



第8回レーザー学会「ユビキタス・パワーレーザー」専門委員会

第8回科学技術交流財団「マイクロ固体フォトンクス」研究会

2020年2月20日 自然科学研究機構 分子科学研究所

# CFRPの非破壊検査のための 超音波励起に適したレーザー波長 に関する研究

東京大学

生産技術研究所

齋藤 理

# 内容

1. はじめに CMIの紹介
2. CFRPのレーザ超音波による非破壊検査
3. レーザ超音波可視化技術に関する研究の紹介
4. CFRPに対する超音波励起に適したレーザ波長の検討
5. 結論

## 1. はじめに CMIの紹介

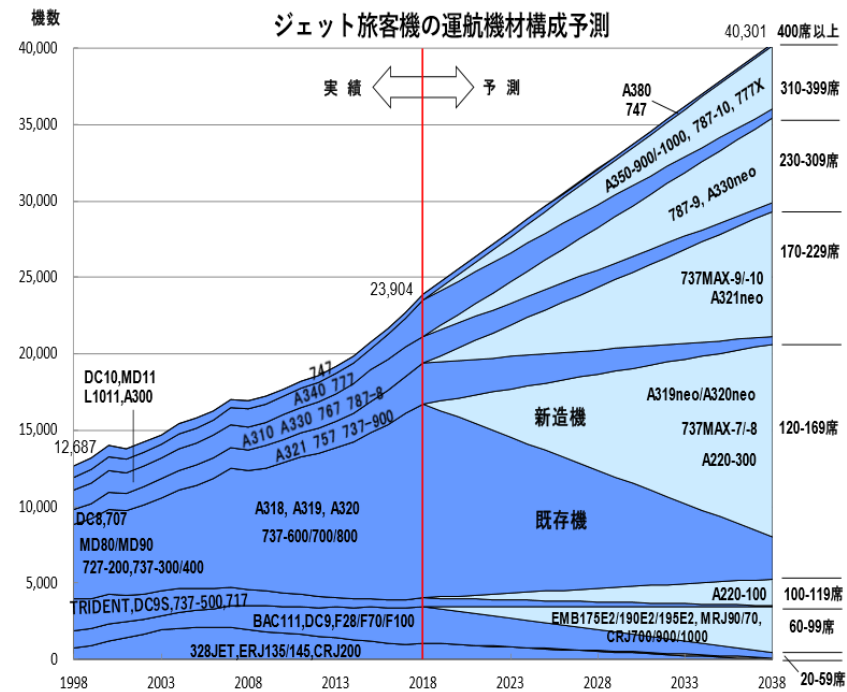
Consortium for Manufacturing Innovation

先進ものづくりシステム連携研究センター

# 航空機産業とCMI

航空機産業は成長産業のひとつ

年率5%の成長が見込まれ、  
今後20年間で約3万3千機（約300兆円）  
年間15兆円の市場規模が予測



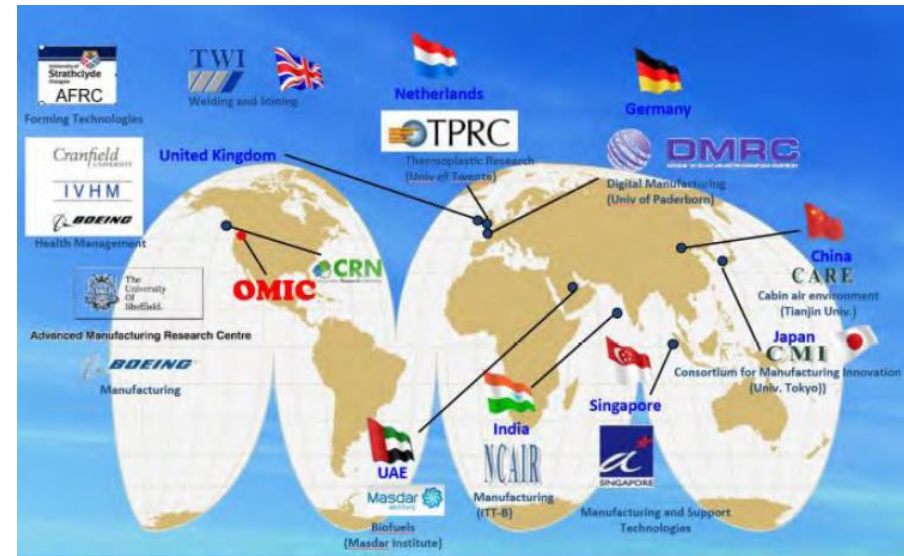
(出展) JADC

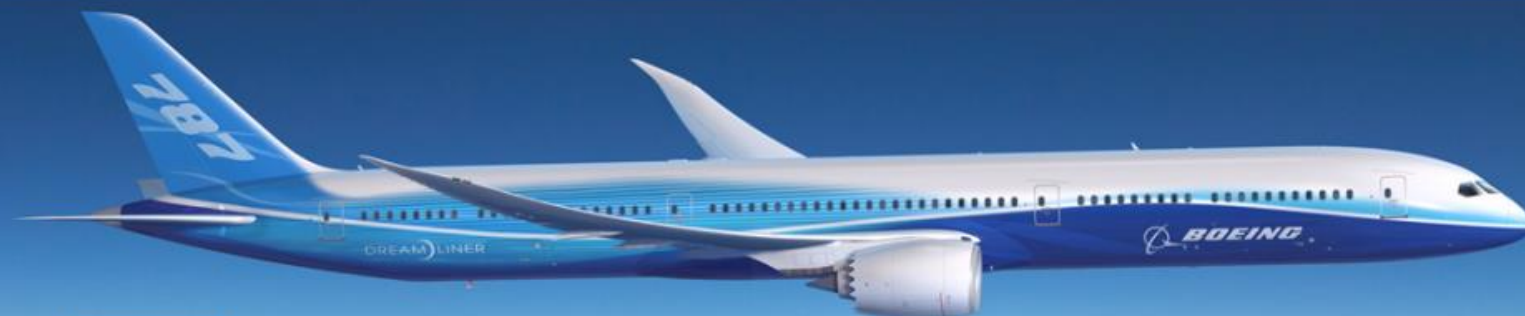
CMIの目標：

産学官の連携により  
高度な航空機製造技術を開発し、  
国際的競争力を維持する

2013年4月発足

多数の企業が参加する、  
長期の産学官プロジェクトは  
国内ではCMIが初





センター長  
白杵 年

「先進ものづくりシステム連携研究センター」は2013年4月に発足しました。

航空機には高い安全性と、優れた経済性の両立が求められます。そのために、高強度軽量材料である炭素繊維複合材やチタン材、高力アルミ材の採用が急速に進んでいます。

産学官の連携により、複合材加工技術、難加工材の切削技術、高速切削技術、等を革新的に進歩させることで、航空機製造技術の高度化を目指します。

- ご案内 -

2019/10/18

### 第7回CMIシンポジウム 開催報告

#### 新時代の航空機製造技術を目指して

2019年10月11日、東京大学生産技術研究所 コンベンションホールにて、第7回CMIシンポジウムを開催致しました。多くの方にご参加頂き、無事終了しました。当日の講演資料を「イベント情報」に掲載しております。

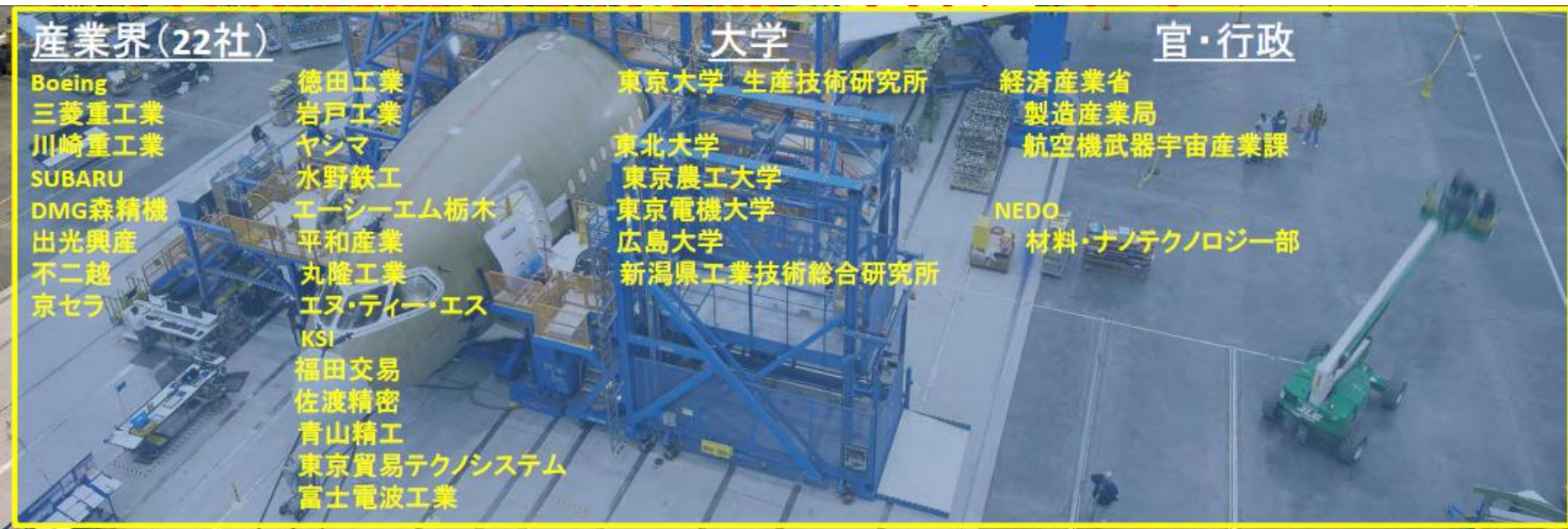
2019/9/24

### CMI企業メンバー 一般公募中

CMI企業各メンバーの募集をいたします。

- ・コアメンバー
- ・アソシエイトメンバー
- ・Small and Medium Enterprise メンバー

詳細をご覧いただき、ぜひお問い合わせください。



予算：NEDO, 企業からの会費

研究拠点：東京大学 生産技術研究所 (柏, 駒場)

