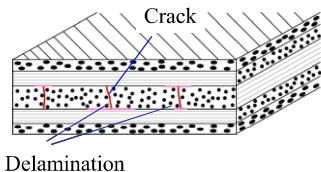


構造ヘルスモニタリングのための 組込型広帯域超音波送受振システムの開発

研究の背景

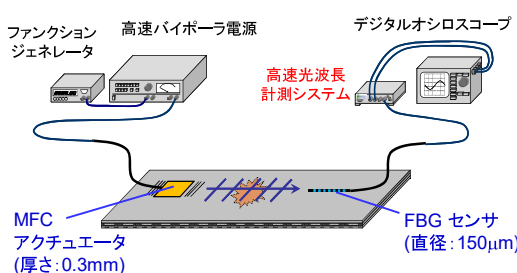


- 近年、航空機等への複合材料の実用化が急増
しかし複合材料中の損傷は複雑かつ検査が困難であるため、安全率を高く設定して使用

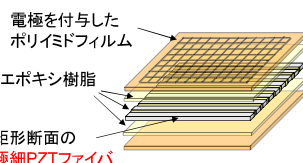
⇒ 容易に健全性を診断できる構造ヘルスモニタリングの適用が期待
その一つとして、Lamb波を積層板中に伝播させる手法が研究されている

MFC / FBG 超音波伝播システム

発振素子にMFCアクチュエータ、受振素子にFBGセンサを用いた、新たな超音波伝播システムを開発

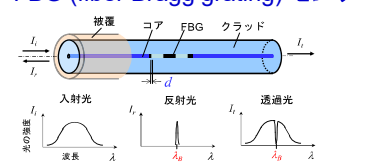


MFC (macro fiber composite) アクチュエータ



- ・広帯域にわたる発振特性
- ・超音波発振の指向性

FBG (fiber Bragg grating) センサ



$$\lambda_B = 2nd$$

λ_B : ブラッグ波長、 n : 有効屈折率、 d : グレーティング周期

- ・広帯域にわたる受振感度
- ・埋め込みが可能
- ・受振感度の強い指向性
- ・耐電磁ノイズ性

本システムの利点

1) 広帯域超音波を送受振可能

2) 強い指向性を有した伝播

3) 積層板と一体化可能

4) 大ひずみ下でも破断せず、高い信頼性を有する

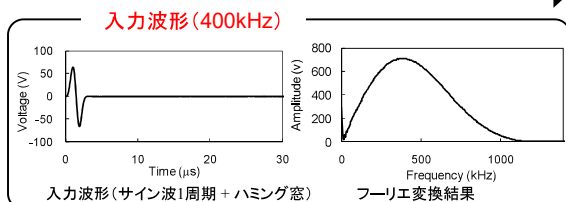
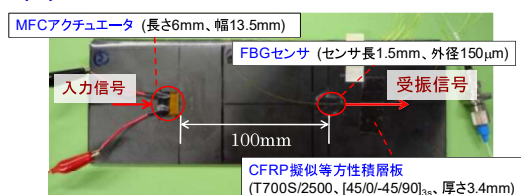
⇒ 広帯域に及ぶモード分散性を計測でき、損傷診断の信頼性向上が期待される

