

構造損傷検知のための 超音波弾性波伝播の可視化技術

航空本部 構造技術研究グループ

神田 淳



構造損傷検知技術の必要性

航空機は地上で定期的に点検を実施し、機体構造に損傷が無いかが検査を行う。

現状、資格が必要であったり、検知の精度・コスト・時間の制約があるなど、検査の効率の点で大きな問題がある。

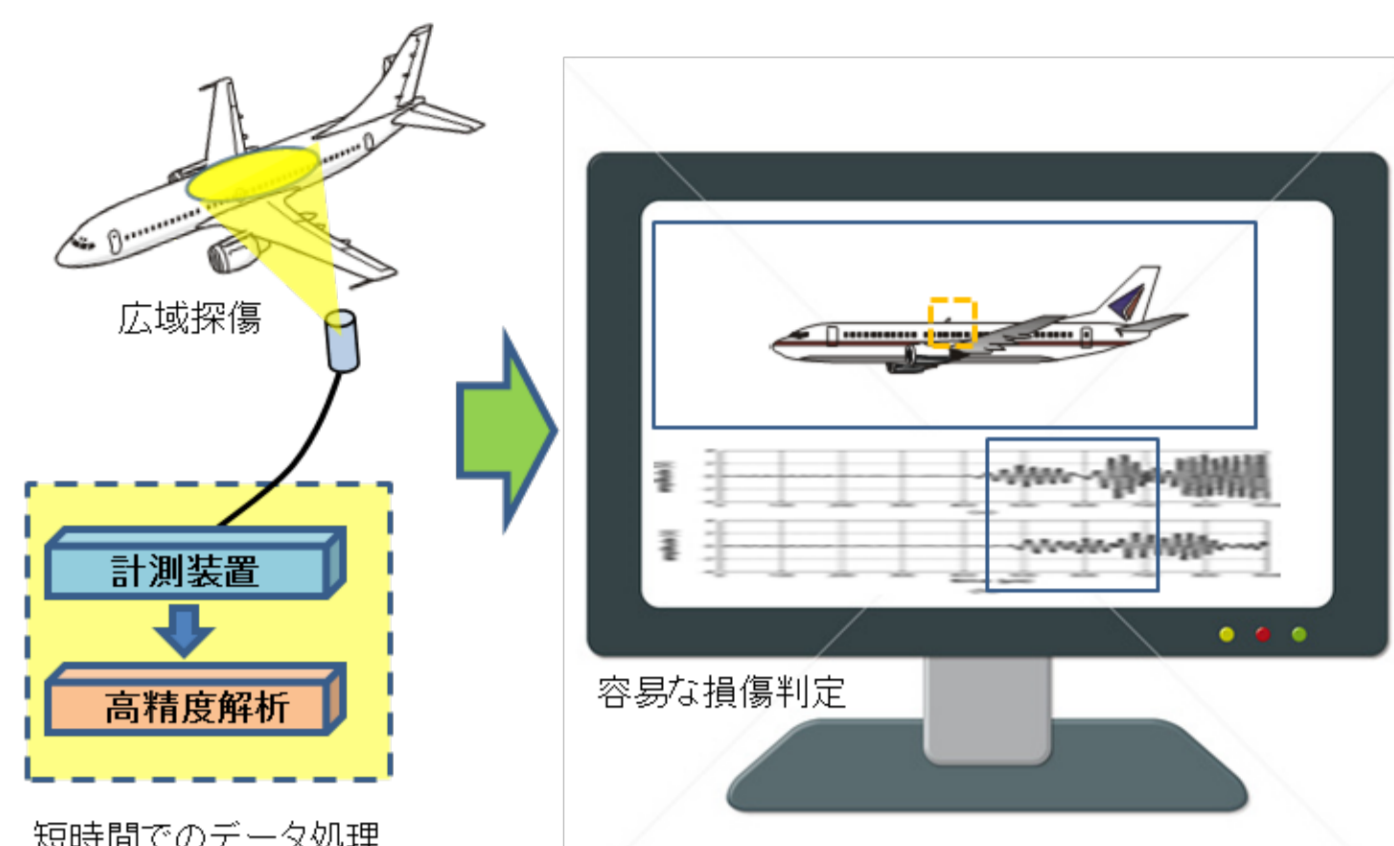
- ①目視による検査
小さな損傷の検知は困難
判定に個人差
- ②機器による検査
特殊な資格や高価な機器が必要
広域の検査には向いていない