再委託先 (東北大、東京農工大、東京電機大  
新潟工業技術総合研究所、広島大)

生産技術スキル  
Production skill



生産科学

Production Science

High efficiency production technology

高効率生産技術

飛躍的な高度化

Dramatic advancement



## 研究テーマ (FY2019)

Machining Technology for Aluminium Alloy

1. 先進アルミ合金の切削加工技術開発

Residual Stress Control of Aluminium Alloy

2. Al-Li合金切削:機械加工後の歪最小化のための高精度加工技術の開発

3. 炭素繊維複合材の切削加工技術開発

Drillings of CFRP

5. ロボット切削システムの開発

Robotic Milling Technology

8. 炭素繊維複合材に適した非破壊検査技術の開発

NDI for CFRP

New 1. チタン合金切削(オービタル穿孔)

Orbital Drilling

New 2. メタルデポジション

Metal Deposition

New 3. アルミ合金の残留応力・変形制御

Residual Stress Control of Aluminium Alloy

New 5. 切削工具コンペ

Cutting tool competition

New 6. 大面積フェイスール

Faying surface sealing

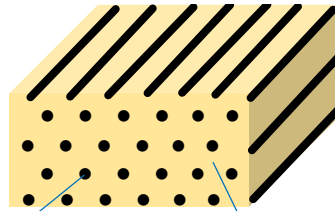
他にFS1件、黄色はNEDO研究、赤色はCMI研究

## 2. CFRPのレーザ超音波による非破壊検査



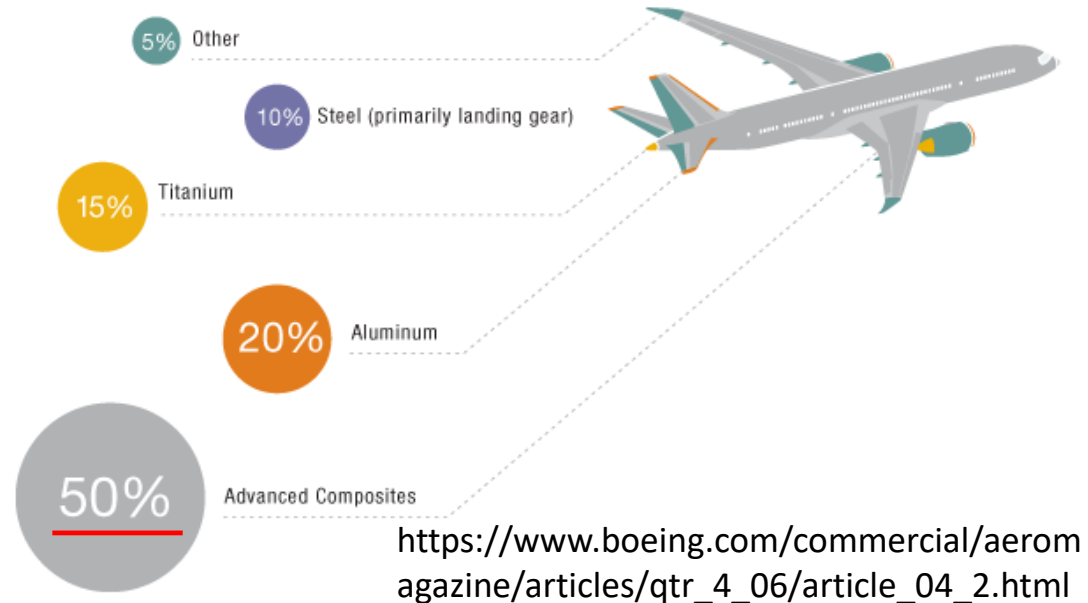
# 炭素繊維強化プラスチック

Carbon fiber reinforced plastics (CFRP)



炭素繊維

エポキシ樹脂



<https://www.boeing.jp/ヒシネス部門-紹介/ホーインク民間航空機部門/787型機の概要/787-photo-gallery.page?#gallery/1>

ボーイング787では50%を  
複合材が占めている

(主翼や胴体など)

CFRPは軽くて比強度が高く、航空機等への適用が進んでいる

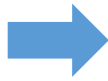
# CFRP部材の成形

プリプレグシート

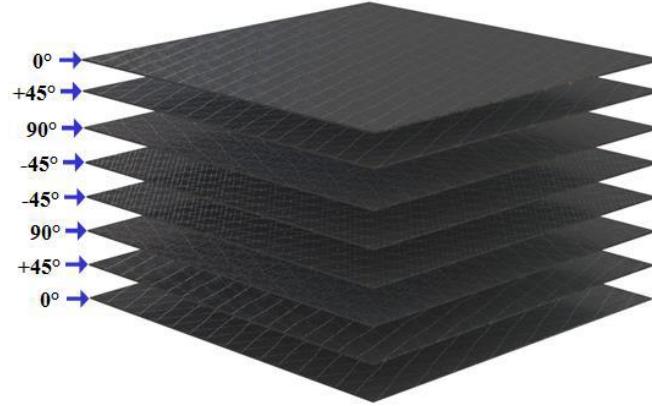
炭素ファイバー  
硬化前のエポキシ樹脂



<http://www.torayca.com/>



ファイバー方向を変えながら  
プリプレグを積層



[http://airlines.org/wp-content/uploads/2016/11/9\\_27\\_1115.pdf](http://airlines.org/wp-content/uploads/2016/11/9_27_1115.pdf)



三菱重工技報 Vol. 51, No. 4, 8-9 (2014)



三菱重工で製造されたCFRP製主翼

真空引き後、オートクレーブ内で加熱・加圧し硬化

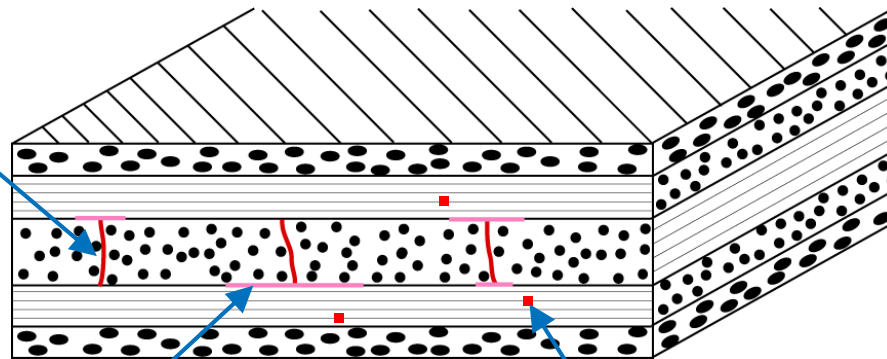
# 衝撃によるCFRPの損傷

CFRP部材が受ける衝撃例

- ・ ツールドロップ
- ・ バードストライク
- ・ 落雹

## CFRPの典型的な損傷

層内の亀裂

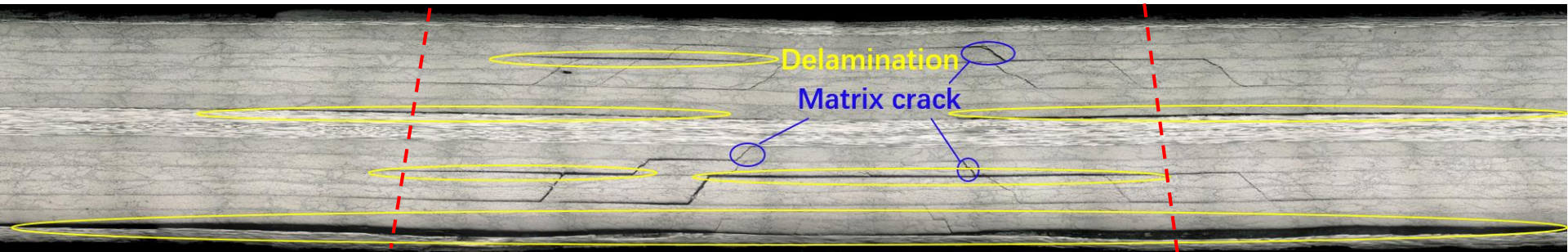


層と層の剥がれ (層間剥離)