⇒ 構造ヘルスモニタリングに適した特徴を有する

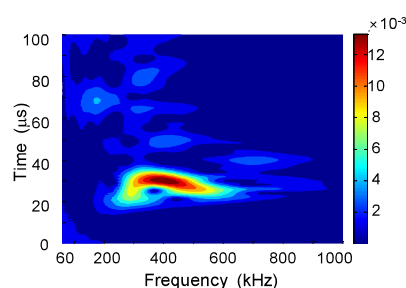
性能評価実験

CFRP擬似等方性積層板 ([45/0/-45/90]_{3s}) 中に広帯域 (周波数: DC~1MHz) な超音波を送受振

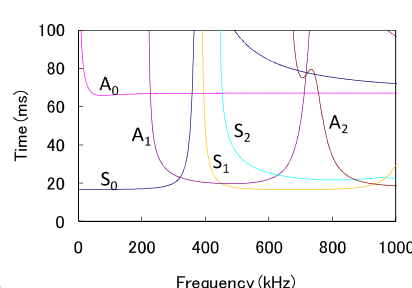
(1) モード分散性の計測



受振波形のウェーブレット変換結果



理論分散曲線

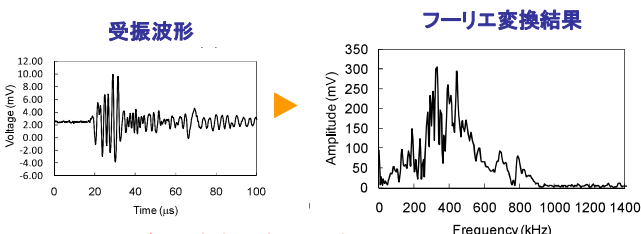


理論分散曲線と整合するLamb波のモード分散性が観察された。

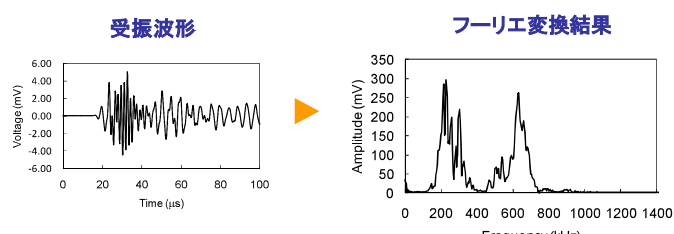
(2) 広帯域周波数特性の確認

バルク状PZTから成る広帯域AEセンサを用いた場合と比較し、MFC/FBG 超音波伝播システムの広帯域特性を確認

MFC-FBG



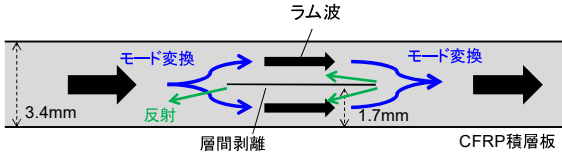
広帯域型PZT-PZT (広帯域型AEセンサ, 200~1300kHz)



