等の「ハイテク」ではなく、試料表面の状態、探触子の設定等、(少なくとも現状は)経験等の裏付けられた箇所である。



### 時代とともに変化するリスク



#### 政治判断

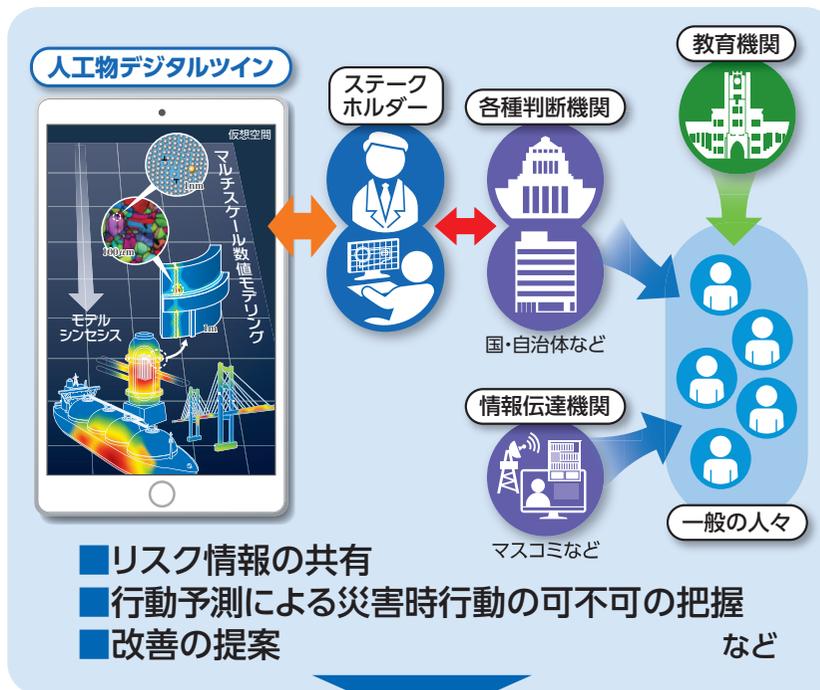
国内・世界情勢の変化や  
社会構造の変化に伴う  
政治判断の移り変わり



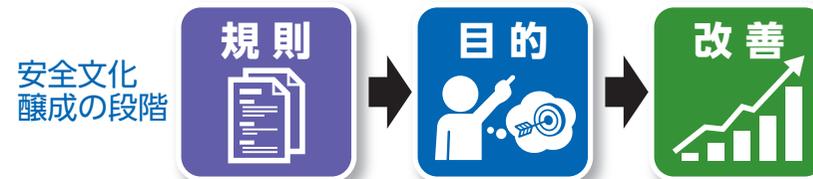
#### 知恵

新しい知見の獲得と  
社会・技術の変化に伴う  
個人の価値観の変動

## 災害時の機能維持と復興・安全文化の醸成に人工物デジタルツインを活用



あらゆる段階での状況把握と行動指針の提案により安全かつ適切な対応に貢献



## 技術者の理想



開発する技術は時として  
社会のニーズとギャップがある

乖離

## 現実

技術の  
進歩する  
方向を  
決定



社会の  
コンセンサス



社会の  
ニーズ



政治

現実のニーズが時として  
技術進歩の足かせとなる

これを解決するために

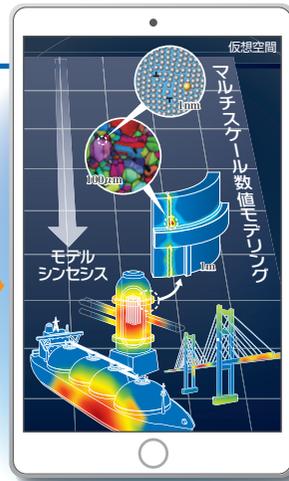
学協会



大学・  
研究機関



科学技術の  
進歩する方向  
を決定する



人工物デジタルツインを活用

リスク情報共有・  
社会の  
コンセンサス  
形成



人



組織

# 持続可能な社会システムを実現