繊維の破断

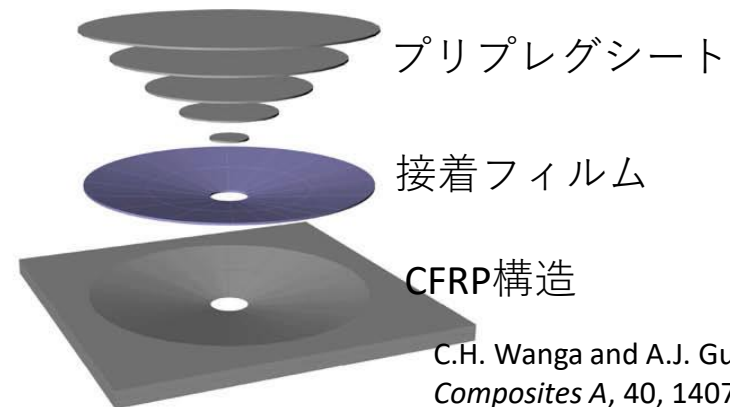
# CFRPの損傷

衝撃損傷部の断面の光学顕微鏡像



CFRPの内部損傷は、外見からは判断できない  
非破壊検査で確実に見つけることが重要

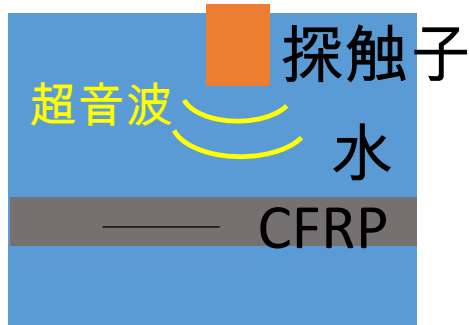
なお、  
損傷が見つかったら  
「パーツ交換」または「修理」



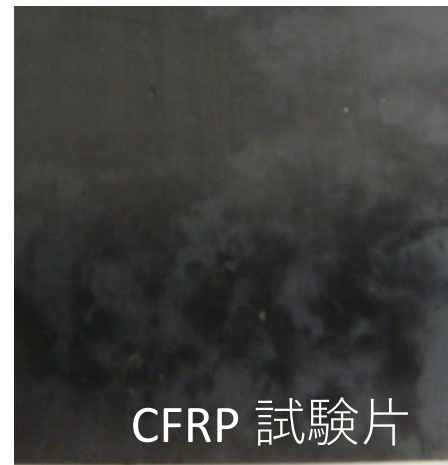
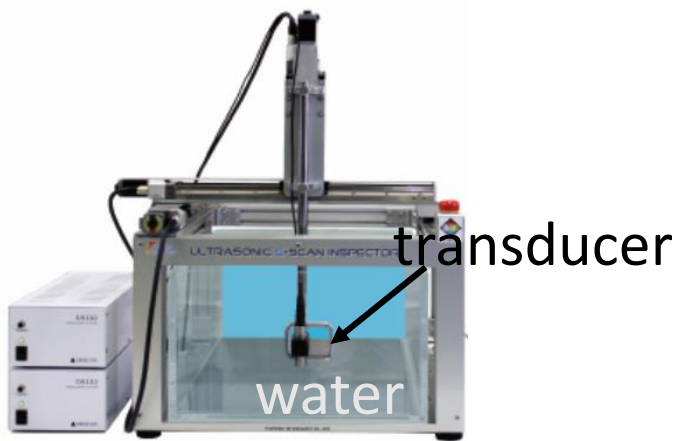
C.H. Wanga and A.J. Gunnion,  
*Composites A*, 40, 1407-18 (2009)

# 従来の超音波探傷法

(従来法)

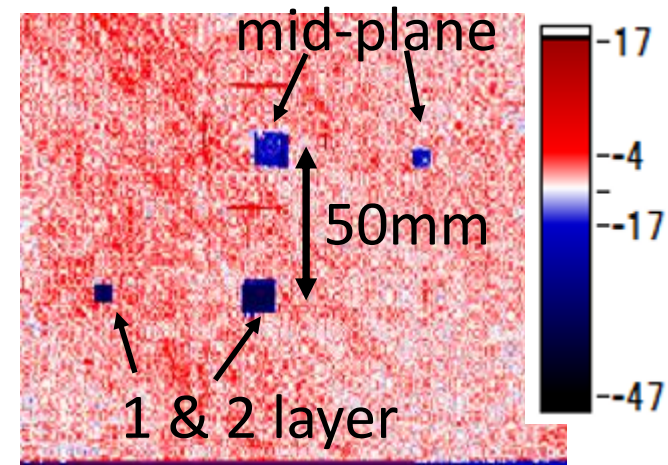


探触子から超音波を入射し、  
剥離からの反射波を捕らえて検出する  
探触子を水中でスキャンさせながら検査



CFRP 試験片

写真



検査画像

- ・水の媒介を必要とする
- ・曲面に合わせて探触子を走査することが煩雑

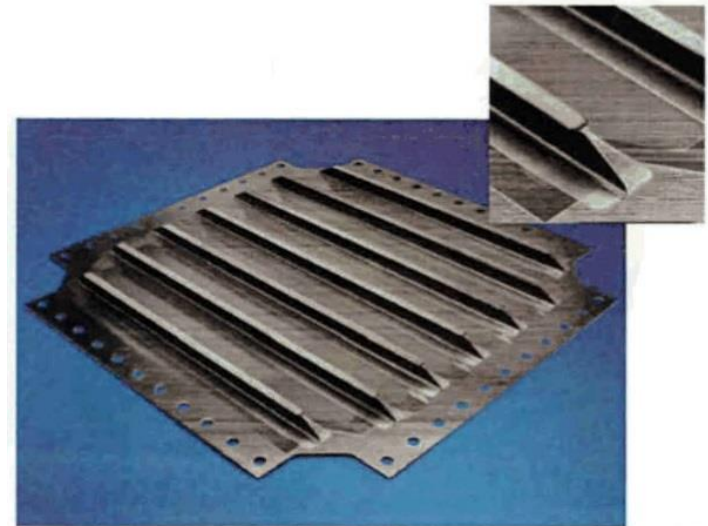
# レーザー超音波による非破壊検査

レーザー超音波 物質にレーザーを照射すると超音波が発生する

発生機構 {  
・ アブレーション  
・ 熱膨張 ← 非破壊検査

## レーザー超音波のメリット

- ・ 空中で非接触で可能  
⇒ 水の媒介が不要
- ・ 斜め入射でも励起可能  
⇒ 曲面部に適用できる



複雑形状部材

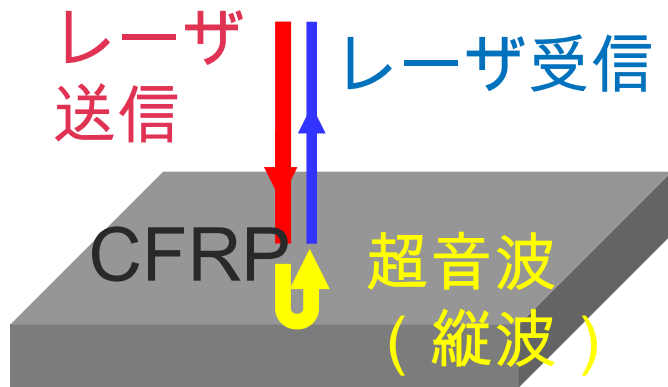
レーザー超音波法は、効率的な非破壊検査法として着目されている14

# レーザー超音波を用いた検査装置

LUIS (IRHOTON社)



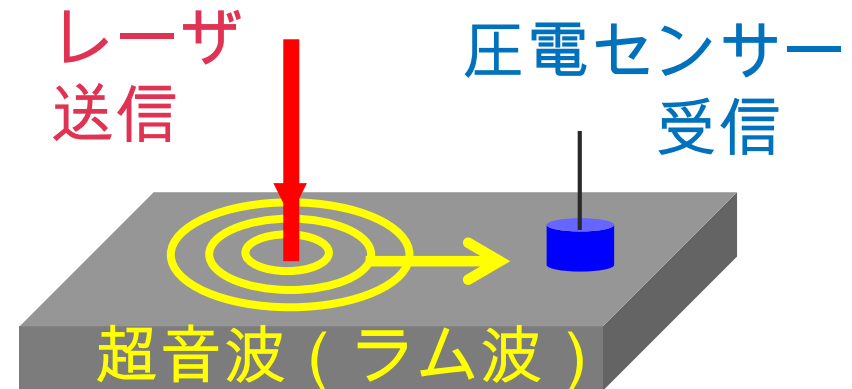
厚さ方向に進む縦波による方法



LUVI (つくばテクノロジー社)



板波 (ラム波) による方法



レーザー超音波による検査装置は商品化されている

# レーザー超音波可視化装置(LUVI)



## LUVIの特徴

- 低コスト
  - コンパクト
- ⇒ 持ち運び可能で  
翼の中のような狭隘部で使用可能

Maximum output power	0.65 m J
wavelength	1064 nm (YAG)
Pulse length	2 nsec
Diameter of beam	~0.5mm
Maximum scanning speed	5000Hz
Scanning angle	55°
Resolution of angle	0.00084°
Distance of inspection	0.1~4m