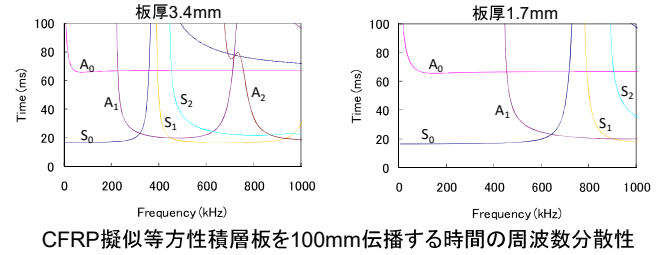
複合材料中の剥離損傷における 広帯域ラム波のモード変換挙動の観察

剥離部におけるラム波のモード変換

剥離損傷部では、超音波伝播経路の板厚が減少



ラム波のモード分散性は、積層板の板厚に依存して変化

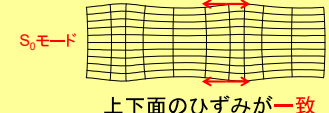


CFRP擬似等方性積層板を100mm伝播する時間の周波数分散性

剥離損傷での板厚減少により広帯域ラム波のモード分散性が変化するため、**剥離両端でモード変換が生じる。**

対称・非対称モードの分離発振と分離受振

対称(S)モード



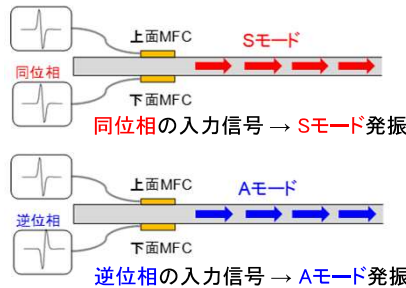
上下面のひずみが一致

非対称(A)モード

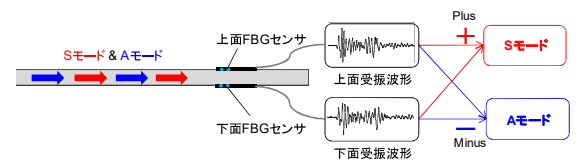


上下面のひずみが逆符号

上下面2個のMFCの同期駆動で分離発振



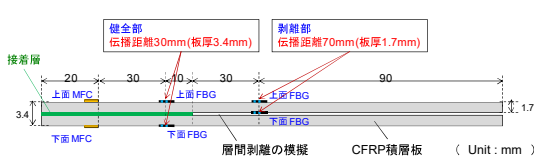
上下面2個のFBGによる分離受振



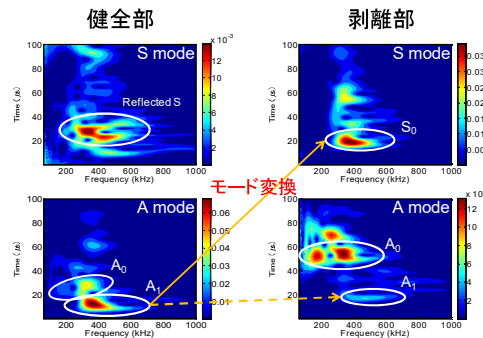
上下面の受振波形の足し合わせ → Sモード受振

上下面の受振波形の差し引き → Aモード受振

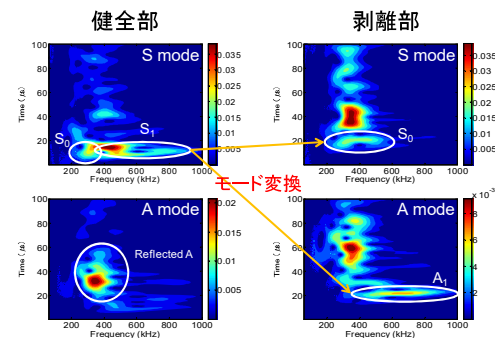
実験によるモード変換挙動の観察



- 二枚の半積層板([45/0/-45/90]₃, 厚さ1.7mm)の片端から60mmのみを接着し、層間剥離の左端を模擬
- 模擬した剥離の中にもFBGセンサを接着し、健全部と剥離部のモード分散性を計測

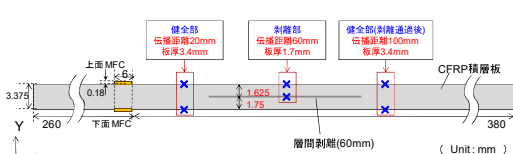


Aモード発振の場合のモード変換挙動

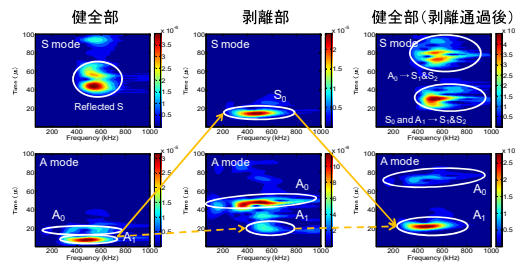


Sモード発振の場合のモード変換挙動

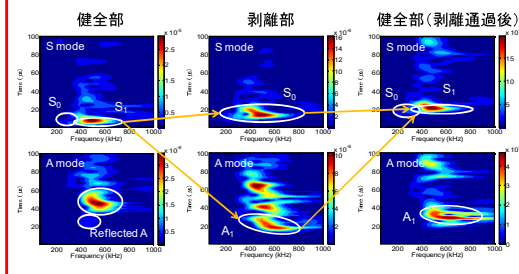
有限要素解析によるモード変換挙動の観察



- FEMソフトウェア: LS-DYNA
- 2次元の解析モデルを作成
- 長さ60mmの剥離を板厚方向中央に形成
- 受振波形: X軸方向ひずみの時間履歴



Aモード発振の場合のモード変換挙動



Sモード発振の場合のモード変換挙動

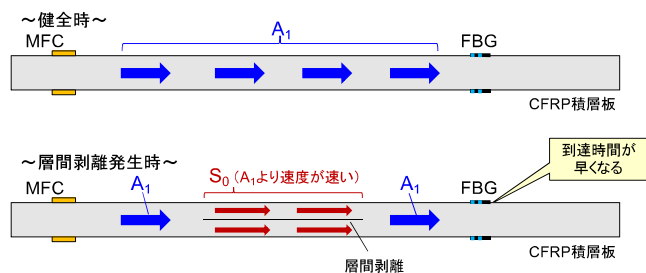
実験とFEMで観察された主要なモード変換挙動

(1) A_1 モード → S_0 モード → A_1 モード

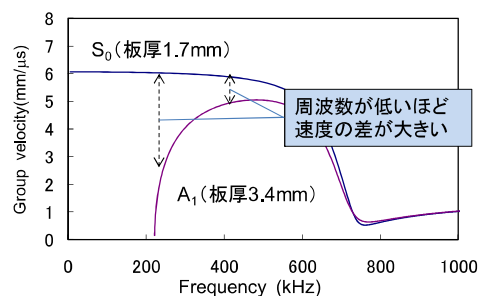
(2) S_1 モード → S_0 モード, A_1 モード → S_1 モード

