

わたしたちの研究（21）機能構造力学研究室



琵琶志朗（H2/1990卒）

1. 研究室の概要・教員紹介

機能構造力学研究室は工学研究科航空宇宙工学専攻に属し、同専攻を含む機械系三専攻（機械工学群）および工学部物理工学科宇宙基礎工学コースの教育に関わっています。本研究室の源流は旧航空工学科（航空宇宙工学専攻）の構造強度学研究室であり、平成17年度の改組によりマイクロエンジニアリング専攻の所属（構造材料強度学講座）となった後、平成23年度から現在の名称で航空宇宙工学専攻を構成する一分野となっています。旧構造強度学研究室で活躍された先生方は固体材料の動的強度に関する研究、また非線形媒質における波動に関する研究で特に優れた研究成果を残されています。現研究室でも材料・構造の動的挙動や弾性波伝搬挙動の解明は中心的な研究テーマとなっています。

筆者は昭和61年に本学工学部機械系学科入学後、平成元年度に材料力学研究室（その後、連続体力学研究室）に配属され、柴田俊忍教授のもとで機械工学専攻修士課程、博士後期課程へと進みました。博士後期課程在学中にはストックホルムの王立工科大学で1年半の研究留学を経験しました。博士後期課程を研究指導認定退学後、平成7年4月に機械工学教室で助手に採用され、引き続き柴田研究室に在籍させて頂きました。平成10年4月に名古屋大学工学研究科で講師として採用され、固体力学分野で著名な大野信忠教授の研究室で教育・研究に従事した後、平成16年5月に本学エネルギー科学研究科エネルギー変換科学専攻助教授（後に准教授）に採用され、柴田研究室で指導を頂いていた松本英治教授のもとで再びお世話になりました。平成21年4月にマイクロエンジニアリング専攻教授に採用されて上に述べた構造材料強度学講座の担当となった後、平成23年度から航空宇宙工学専攻に移り現研究室において教育・研究活動を行っています。

筆者とともに当研究室の運営を支えてくれているのが石井陽介助教です。石井助教は平成21年に明石工業高等専門学校機械工学科を卒業後、本学物理工学科宇宙基礎工学コースに編入学しました。平成22年度に当研究室に配属後、航空宇宙工学専攻修士課程、博士後期課程へと進み、平成25年度からは日本学術振興会特別研究員（DC1）に採用されました。この間、ジョージア工科大学ローヌ校（フランス）やブリストル大学（英国）での短期滞在を経験しています。平成28年に博士後期課程修了後、豊橋技術科学大学機械工学系助教に採用され、足立忠晴教授のもとで衝撃工学等の分野で教育・研究の経験を積んだ後、令和2年9月から再び当研究室に助教として加わっています。



石井陽介助教

2. 研究紹介

等方・均質・線形弾性体を対象とした弾性波動論は応用数学や地震学の分野で古くから研究されて体系化されていますが、これを現実の固体材料や構造物を伝わる弾性波の解析に適用しようとする、複雑な微視構造や構造形態、非線形性、異方性等の影響が顕在化します。航空宇宙分野で使われる先進複合材料や薄肉補強構造等における動的変形挙動を解明し、また弾性波（超音波）を用いて材料特性や構造健全性を非破壊的に評価するためにはこれらの影響を明らかにする必要があります。近年ではこれまでに見られない波動伝搬特性を有する人工的媒質（メタマテリアル）の研究も盛んで、微視構造や構造形態に依存して発現する新奇な波動現象の究明も求められています。当研究室ではこれらの問題に対して基礎的観点から取り組むことを研究の目的としています。以下に、これまでに進めてきた研究テーマをいくつか紹介します。

(1) 複雑微視構造を有する固体材料における弾性波伝搬挙動の解析

航空宇宙分野で広く用いられている炭素繊維強化複合材料（CFRP）は樹脂と強化繊維からなっており、その巨視的な力学特性は個々の構成相の特性や含有率、配置形態に依存します。このような複相（多相）固体の巨視的特性を予測する力学理論は微視力学（マイクロメカニクス）として体系化されており、巨視的弾性係数や比較的低周波数における弾性波伝搬速度の予測が可能です。一方、弾性

波の減衰特性を予測するには強化材による散乱と樹脂の粘性による吸収の両方を考慮に入れる必要があります。筆者らは既存の散乱理論を改良し、散乱および吸収による単位伝搬距離当たりの平面波のエネルギー流束密度の減少を定式化することにより、複合材料における弾性波減衰係数の理論モデルを構築しました。これを異なるオーダーの強化材寸法を有する繊維強化および粒子強化複合材料に適用した結果、理論的に予想されるように十分低周波数では吸収による損失が、周波数が高くなるにつれて散乱による損失が減衰の主因となることを明らかにしました（図1）。これにより、種々の高分子系複合材料における弾性波（超音波）伝搬速度のみならず減衰特性も、強化材の特性や寸法、含有率等をもとに予測することを可能としています。当研究室ではその後、軽量構造用途で注目される中空ガラス粒子（マイクロバルーン）分散複合材料（シタクチックフォーム）や、超音波プローブ用材料としての粒子分散シリコンゴム等についても弾性波（超音波）伝搬特性の理論解析と実験的評価を行っています。