航空機の構造損傷検知技術

	既存技術					新技術
	①過流探傷	②超音波探傷	③X線	④浸透探傷	⑤目視検査	Lamb波
探傷範囲	× 探触子直下	× 探触子直下	○ 広域	× 検査液塗布部	○ 広域	○ 広域
探傷性能 (検知亀裂長 [mm])	○ 0.8	○ 3.1	× 19	○ 3.1	× 25	○ 3.0-5.0 (目標値)
損傷判定	× 要検査資格 判定に個人差	× 要検査資格 判定に個人差	△ 要検査資格	○ 判定は容易	△ 判定に個人差	○ 判定は容易

整備(検査)効率の向上はエアラインの重要な課題であり、新しい構造損傷検知技術の開発が必要

- 広域を高速で検知する技術
- 資格が不要で簡便な装置
- 精度の高い検知技術



新しい検知技術のイメージ

超音波弾性波(Lamb波)の伝播を利用した
新しい構造損傷検知技術の開発

超音波弾性波(Lamb波)と構造損傷検知

Lamb波とは、平板や棒状構造材料等を伝播する超音波弾性波

- 減衰が少なく長距離を伝播する
- 波動方程式で表現され、多くの振動モード(A₀, A₁, ..., S₀, S₁, ...)が存在
- 伝播速度の周波数依存性(分散性)
- 振動数は数十kHz~数MHz
- 振幅が数百pm~数十nm程度の超微小振動

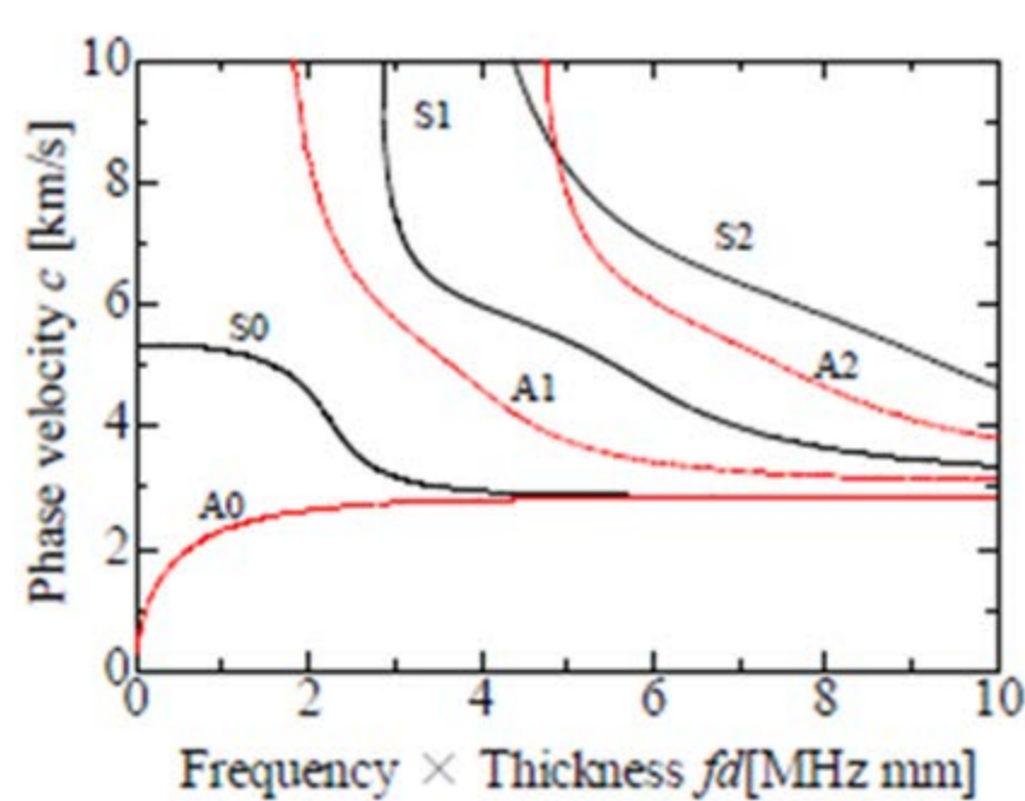
Lamb波の構造損傷検知への適用

- Lamb波の伝播の変化を捉えることにより広域で損傷検知が可能
- 損傷検知の実用化には、要素技術の開発が重要
 - ①複雑構造や損傷周りのLamb波伝播特性の把握
 - ②Lamb波伝播数値シミュレーション技術の開発
 - ③損傷同定技術の開発