広帯域ラム波のモード変換に基づいたCFRP積層板中の剥離損傷診断手法の確立

新たな剥離損傷診断手法の提案



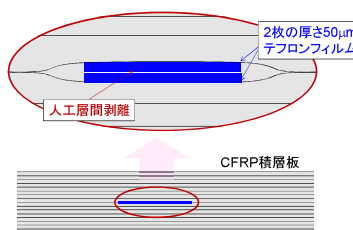
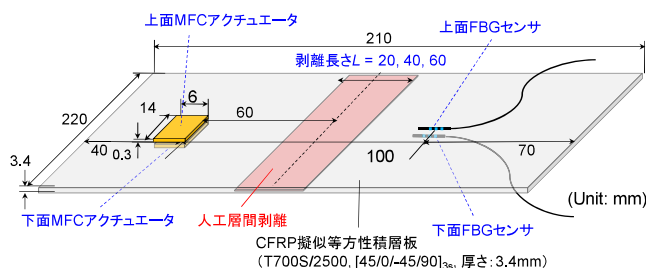
Aモード発振の場合のCFRP積層板中におけるモード変換



健全部のA₁モードと剥離部のS₀モードの伝播速度の分散性

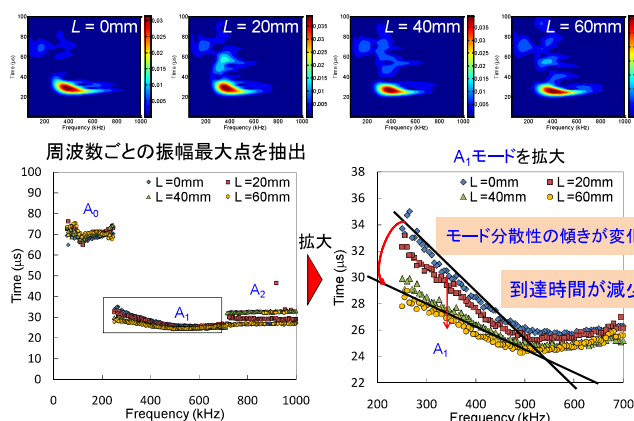
剥離損傷部でのモード変換により速度変化が生じ、到達時間の周波数分散性が変化する現象を活用

人工層間剥離の検知実験

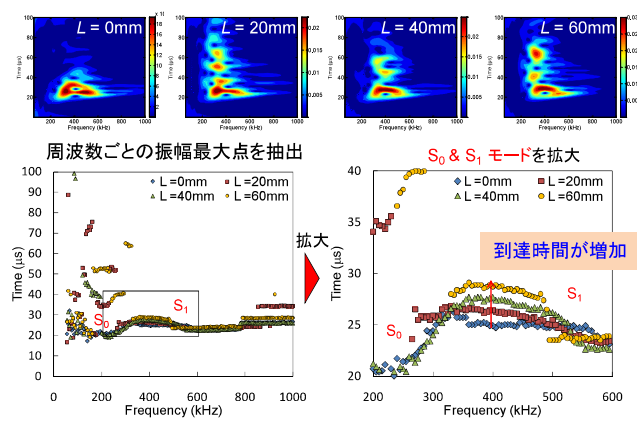


テフロンフィルムを2枚重ねて埋め込むことで、層間剥離を板厚方向中央に人工的に形成

実験結果1(Aモード送受振)



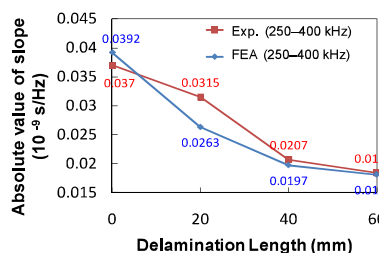
実験結果2(Sモード送受振)