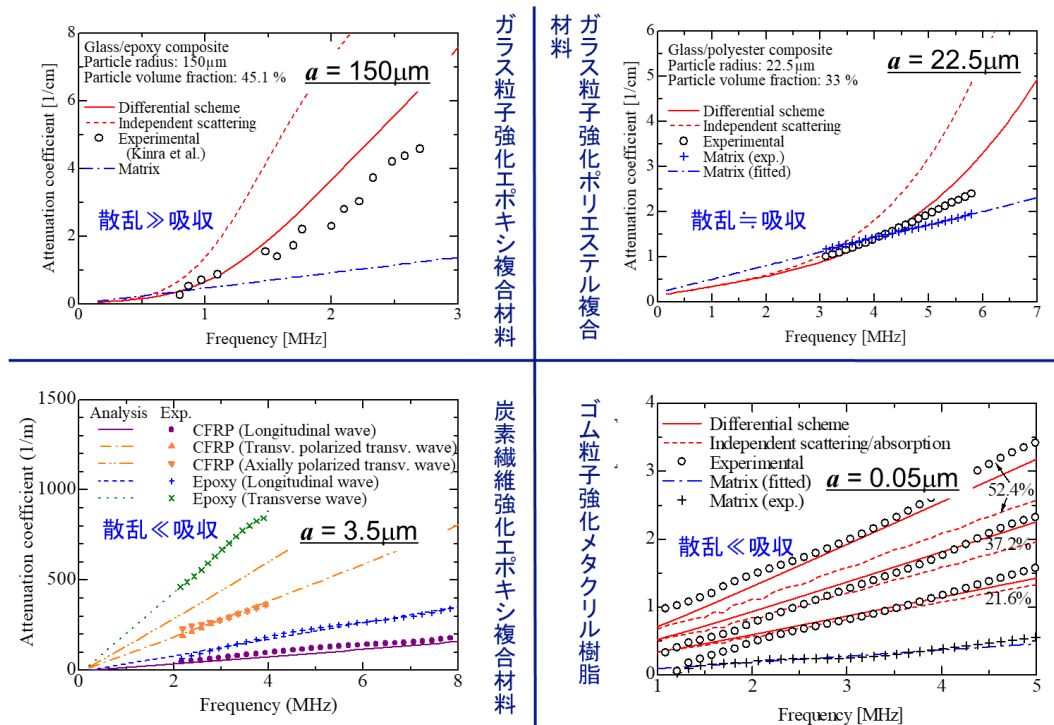


図1 高分子系複合材料の縦波減衰係数に対する理論モデル（微分スキームおよび独立散乱モデル）と実測値の比較

上に述べた理論モデルは散乱と吸収による損失を近似的に考慮して弾性波の減衰を予測するものですが、これをより精密化する試みとして、強化材による弾性

波散乱を支配する方程式を直接解析する研究も行っています。最初に支配方程式が単純なSH (shear horizontal) 波を対象として、多数の円筒形散乱体による多重散乱の支配方程式を数値的に解く方法を定式化しました。この解析法では支配方程式 (Helmholtz方程式) の変数分離解 (固有関数) を用いて散乱場を表現し、固有関数展開の未知係数を境界条件から決定します。これにより、多数の散乱体が配置された場合の平均的な弾性波伝搬挙動や、散乱体が規則的に配置された場合の弾性波遮断挙動等を明らかにしました。また、この解析法により求めた一方向強化CFRPにおける横波 (SH波に相当する横波) の伝搬速度および減衰係数が実測値とも良く対応することを確認しています。その後、当研究室では本解析法の対象をSH波から拡張して、多数の円筒形散乱体による二次元弾性波の多重散乱解析を行っています (図2)。また、最近では本解析法をさらに拡張して、多数の散乱体が規則的に配置された弾性平板 (フォノンニック結晶平板) における曲げ波の多重散乱解析を進めています。