翼の中

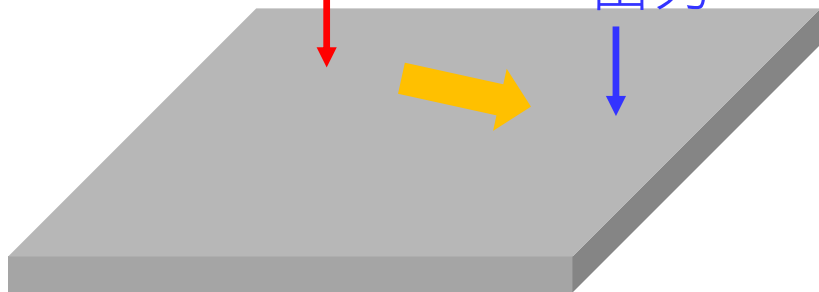


# 相反定理

入力と出力を入れ替えても波形は同じ

z方向に力を入力

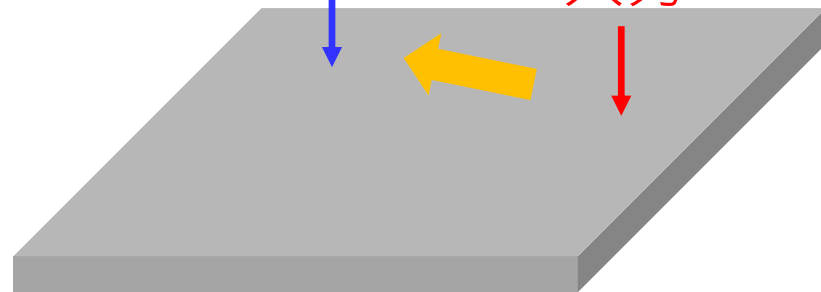
z方向の変位を出力



⇔  
等価

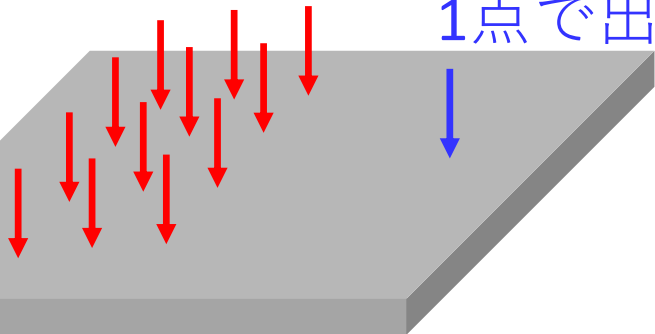
z方向の変位を出力

z方向に力を入力



z方向に力を多点で入力

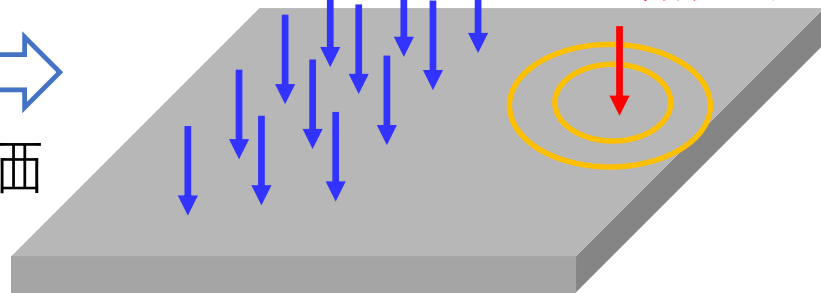
z方向の変位を1点で出力



⇔  
等価

z方向に力を多点で入力

z方向の力を1点で入力

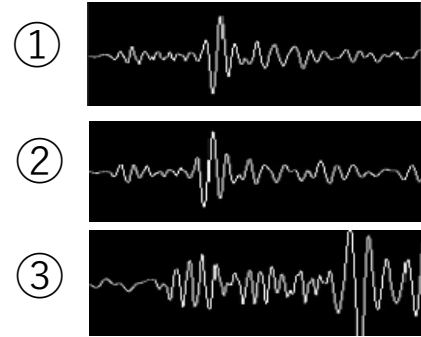
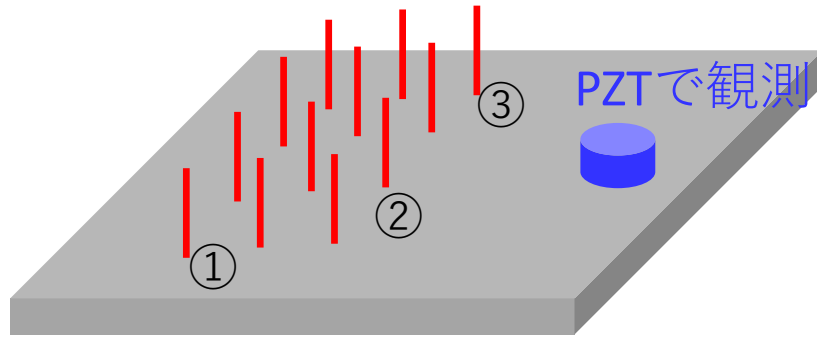


多点で力を与えて1点で観測することは、

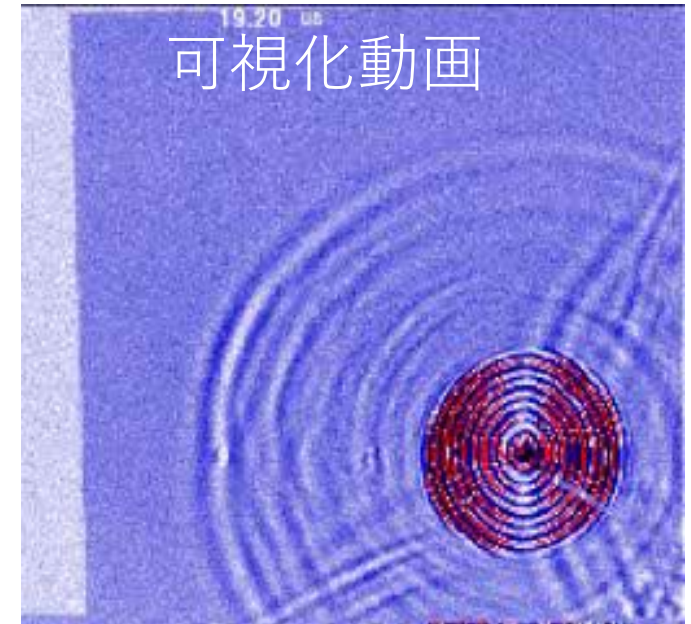
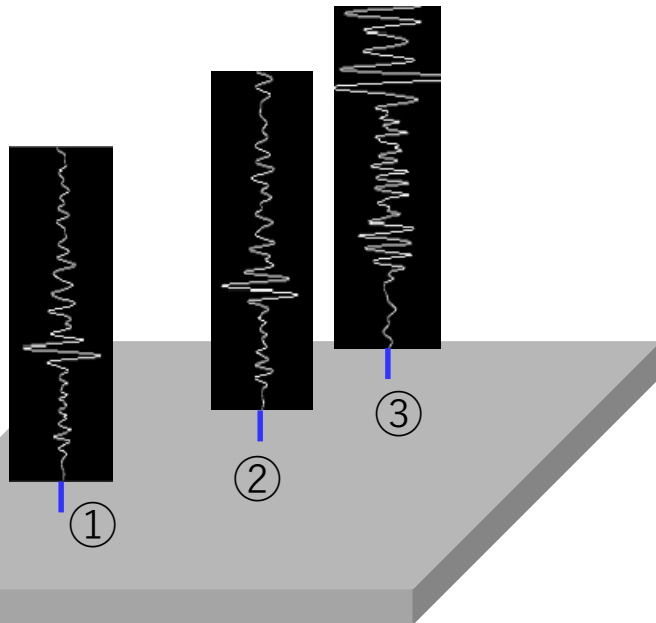
1点から広がる波を多点で見る状況と等価