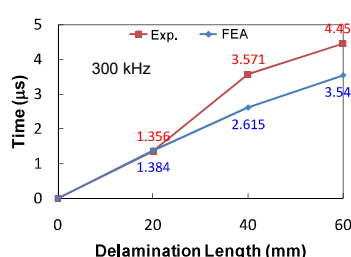
剥離長さLの増加に伴い、A₁モードの到達時間が早まるとともに分散性の傾きが小さくなる。また、Sモードは到達時間が遅くなる。(有限要素解析でも同様の変化が確認できた。)

剥離長さの定量的推定のための指標

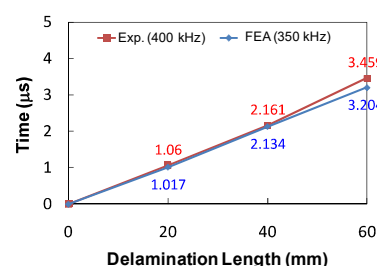
振幅最大点の分散性に線形近似を行い、剥離長さを定量的に推定するための指標を抽出



A₁モード分散性の傾きの絶対値



A₁モードの到達時間の減少量



Sモードの到達時間の増加量

いずれの指標も、実験とFEMの結果がほぼ一致しており、剥離長さLの増加に対して単調に変化している。

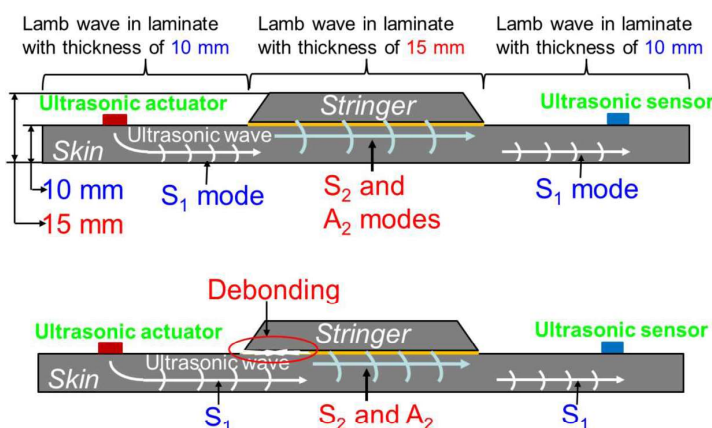
ラム波モード変換に基づいたCFRP製 スキン・ストリング接着構造中の剥がれ損傷の検知

研究目的

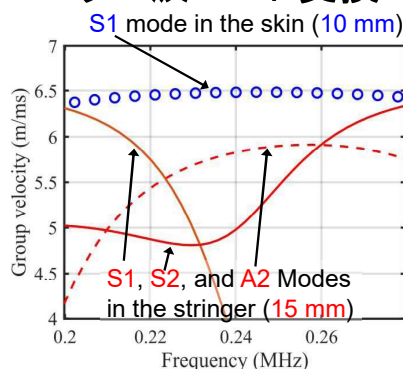
航空機へのCFRP製スキン・ストリング構造の適用が進んでいる。CFRP製のスキン材とストリング部材との結合は接着が望ましいが、その接着部に剥がれ損傷が発生すると、強度が大きく低下してしまう。そこで本研究では、超音波ラム波によって剥がれを早期に検知可能な手法を構築する。