波動方程式

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$



分散曲線

Lamb波伝播の可視化技術は
これらの要素技術の開発に
不可欠

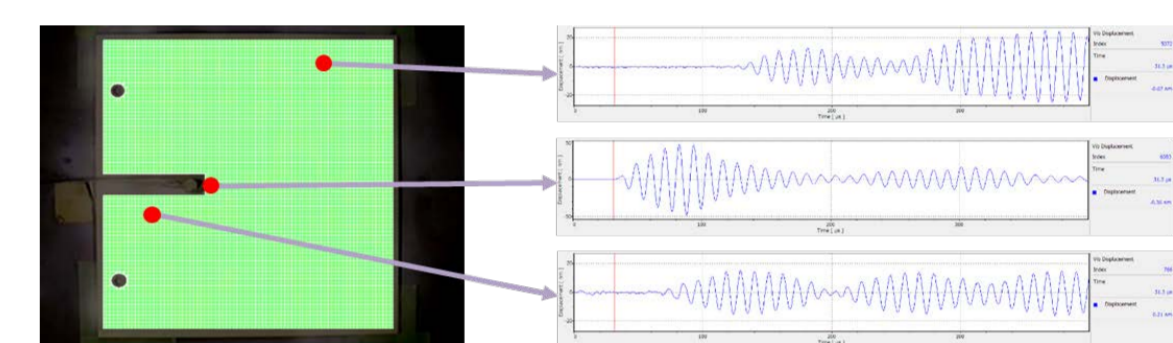
Lamb波計測とMaVES

従来、Lamb波伝播の可視化は時間・精度・能力上の制約があり困難

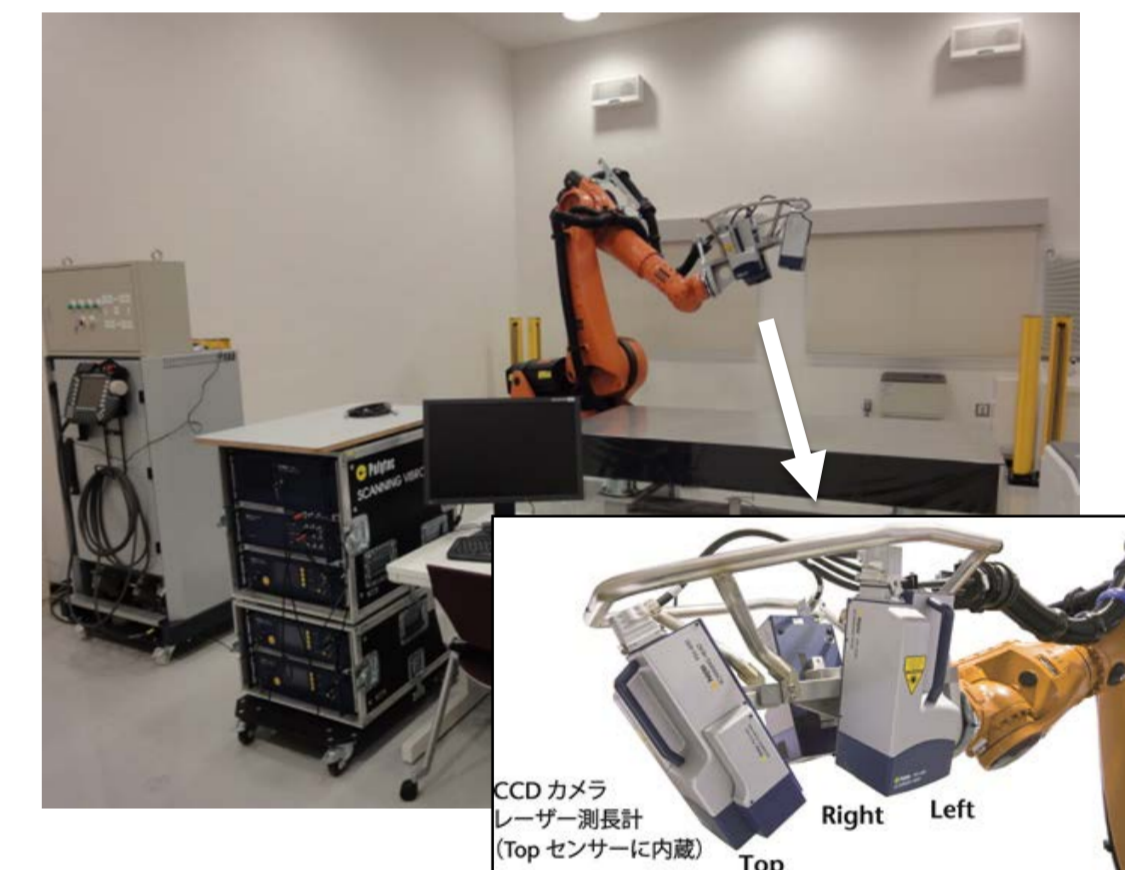
- 手動計測による長時間計測が必要(例えば100点/6時間-1点あたり約200秒)
- 可視化のためのジオメトリ作成(計測点設定・座標データ作成)に半日かかる
- 接触型センサーによるLamb波への影響
- 面内振動の計測は非常に困難(面外のZ軸方向のみで、A₀波計測がメイン)