# レーザー超音波可視化の方法

レーザー照射位置を走査



取得したデータを、  
各レーザー照射位置にプロット



可視化動画における超音波の挙動変化で欠陥検出

CMIでは、この技術の実用化を目指す 18

### 3. レーザ超音波可視化技術に関する研究の紹介

# CMIにおける研究課題

- LUVIによるCFRPの欠陥検出性の確認

検査可能な板厚、欠陥のサイズや位置などを明らかにする

- レーザ超音波発生シミュレーション手法の確立

- レーザ波長の最適化

・  
・  
・

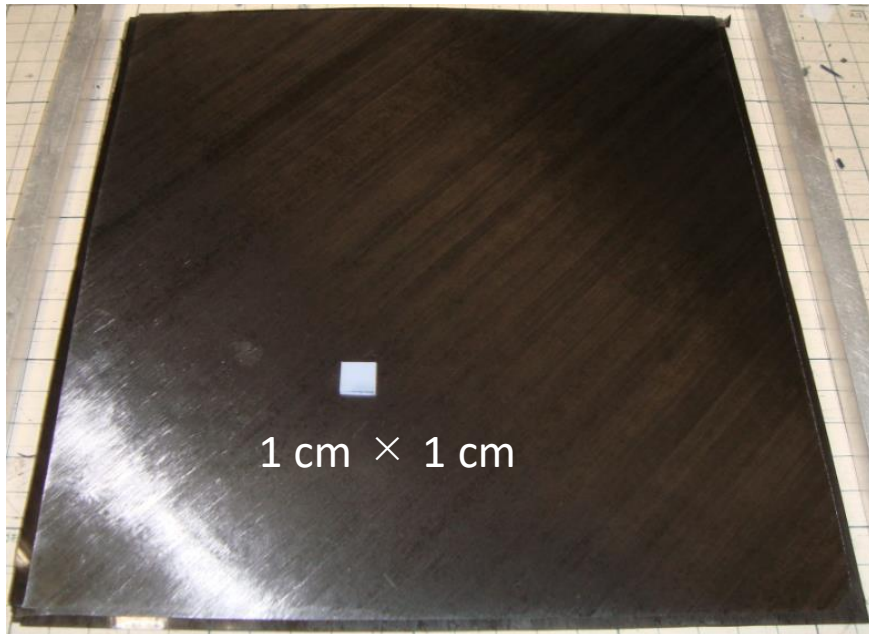
# CFRPの平板試験片

トレカプリプレグ T700SC/2500

プリプレグを積層する時に、  
人工欠陥として、  
テフロンシートを埋設する

テフロンシートの  
厚みは  $50\ \mu\text{m}$   
2枚重ね

剥離を模擬



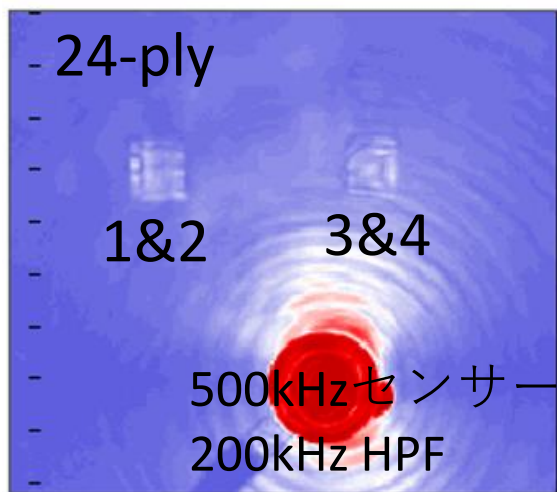
人工欠陥を埋設する様子

板厚や、テフロンシートの挿入位置を変えて欠陥検出試験

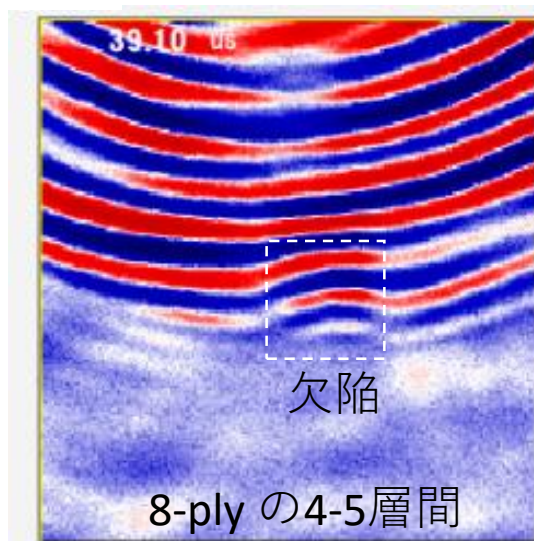
# LUVIによるCFRPの欠陥検出

欠陥のシグナルは、  
欠陥の埋設深さや探傷周波数に応じて異なる

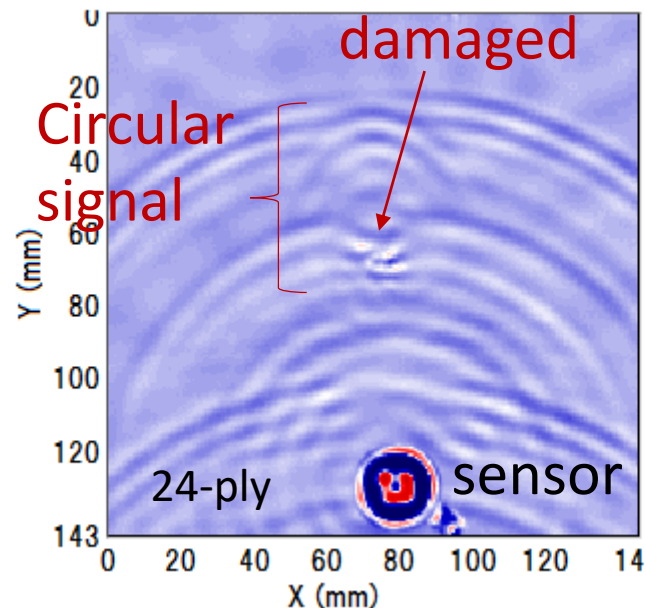
振幅の増大



音速の低下



散乱

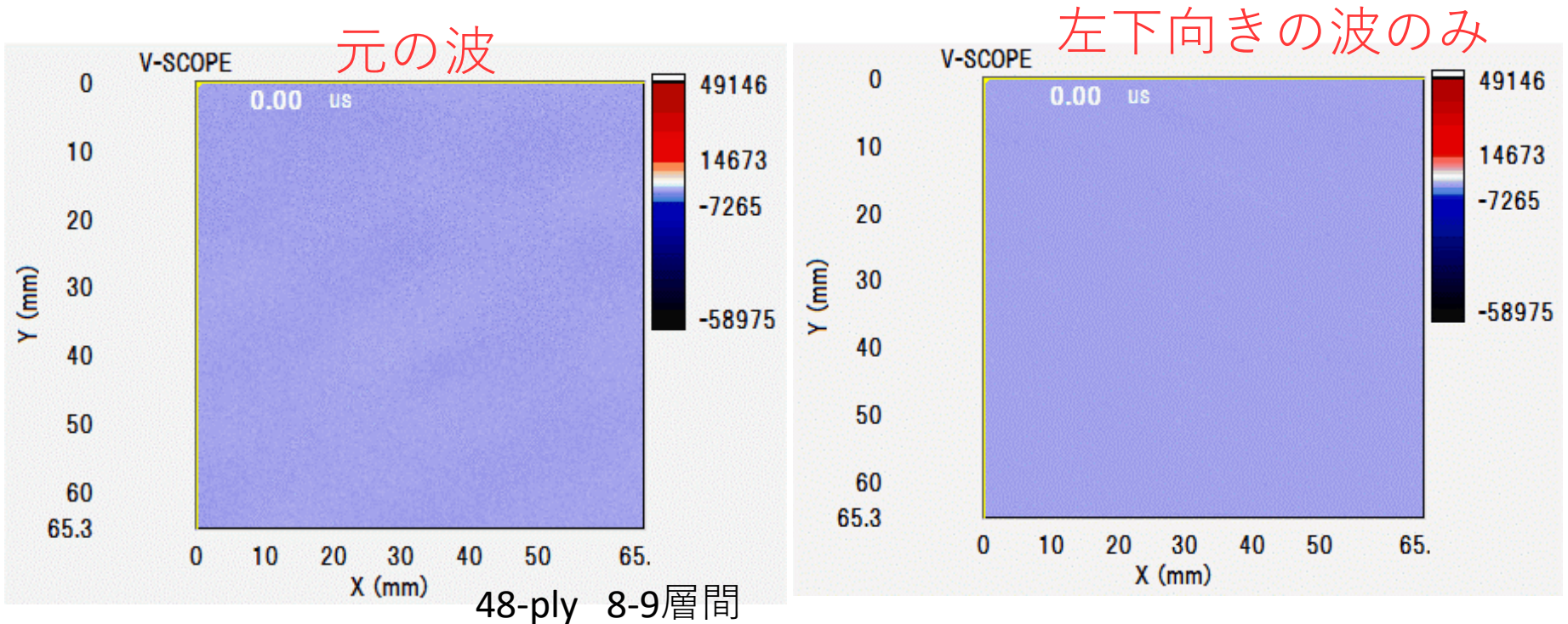


# 進行波除去による欠陥の明確化

$$\psi(x, y, t) = \iiint \Psi(k_x, k_y, \omega) e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} dk_x dk_y d\omega$$

波を平面波 $e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)}$ の重ね合わせで表現

特定の向きに進む波を残し、他は除去する



特定の向きの波に着目することで、欠陥の識別が容易になる

# レーザー超音波のシミュレーション手法の確立

C B Scruby and L E Drain "Laser Ultrasonics Techniques and Applications" Taylor & Francis Group

二本の基礎方程式に基づく

レーザー吸収による  
温度上昇

$$\text{熱伝導方程式} \quad \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_{ij} \partial_i \partial_j T + q$$

熱膨張による  
超音波の発生・伝播

波動方程式

$$\rho \ddot{u}_i = C_{ijkl} \partial_j \partial_k u_l - C_{ijkl} \alpha_{kl} \partial_j T$$

$\alpha_{ij}$  : 線膨張係数

本研究では熱伝導方程式は解析的に扱い、波動方程式は数値計算

$$q(x, y, z, t) = \gamma e^{-\gamma z} f(x, y) p(t) \quad \text{レーザー吸収による発熱}$$

温度分布

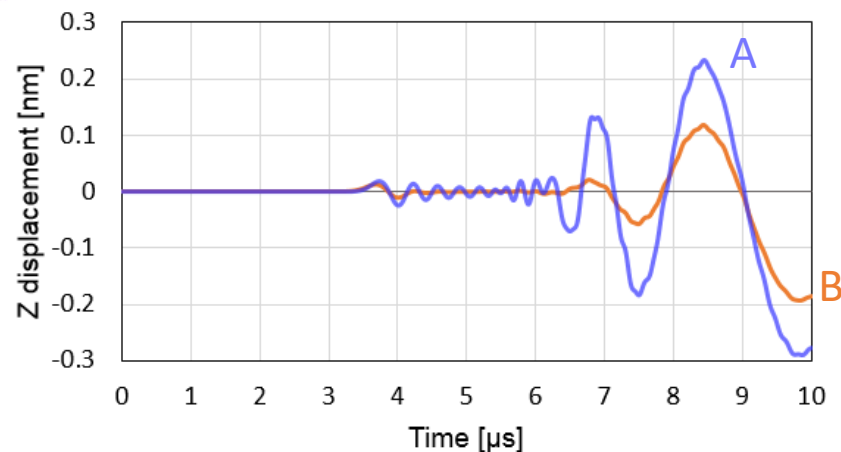
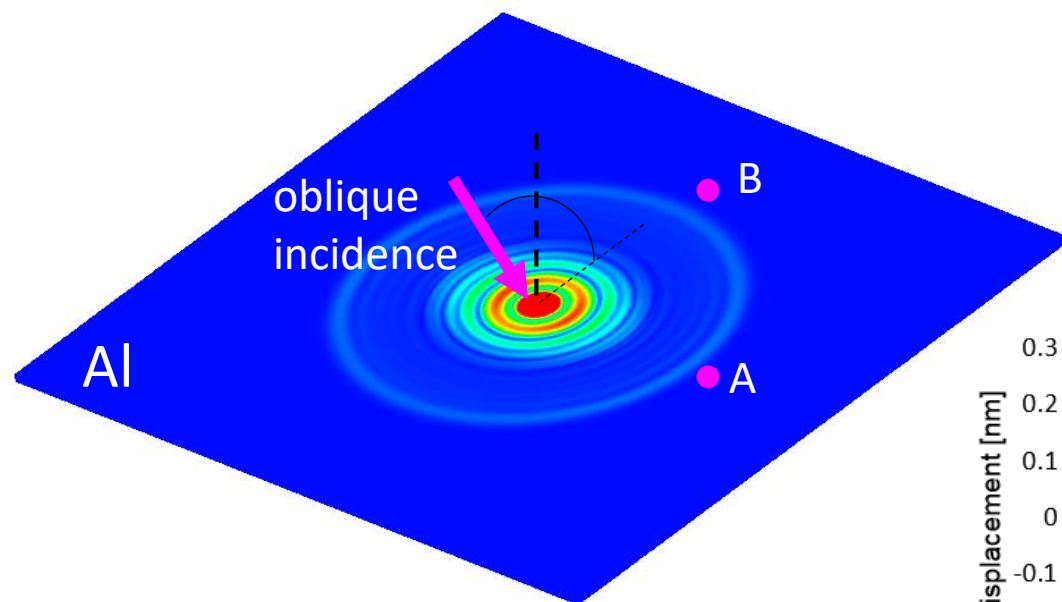
$$T(x, y, z, t) = \iint dx' dy' \int_{-\infty}^{\infty} dz' \int_0^t \frac{I(x', y') p(t') dt'}{\rho c} (\rho c)^{3/2} \gamma e^{-\gamma |z'|} \exp \left\{ -\frac{\rho c}{4(t-t')} \left[ \frac{(x-x')^2}{K_1} + \frac{(y-y')^2}{K_2} + \frac{(z-z')^2}{K_3} \right] \right\}$$

