

## 1. 研究の背景

### 固体・構造力学の発展

従来、機械・構造物の強度・剛性設計が主な目的であった固体力学・構造力学の役割は、現在では大きく広がっています。すなわち、材料の複合化・傾斜組成化による高機能化や、動的環境に適応できるスマート材料・構造システム構築への期待の中で、そのカバーすべき範囲も、(1) 巨視スケールからマイクロ・ナノを含むマルチスケール解析へ、(2) 静的・線形解析から動的・非線形挙動解析へ、(3) 力学現象のみの解析から電磁気・熱・材料特性変化との連成解析へ、と広がっており、より精密な材料挙動のモデル化と、材料・構造システムの機能・信頼性の向上に資する力学学理の構築が求められています。

### 複合材料・マイクロメカニクス・弾性波

異種の材料を組み合わせることで所望の材料特性を実現する複合材料は、航空宇宙工学分野で適用が広がっている炭素繊維強化複合材料をはじめとして、さまざまな材料構成、微視構造のものが存在します。このような材料の微視構造や微視レベルでの力学現象と、巨視レベルでの材料特性（剛性、強度など）を結び付けて解析、評価する試みはマイクロメカニクス（微視力学）と呼ばれ、固体力学における重要な研究分野となっています。複合材料に動的な負荷が加わった場合の応答・強度の予測や、超音波伝搬特性の測定による材料特性・損傷・劣化の評価を行ううえでの学術的基盤として、複合材料における弾性波伝搬挙動の理解が必要です。複合材料では、構成材料の特性や微視レベルで生じる波動散乱現象が、巨視レベルでの超音波伝搬速度や減衰係数に反映されています。したがって、複合材料における弾性波伝搬特性を理解するうえで、材料微視構造との関係を明らかにすることが重要です。また、弾性波計測により複合材料のマクロな弾性特性が評価でき、マイクロメカニクス理論の検証を行うための有用な実験方法にもなっています。さらに、構成相材料特性・材料微視構造と巨視特性の関係を解明することにより、材料選択や微視構造の制御による機能複合材料の設計が可能となります。最近では、人工的な材料微視構造を用いて音波や弾性波の伝搬挙動を制御するフォノンニック構造や音響メタマテリアルの研究が盛んに進められています。

### 弾性波・非破壊評価・構造健全性モニタリング

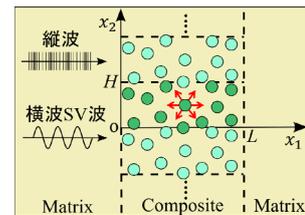
工業製品の機能・信頼性や、長期にわたり使用に供される機械・構造システムの強度・安全性を保証するうえで、構成材料の特性評価、欠陥の検出・評価のための非破壊計測技術が重要です。高周波数の弾性波を用いる超音波計測はそのための有力な方法となっています。超音波を用いた非破壊評価は、弾性波伝搬解析、超音波発生・検出技術（電気・電子計測）、信号・波形処理、材料物性・材料強度学など、異なる領域にまたがる研究分野ですが、複雑な微視構造（強化材、結晶粒、積層構造）や材料特性（異方性、非線形性、散逸性）を有する固体材料、および複雑形状を有する構造部材に超音波計測を適用するうえで、超音波（弾性波）の伝搬挙動を正確に解析するための数値・数値解析手法の開発が重要であり、そのためには固体力学・連続体力学の基礎を踏まえた理解が必須です。また、最近では、製造時検査や定期点検のための非破壊検査・評価技術から、常時計測による構造健全性モニタリングへと研究分野も広がっており、構造物にアクチュエータ・センサを内蔵するスマート構造の研究も進んでいます。これらの分野においても超音波（弾性波）計測は光ファイバなどと並んで重要な要素技術と位置づけられています。さらに、非破壊検査・評価や構造健全性モニタリングには、限られた計測データから材料特性・損傷・劣化を推定する逆解析（逆問題）という側面もあります。

## 2. 学生による最近の研究のテーマ

以下に最近の研究テーマを紹介します。これらの研究テーマでは、新しい数値計算方法や測定方法の開発を行いながら、厳密な固体力学理論に基づく解析によって現象や原理を理解することを重視しています。