スキン・ストリング接着部におけるラム波モード変換

・ 超音波ラム波の伝播挙動



・ ラム波モード変換

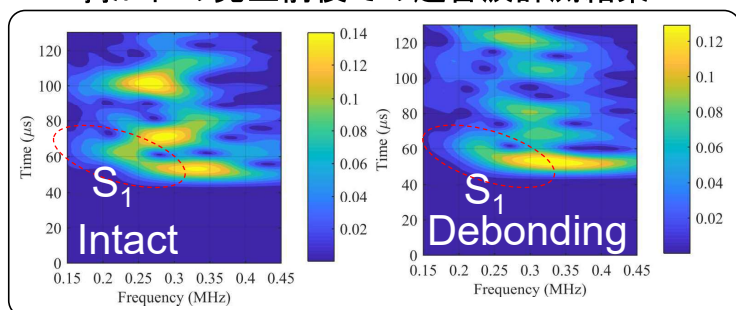


スキンを伝える S_1 モードは、ストリング接着部で群速度が低下するとともに、 A_2 と S_2 モードに変換される

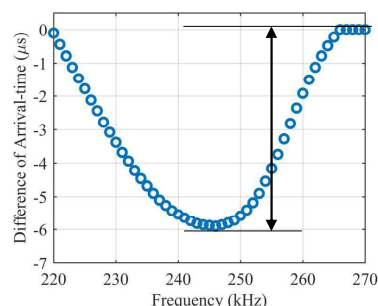
モード変換に伴う群速度の変化を利用し、接着剥がれを検知する

・ 剥がれ検知の実験結果の一例

剥がれの発生前後での超音波計測結果



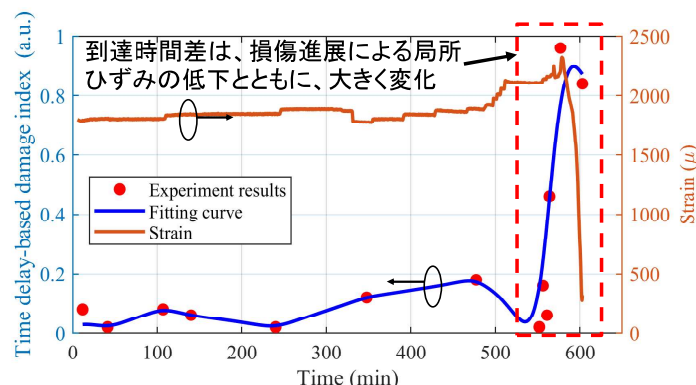
S_1 モードの到達時間の変化



剥がれが発生することにより、 S_1 モードの到達時間が早くなる傾向が確認できた

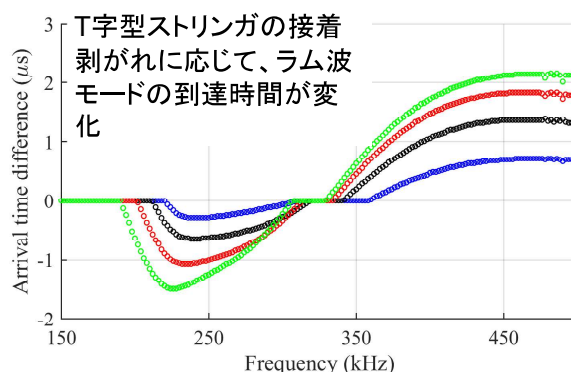
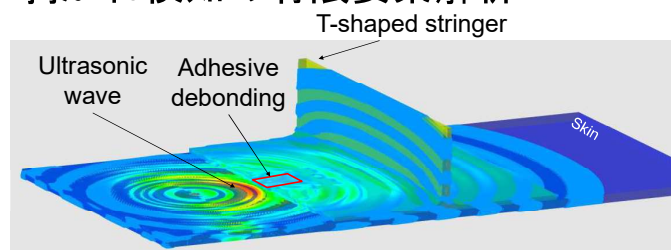
剥がれ検知法の検証

・ 剥がれ進展実験での実時間計測



ラム波モードの到達時間差は、接着剥がれ(20 mm~)の進展に従い、急激に変化することが分かった。これを損傷評価指標に用いることで、接着剥がれの実時間モニタリングの実現が期待できる。

・ T字型ストリング補強構造における剥がれ検知の有限要素解析



CFRP製スキン・ストリンガー周期構造を伝播するガイド波の分散関係

研究目的



ボーイング777のスキン・ストリンガー構造

近年、航空機等への複合材料構造の実用化が進んでいる。そして、その構造内に生じた損傷をリアルタイムに検知することを目的とした、構造ヘルスマニタリング技術の研究開発が行われている。その一つに超音波を用いた診断手法が挙げられるが、その診断の信頼性を高めるためには、超音波の伝播挙動を明らかにしておく必要がある。そこで本研究では、CFRP製スキン・ストリンガー周期構造を対象として、その構造中の超音波伝播モードを明らかにできる理論計算手法を構築する。