力  $b_i = -C_{ijkl} \alpha_{kl} \partial_j T$     ➡    力をFEMシミュレーションソフトウェアに入力



# レーザー超音波シミュレーション結果

超音波伝播に特化したFEMソフトウェア  
ComWAVE（伊藤忠テクノソリューションズ）を使用



確立したシミュレーション方法を用いて、  
レーザー斜め照射の解析をおこない、  
斜めに入射しても、強度の変化が小さいことを確認した

## 4. CFRPに対する超音波励起に適したレーザー波長の検討

CMI

分子研共同利用研究

O.Saito, E. Sen, Y. Okabe, N. Higuchi, H.Ishizuki, T. Taira  
“Laser wavelengths suitable for generating ultrasonic waves  
in resin-coated carbon fiber composites”

To be published in *Journal of Nondestructive Evaluation,  
Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems*

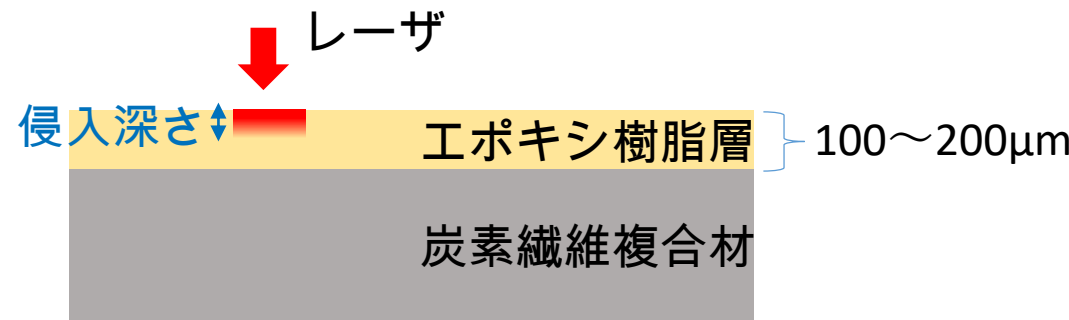
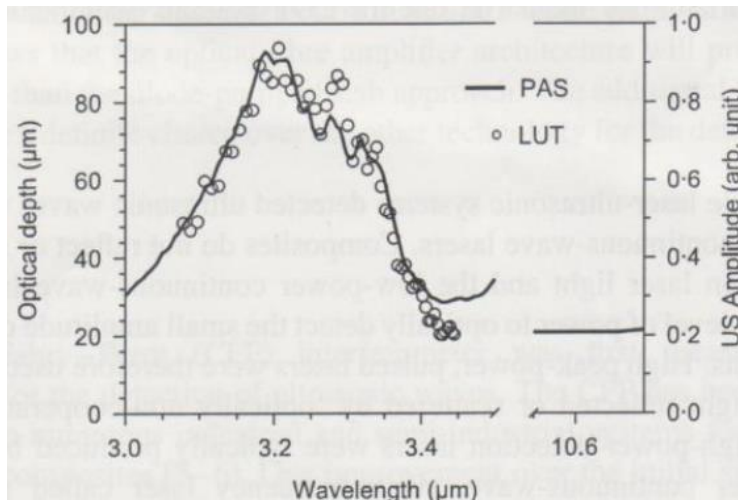
# 超音波励起に適したレーザー波長の探索

レーザー波長を最適化し、  
強い超音波を励起したい

LUVI 1.064 nm (Nd:YAG)

LUIS 10.6 nm (CO<sub>2</sub>)

⇒ 超音波が遠くまで伝播し、検査範囲が広がる  
信号雑音比も良くなり、信頼性が向上する



Ultrasonics 40 (2002) 809-812

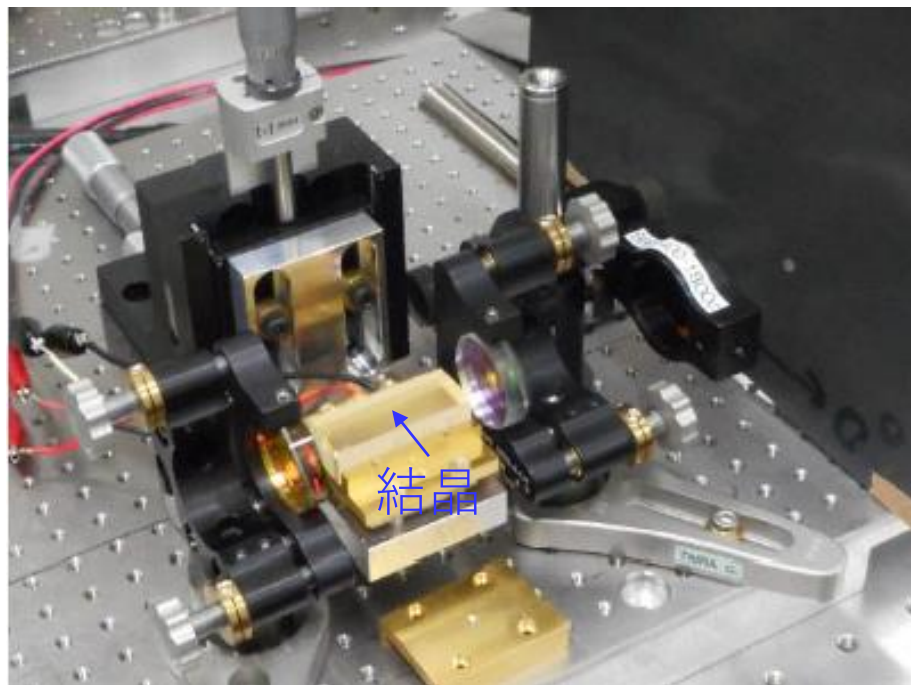
3.2 μmの波長が、超音波励起に適しているとの報告がある

# レーザー波長変換実験

中赤外域 (2.5 ~ 4  $\mu\text{m}$ )  
数mJのパルスレーザー



分子科学研究所  
平等グループ

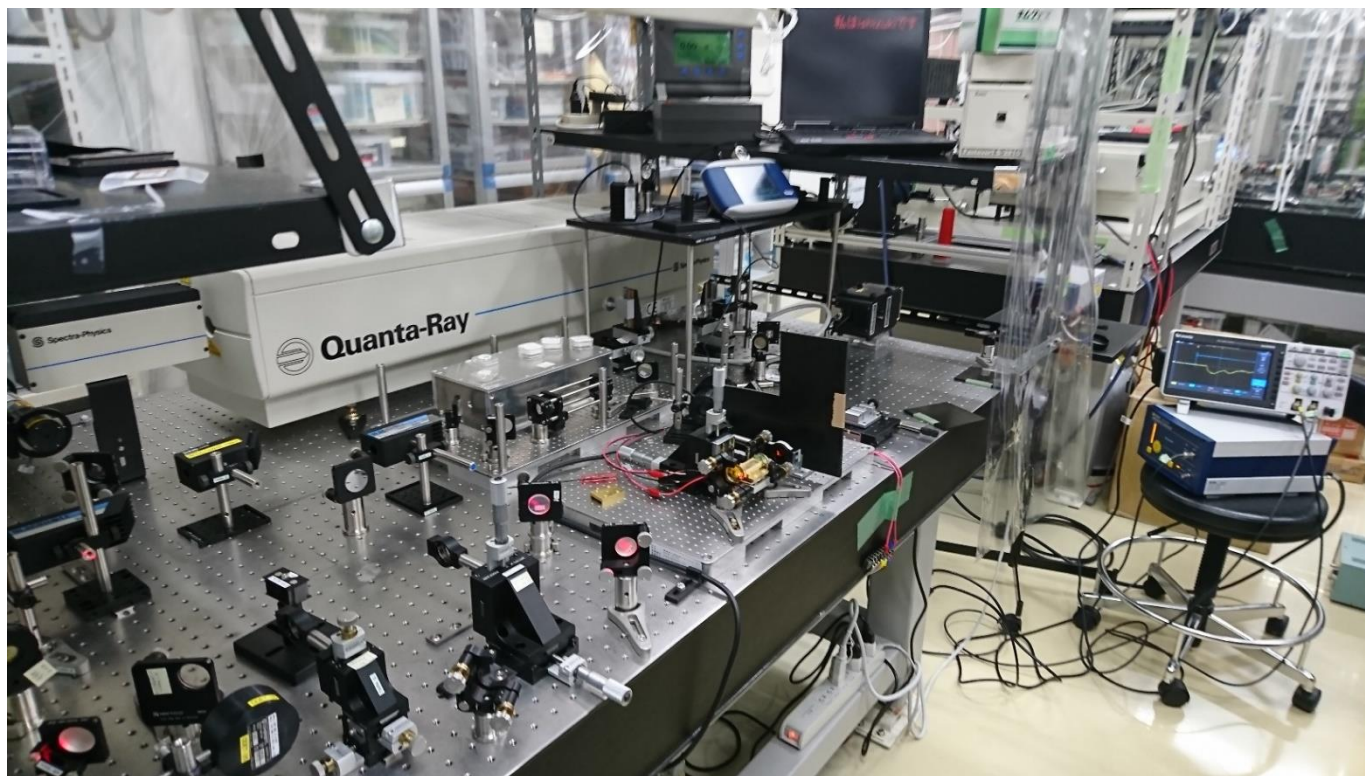
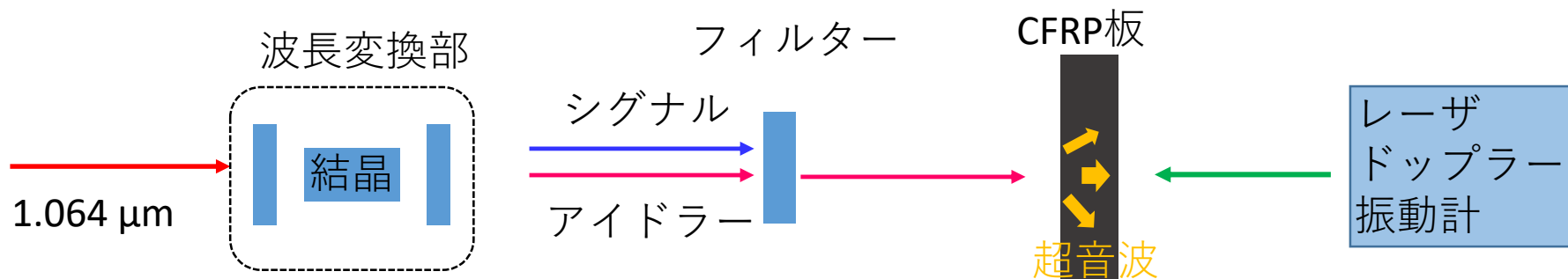