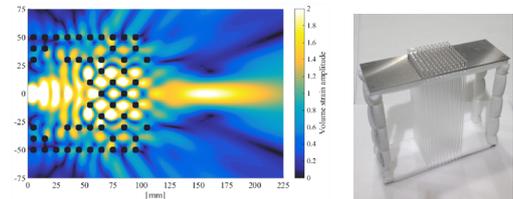
### 繊維強化複合材料における弾性波多重散乱

金属基複合材料（MMC）や樹脂基複合材料（CFRP、GFRP）の代表的強化形態である一方向繊維強化複合材料における弾性波伝搬特性（伝搬速度、減衰）について、多数の繊維（半径数ミクロンから数10ミクロン程度）による弾性波の多重散乱を考慮した解析を行っています。個々の繊維による散乱波動場を解析解の重ね合わせ（固有関数展開）で表現することにより、二次元調和波が入射した場合の複合材料中の弾性波伝搬挙動の効率的な数値シミュレーションを可能としています。



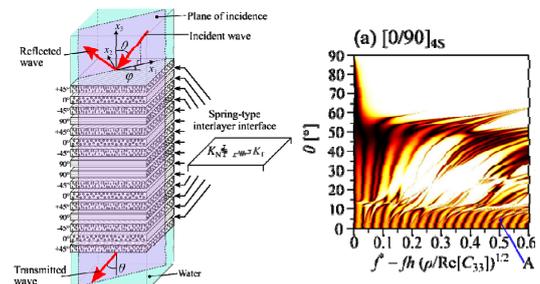
### 多数弾性円柱による音波散乱と音響レンズ

複合材料に対して定式化した固有関数展開に基づく多重散乱解析法を拡張し、非粘性流体中に配置された弾性円柱による音波の多重散乱の解析に適用しています。また、遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて、特定周波数の音波を所定の位置に集束させる弾性円柱の最適配置（音響レンズ）を求め、アクリル円柱を用いた実験によりその有効性を検討しています。



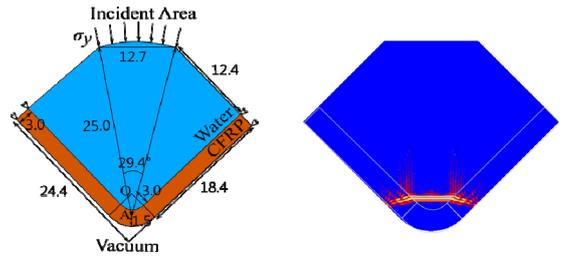
### 積層構造における超音波伝搬挙動

航空機構造で多く用いられる CFRP 積層構造に対する超音波非破壊評価の高度化のため、層間に存在する樹脂過剰領域や内部欠陥を考慮した超音波伝搬解析法の開発を行っています。水浸超音波計測システムを用いた実験結果と解析結果を対応させることにより、強度上問題となる層間領域の特性（界面剛性）の評価を可能としています。現在、積層構造に特有の超音波バンドギャップに着目した新しい材料特性評価法の構築に向けた研究を進めています。



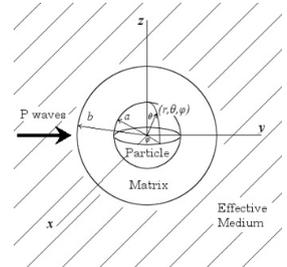
### 積層構造コーナ部における超音波伝搬挙動

航空機構造ではコーナ部などの曲率を有する CFRP 積層構造部材が多く用いられています。このような構造では、繊維強化による異方性や積層による不均質性が空間的に分布しており、超音波伝搬挙動は極めて複雑になります。そこで、有限要素法を用いた数値シミュレーションによって CFRP 積層構造における超音波伝搬挙動を明らかにしています。これにより欠陥の非破壊評価に有効な超音波計測法について検討し、合わせて実験による検証を行っています。



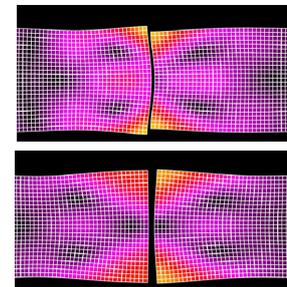
### 粒子強化複合材料の超音波伝搬特性

粒子を分散させた複合材料の超音波伝搬特性（伝搬速度、減衰）は、構成相の材料特性のほか、粒子寸法、含有率に大きく依存して変化します。これらの依存性を精度よく模擬できる微視力学モデルを構築することにより、所望の超音波伝搬特性を実現するための材料設計が可能となります。そこで、医用超音波プローブ用構成材料に求められる、所定の音響インピーダンス、低伝搬速度、低減衰係数を実現するための材料複合化について、理論的観点から検討しています。また、航空宇宙・海洋分野で適用拡大が期待される、中空粒子（マイクロバルーン）を分散させた軽量・高比剛性・低熱伝導性の複合材料に対して微視力学モデルを定式化し、材料構成と巨視的弾性波伝搬特性との関係を調べています。