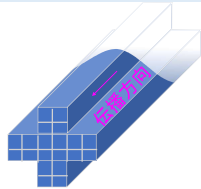
半解析的有限要素法による伝播モードの算出

半解析的有限要素法とは？

柱状体における超音波伝播挙動を明らかにする理論解析方法の一つで、超音波の伝播方向には解析的に扱い、垂直断面内では有限要素に分割して計算を行う。

- ・異方性材料にも適用可能
- ・任意断面形状を扱える

T. Hayashi, W-J. Song, J L. Rose , Ultrasonics, 41 (2003) 175-183



変位

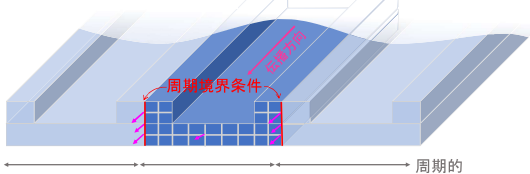
$$u(x, y, z) = N(x, y) U^j e^{i(kz - \omega t)}$$

断面内では要素分割
伝播方向には理論式

仮想仕事の原理 $\Rightarrow H(\omega, k) U = 0$
 $3n \times 3n$ 行列 $3n$ 縦ベクトル
(H は密度、弾性定数、幾何形状で定まる)

$\Rightarrow$ 非自明な解が、各伝播モードに対応

拘束条件(周期境界を含む)のある場合へと拡張



独立自由度の成分で記述

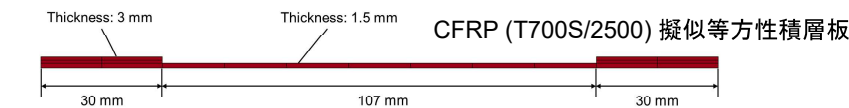
$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{3n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1f} \\ a_{21} & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ a_{3n1} & \cdots & & a_{3nf} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_f \end{pmatrix}$$

変位 U 変数変換 a 独立自由度 V

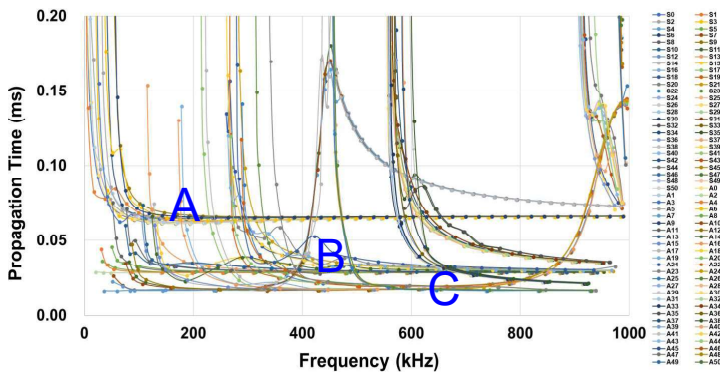
$\Rightarrow G(\omega, k) V = 0$ 非自明な解を求める

ここで $G(\omega, k) \equiv a^\dagger H(\omega, k) a$

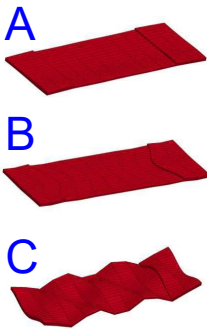
CFRPスキン・ストリンガー周期構造における分散関係



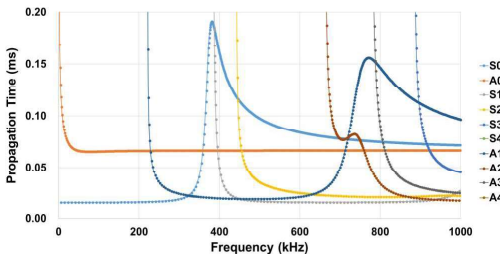
スキン・ストリンガー周期構造の断面図



距離100mmにおける各モードの伝播時間の分散性



CFRP (T700S/2500) 擬似等方性の無限幅スキン平板(板厚: 1.5mm)の場合



距離100mmでの伝播時間分散性

平板と比べるとモードの数が極めて多い
平板とは異なる伝播速度のモード群が存在
(ストリンガー補強部分に対応)

結言

複雑な周期構造におけるガイド波のモード伝播挙動を明らかにでき、構造ヘルスマニタリングシステムのデバイス配置の検討などに寄与することが期待できる。