波長1.064  $\mu\text{m}$ のレーザーを  
非線形結晶に通すと、  
波長が変換されたレーザーが  
得られる

結晶間隔 [ $\mu\text{m}$ ]	シグナル 波長 [ $\mu\text{m}$ ]	アイドラー 波長 [ $\mu\text{m}$ ]
30.6	1.555	3.368
30.8	1.573	3.287
31.0	1.579	3.262

結晶を変えることで、異なる波長を得られる

# レーザー波長変換実験の系



波長変換したレーザーをCFRP板に照射し、超音波を励起

# レーザドップラー振動計による観測

ポリテック PSV-500 Xtra  
スキャンしながら計測可能



OFV 505



超音波の計測には、  
レーザドップラー振動計を  
用いた

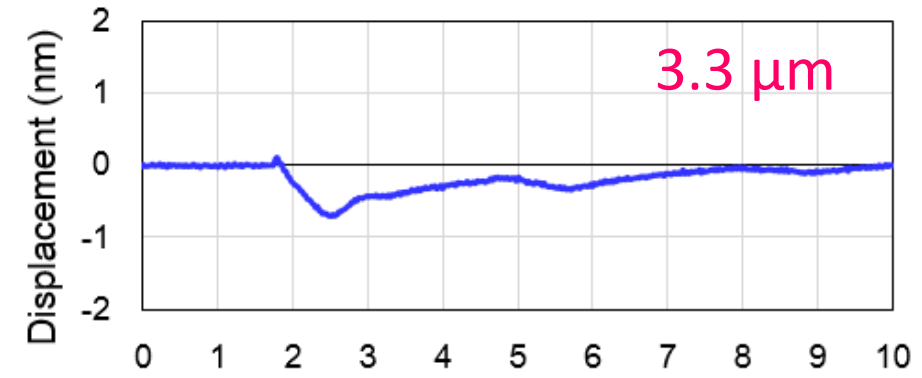
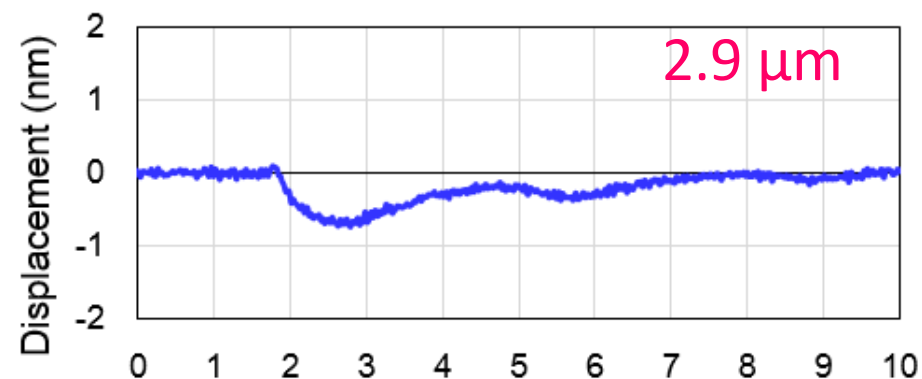
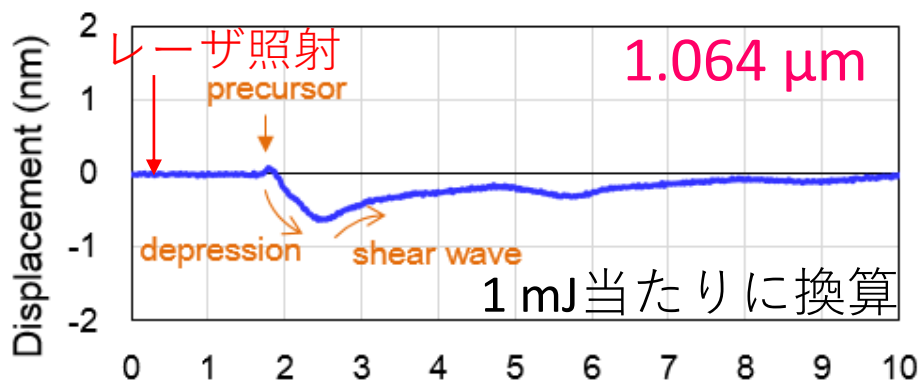
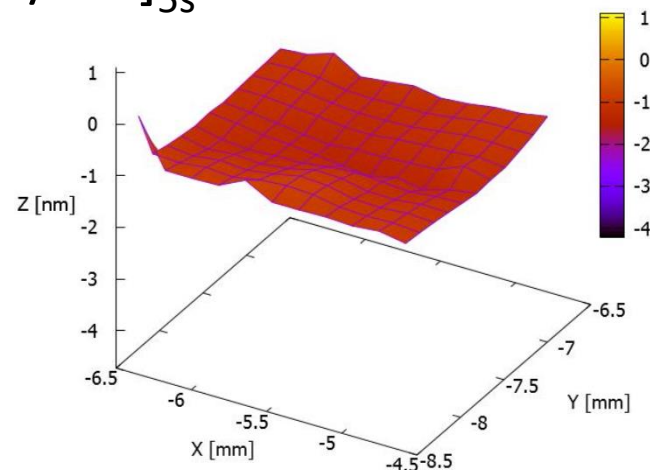
面外方向の速度・変位を計測

(CFRP板の観測側には、  
反射シールを貼った)

# 超音波のレーザ波長依存性

CFRP板 (T700SC/2500)

[0/45/90/-45]<sub>5s</sub>



CFRP板に対して、異なる波長のレーザを照射したが、励起超音波に大きな違いは見られなかった

炭素ファイバーが、どの波長のレーザも強く吸収することが原因と判明

# CFRP板表面に樹脂層を塗装

耐候性のために、CFRP部材に樹脂塗装がおこなわれることがある

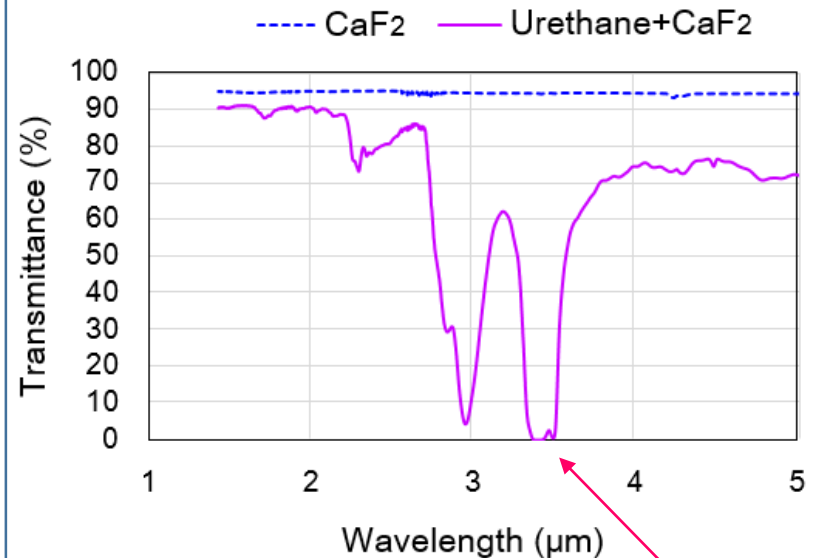
樹脂塗装した試験片でレーザ波長依存性を調査

自動車業界で用いられている  
ウレタン樹脂を塗装



[丸山コーポレーション様による塗装]