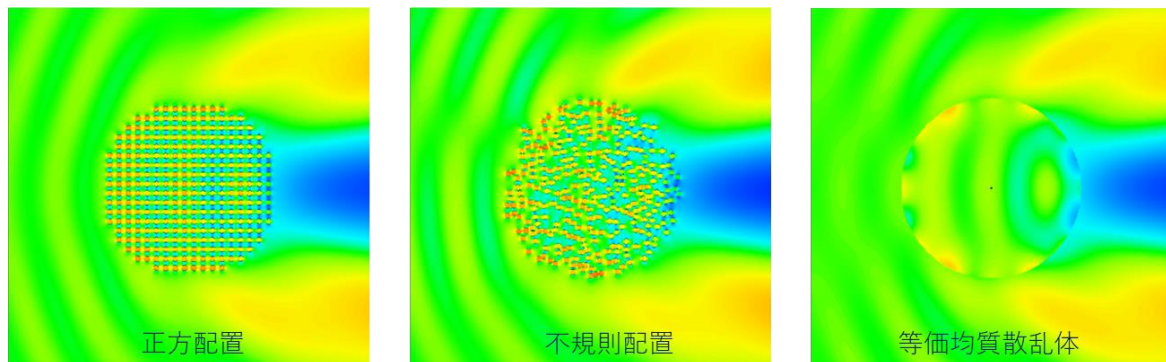


図2 有限領域に配置された多数散乱体による弾性波 (縦波) の散乱挙動

(2) CFRP積層構造における超音波伝搬挙動の解明と非破壊評価への応用

航空宇宙分野でCFRPは100 μ m程度の層を積層して用いられることが多く、層間界面の健全性が構造強度に大きな影響を及ぼします。層間界面の特性は積層構造における超音波伝搬挙動にも反映されますが、これをもとに界面特性の非破壊評価を行うためには超音波伝搬挙動の正確な理解が必要となります。当研究室では、界面特性を考慮に入れて積層構造による超音波反射・透過特性の理論モデルを構築するとともに、これをCFRP積層板に対して実測した反射または透過スペクトルにフィッティングすることにより、界面の特性を非破壊的に評価する逆解析法を提案しています。本研究には石井助教が学生時代から取り組み、理論モデル

構築と実験データ解析を担当しました。本研究ではまた、層厚さと同程度の波長の超音波がBragg反射を起こすことにより透過波振幅の低下を引き起こす現象（超音波バンドギャップ）を明らかにするため、周期積層構造の弾性波分散関係を詳細に検討するとともに、超音波測定で得られる透過率と周波数、入射方向の関係を理論的に再現することに成功しています（図3）。

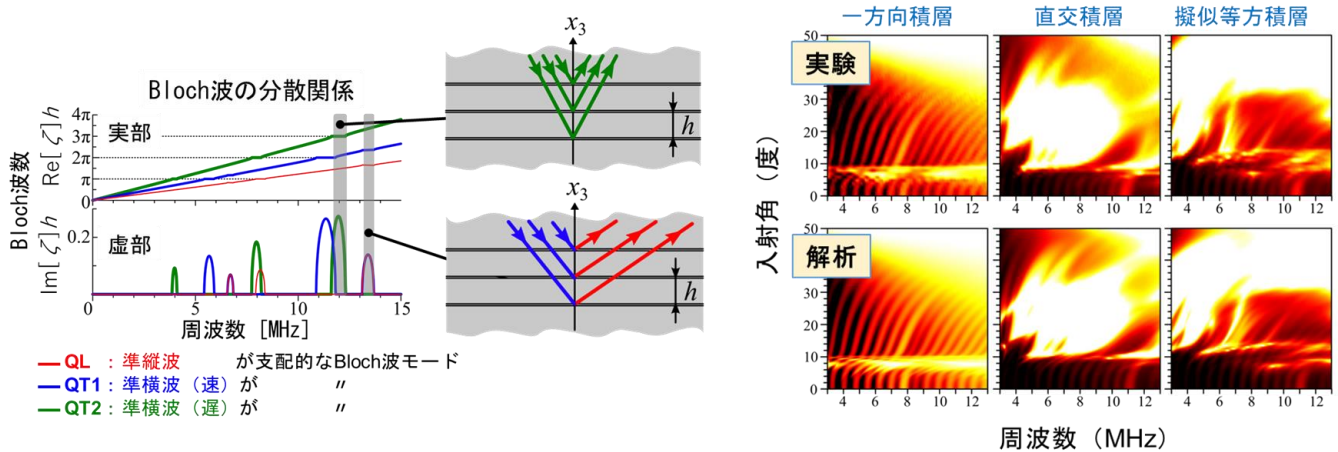


図3 周期積層構造におけるBloch波の分散関係とBragg反射条件（左図）およびCFRP積層板の超音波透過率—周波数—入射角の関係（右図）

また、CFRP積層構造を成形した際に残存する微小空孔状欠陥（ポロシティ）は、一定の含有率を超えると無視できない構造強度の低下をもたらすため、その非破壊評価が重要です。当研究室では、CFRP積層構造に超音波バンドギャップに対応する周波数の超音波を入射したとき観察される層間界面からの後方散乱波の持続特性がポロシティ含有率に応じて変化することを見出しました。従来、ポロシティ含有率の非破壊評価は主に超音波を入射したときの底面反射波または透過波の減衰に着目して行われてきましたが、本研究により層間界面からの後方散乱波に着目した新たな原理に基づくポロシティ含有率の非破壊評価が可能なことを示しました。また、数値シミュレーションを援用してCFRP積層構造の曲面部における超音波伝搬挙動を明らかにし、集束超音波を用いることで底面反射波の減衰に着目したポロシティ含有率評価が曲面部等の複雑形状部材に対しても適用可能なことを示しました（ポロシティ含有率の超音波非破壊評価に関する研究は国内航空機メーカーに勤務されている京大（航空、機械）卒業生の方々のご協力により進めることができました）。