JAXAで整備したMaVES(多軸振動非接触自動計測システム)のLamb波可視化への適用

- LaserのScanningによる自動・短時間で多数点計測(1点あたり約1秒)
- ジオメトリの自動生成(計測点生成・座標データ取得で10分程度)
- Laserによる非接触高精度計測
- 3軸方向振動の計測による様々なLamb波振動モードの(A₀, S₀波等)の可視化



従来のLamb波計測イメージ



MaVES

MaVES(多軸振動非接触自動計測システム)
3軸方向の振動を非接触/自動で計測するシステム
• JAXA, 独Polytec社, 独KUKA社が共同で開発
• 2010年3月に整備(@JAXA調布航空宇宙センター)
機能
• 3基のLaser Doppler Sensorにより、X,Y,Z方向に速度成分を分解して、3軸方向の振動速度を計測
• Sensor内蔵のミラーおよびロボットによるスキャンにより、自動計測が可能
• CCDカメラ画像によりPC上で計測点を設定し、レーザー測長計で計測点の位置座標を計測、ジオメトリを自動で作成
性能
• 振動速度 0~10m/s
• 振動数 0~5.12MHz

Lamb波の可視化

損傷を有する供試体を伝播するLamb波をMaVESにより可視化する試験を実施した。

試験概要

- 供試体の計測点のジオメトリ(計測点とその座標データ)を自動で設定
- AEセンサーで供試体を加振してLamb波を発生
- 加振と計測の同期をとりながら、全点を自動でScanningして計測
- 全点のジオメトリと計測データによりLamb波伝播を可視化

供試体

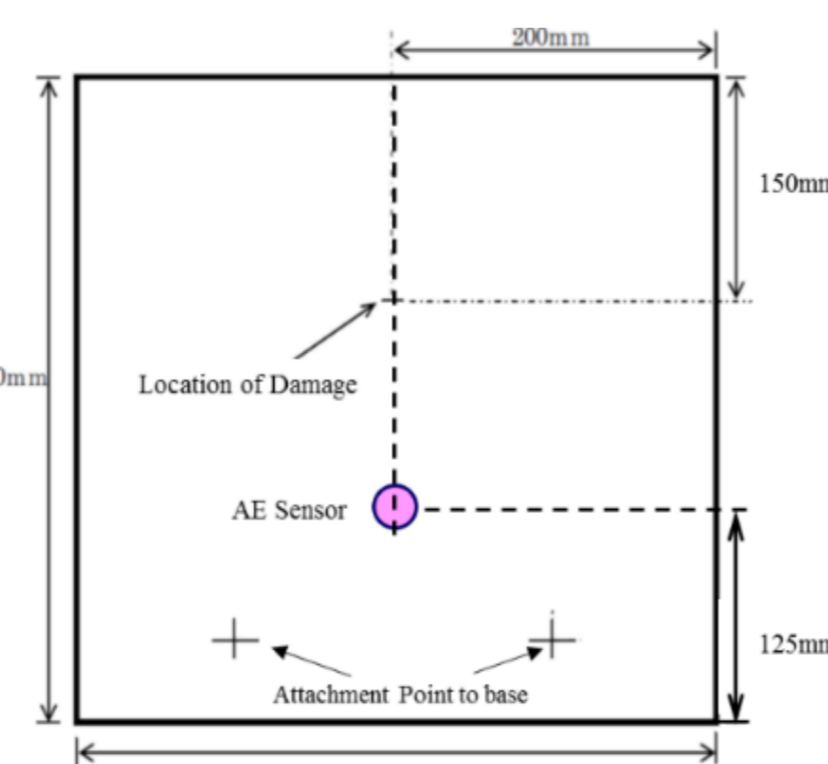
- Al合金(A2024)平板
400mm x 400mm x 2mm
- 20mm幅の貫通亀裂損傷を人工的に付与