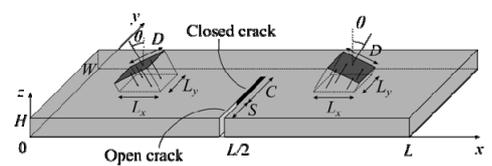
### 薄板の接合部におけるラム波反射・透過挙動

航空機構造に多用される薄板構造では、ラム波と呼ばれる特徴的な弾性波伝搬モードが存在します。ラム波は分散性（伝搬速度が周波数や波長に依存すること）および多モード性（同じ周波数に対しても、異なる伝搬速度を持つ多くの伝わり方が存在すること）を有することから、伝搬挙動は大変複雑です。特に薄板同士が接合された部分では、特定のモードのラム波のエネルギーが他のモードのラム波に変換されます（モード変換）。そこで、薄板部材同士の接合部におけるラム波の反射・透過挙動を明らかにするため、理論・数値解析を行っています。また、特定の周波数のラム波に対して薄板接合部近傍の振動振幅が増大する共振現象の存在も見出しています。さらに、これらの検討で得られた知見を、薄板の接着接合部や閉口き裂の非破壊評価に応用しています。



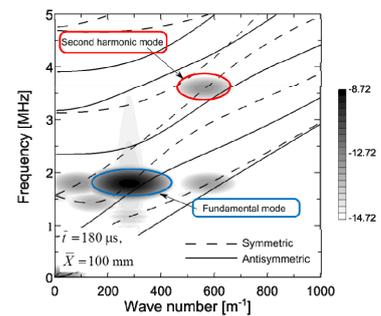
### き裂を有する薄板におけるラム波伝搬挙動

薄板構造に生じたき裂状欠陥を、構造に備え付けたアクチュエータ・センサによる弾性波送受信によって用いて検出・評価する構造ヘルスマモニタリングの基礎研究として、各種モードのラム波とき裂状欠陥との相互作用に関する数値シミュレーションおよび実験的検討を行っています。スペクトル要素法と呼ばれる数値解法を用いて、き裂を有する薄板における弾性波伝搬挙動の解析を行い、き裂の寸法や閉口状態が受信信号に与える影響について検討しています。また、疲労き裂を導入した金属試験片に対してラム波送受信測定を行い、計算結果の検証を行っています。



### ラム波の非線形伝搬挙動

実在材料の応力-ひずみ関係は弾性範囲内でもわずかに非線形性を有しています。超音波伝搬特性に含まれる応力-ひずみ非線形性の影響に着目することで、欠陥や損傷に敏感な非破壊評価を実現することが期待されています。そこで、薄板を構成する材料が非線形応力-ひずみ関係を有する場合のラム波伝搬挙動を、幾何学的非線形性も考慮に入れた理論を用いて解析しています。特に、ある周波数のラム波が薄板を伝搬する際に、非線形効果によって元の周波数の整数倍の周波数成分（高調波）が発生する現象に着目し、ラム波の分散性を考慮に入れ、高調波が伝搬距離とともに比例的に増大する条件を理論的に導出しています。また、摂動法により高調波発生挙動を解析するとともに、時間領域有限差分法を用いた数値計算による検討を行っています。



### マイクロスケール振動子の熱弾性減衰挙動

微小電気機械システム (MEMS) で用いられるマイクロスケールの振動子では尖鋭な共振特性（高いQ値）が求められますが、動的変形に伴うわずかな温度変化と熱伝導の影響によって、エネルギーが散逸し、無視できない減衰が生じることがあります。そこで、弾性振動と熱伝導の連成効果を考慮に入れた動弾性有限積分法の定式化を行い、マイクロスケール熱弾性はりの振動減衰挙動に及ぼす振動子寸法や材質の影響に関する数値解析を行っています。