(3) 固体-固体接触界面における非線形超音波現象の解析と実験的検証

輸送機器やプラント構造の超音波探傷において、温度変化や外力により閉じているき裂状欠陥から明瞭な反射波が得られず検査上の問題となることがあります。これを克服するための新たな検査法として、大振幅超音波を入射した際に入射波周波数の整数倍の周波数成分（高調波）が発生する現象を利用する非線形超音波法が期待を集めていますが、これを確立するためには接触界面における非線形超音波特性の理解が鍵となります。接触界面では表面上の突起群が変形して真実接触面積を構成し接触荷重を支えています。このような複雑界面の超音波特性を定量的に議論するとき、突起群の持つ寸法スケールに対して十分に長い波長の超音波に対しては、接触界面を等価な剛性（界面剛性）を有するスプリング界面と見なすことができます（最近、パリ東大学の研究者らとの共同研究において、同様の考え方で骨-インプラント界面の健全性を超音波で診断するための超音波反射・透過特性の理論モデルを構築しました）。

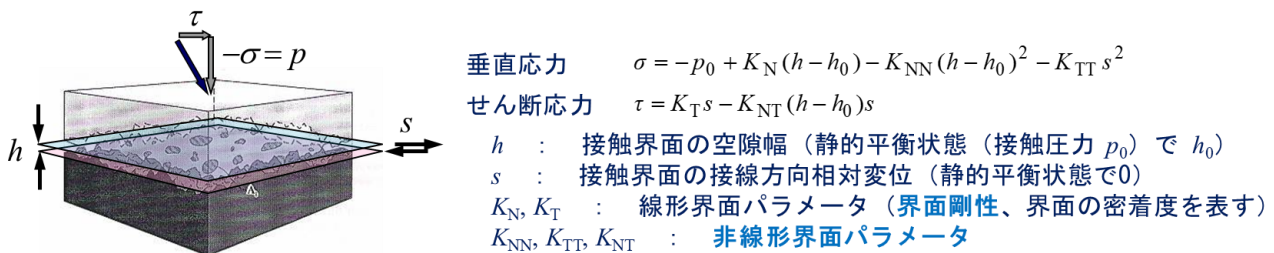


図4 接触界面の非線形スプリング界面モデルの概要

また、接触圧力が増加すると突起群がさらに平坦化し、新たな突起が接触に加わるため、界面剛性も増加します。筆者らは、この特徴を反映した非線形スプリング界面モデル（図4）を用いて接触界面における二次高調波発生を理論的に解析し、摂動法により求めた二次高調波振幅の圧力依存性が実測結果と良く対応することを確認しています。最近では、接触界面に異なる方向から入射した異なる周波数の超音波の相互作用による和・差周波数成分の発生（周波数ミキシング）についても理論的、実験的検討を進めています。さらに、航空宇宙分野では軽量化のため薄肉構造が多用されることに着目して、平板を伝わる超音波（ラム波）の疲労き裂における高調波発生や周波数ミキシングについても検討しています。

3. おわりに

以上に紹介した研究のほか、当研究室ではアイソグリッド構造（三角格子状の補強構造を有する薄板）や、折紙に着想を得た折畳み・展開可能な平板構造等、空間周期性を有するさまざまな構造における弾性波分散関係（弾性波バンド構造）を解析し、周波数に依存した波動伝搬の異方性や遮断効果について調べることで、弾性波の伝搬を自由に操作できる構造（弾性波機能構造）の創出につなげられないかと考えています。また、石井助教を中心に、非線形弾性体における弾性波の非線形相互作用（ノンコリニアミキシング）に関する理論的研究や、動的き裂進展の新しい数値シミュレーション法の開発も進められています。

当研究室は航空宇宙工学専攻（大学院）および宇宙基礎工学コース（学部）を担当しているため組織上は京機会との直接の関係はありませんが、これまでも機械システム学コース出身者が当研究室に多く大学院生として配属されて共に研究を行ってきました。本稿で紹介した内容に関心を持たれた方は筆者までご連絡を頂ければ幸いです。

研究室HP : <https://www.elastic.kuaero.kyoto-u.ac.jp/top.html>