計測条件

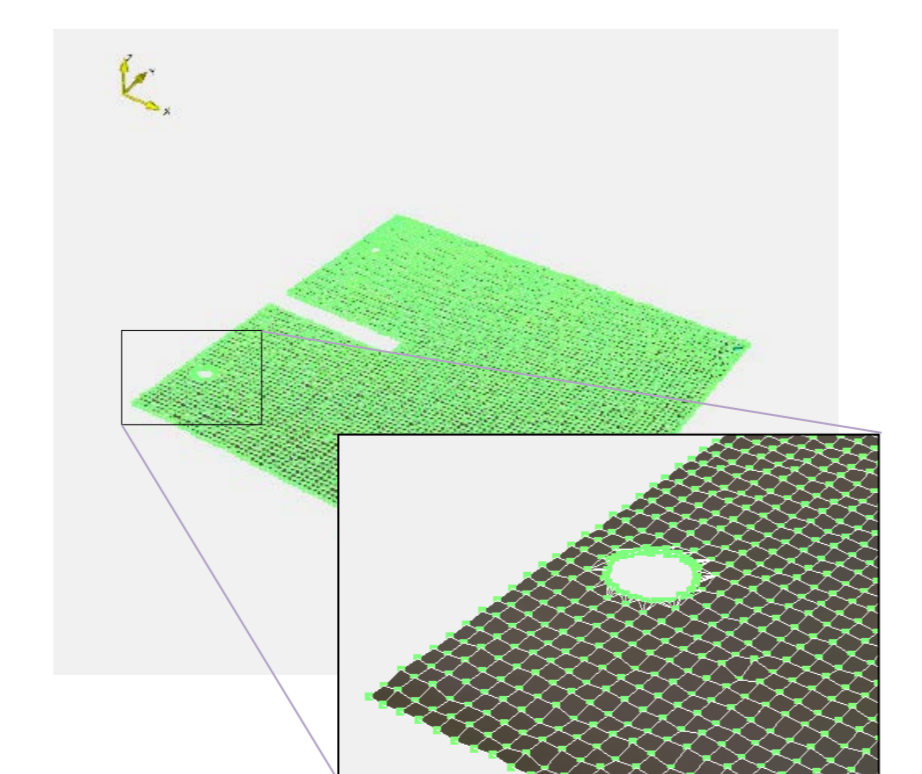
- 加振波形はsin波(90.5kHz)を5波
- 計測点7196点(約5mm間隔)
- 各計測点で50回の平均化
- サンプリング周波数2.56MHz、1024サンプリング(時間にして400μs)



供試体(写真)

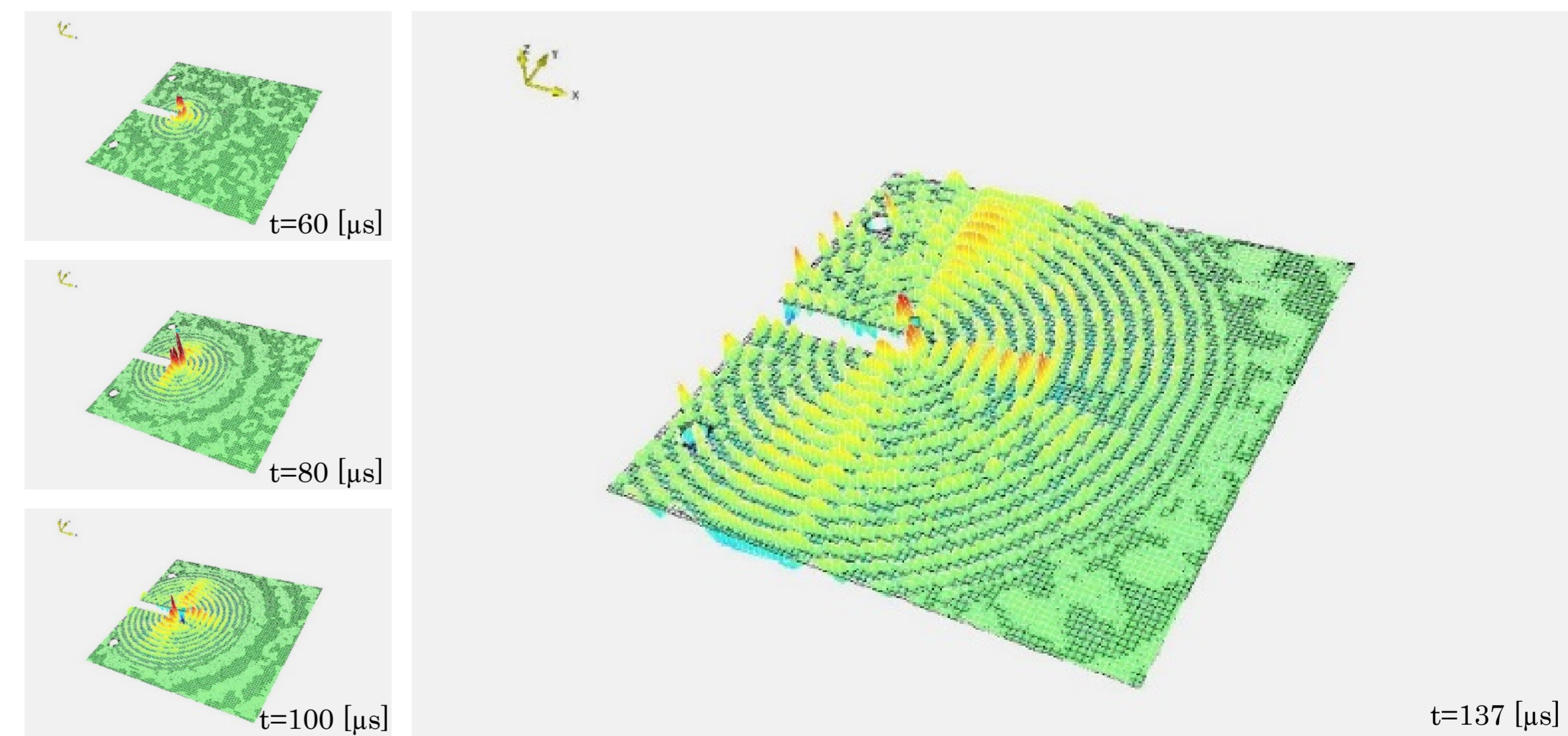


供試体



計測点のジオメトリ

Lamb波の伝播可視化結果



伝播速度は約1.24[km/s]、分散曲線でd=2.0[mm], f=0.0905[MHz]とすれば、A₀波振動モードのLamb波に該当、貫通亀裂部でLamb波の伝播が遅れている

おわりに

MaVESによりLamb波計測の能力・効率が飛躍的に向上した

- 例えば100点計測が6時間→2分弱
- 空間分解能の向上で、複雑な伝播の様相を把握できるようになった
- 3軸方向のLamb波伝播の可視化が可能となった
- 数千点にも及ぶLamb波伝播計測および可視化は世界的にも例が無い

本可視化技術の外部活用

- MaVESの設備外部供用によるLamb波伝播計測
- 「ラム波を用いた航空機接着構造健全性診断技術の開発」経産省次世代構造部材創製・加工技術開発プロジェクト 富士重工・東大と共同研究
- 「航空機構造の広域損傷検知のためのレーザー誘起プラズマによるLamb波の生成」(科研費)
- 「弾性波伝播による構造物の欠陥/損傷同定システムの構築に関する研究」(東大との共同研究)
- 「Lamb波伝播解析に基づくCFRP構造の損傷同定」(東北大・千葉大との共同研究)
- 「レーザーパルス衝撃によるLamb波の生成技術と損傷広域検知への適用研究」(芝浦工大・北大との共同研究)