透明な基盤の上に樹脂塗装をして  
スペクトルを計測

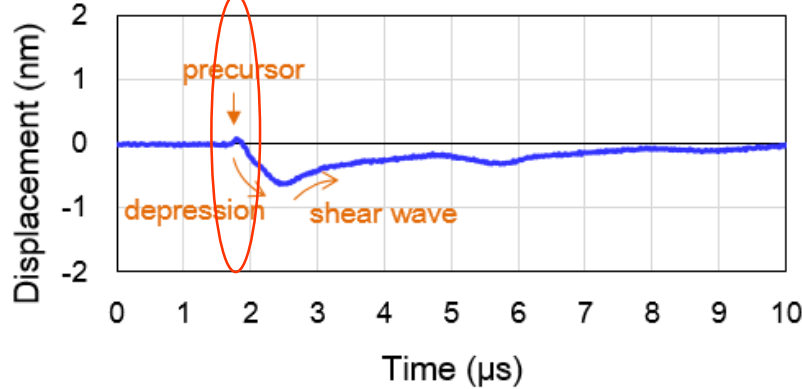


樹脂塗装をしたCFRP板を用意

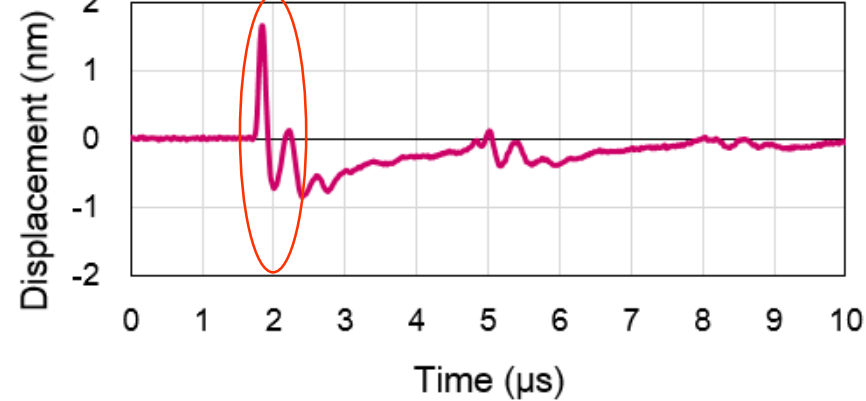


# 樹脂塗装による超音波強度増大

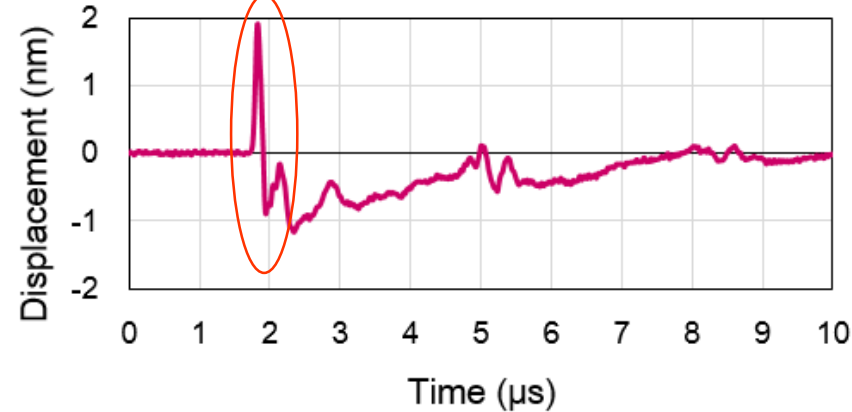
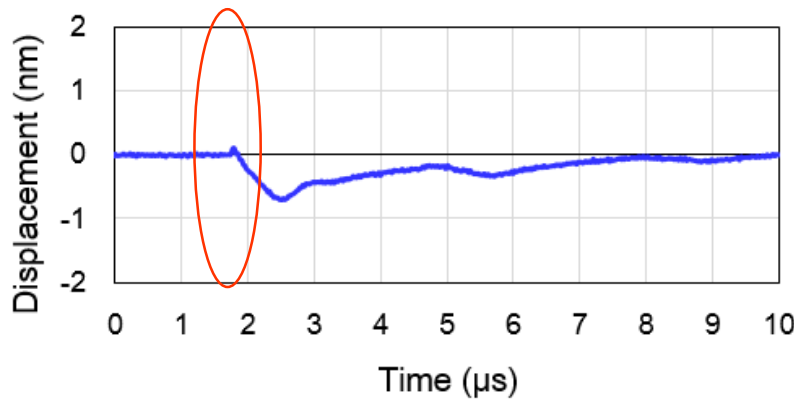
Bare CFRP



樹脂塗装したCFRP



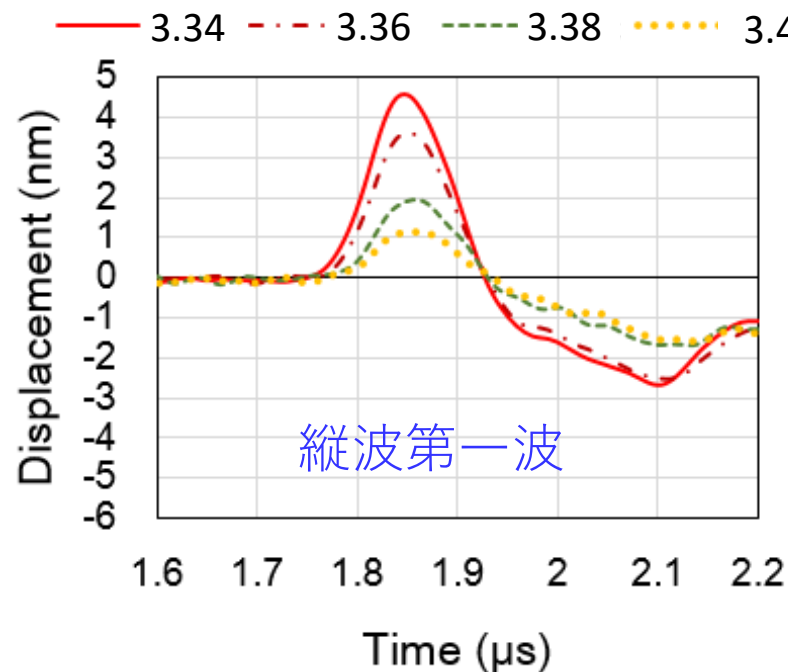
3.3  $\mu\text{m}$



最初に到達する縦波が著しく増大した

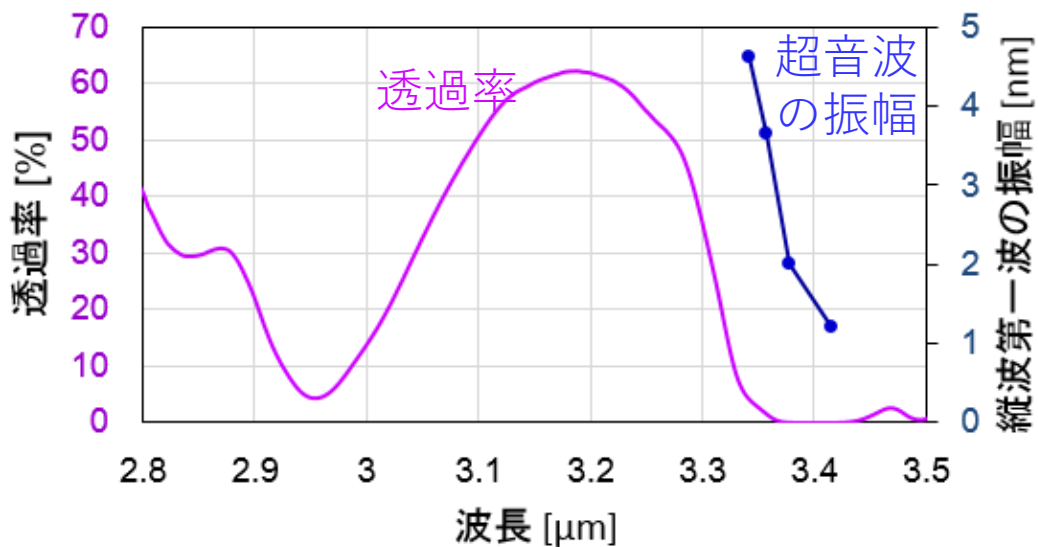
縦波に引き続く振動が見られるようになった

# 樹脂塗装した場合のレーザ波長依存性



結晶の温度を変化させ、  
レーザの波長を微小変化させる

3.4μm近傍では、  
レーザ波長によって強度が  
著しく変化した

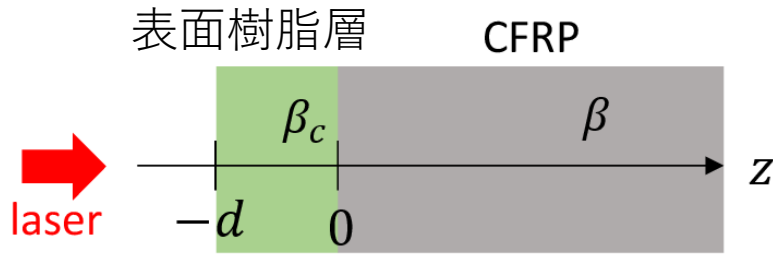


レーザの透過率がゼロに  
近づくところで、  
超音波の振幅が  
小さくなった

# レーザー波長変換実験で得られた知見

- (1) 樹脂塗装前のCFRP板には、  
レーザーの波長依存性は見られなかった
- (2) 樹脂塗装をすると、レーザーの波長依存性が現れた
  - (2-1) 樹脂塗装の透過率が高いと、縦波の振幅が大きく、  
透過率が低いと、振幅が小さくなった
  - (2-2) 樹脂塗装前よりも、縦波の振幅が大きくなり、  
縦波の到達後に、振動が見られるようになった

# 1次元モデルによる現象の理解



## 基礎方程式

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{\rho c} \quad \text{熱伝導方程式}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} = C_{33} \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2} - (C_{31}\alpha_1 + C_{32}\alpha_2 + C_{33}\alpha_3) \frac{\partial T}{\partial z}$$

境界条件 変位と応力が連続

ラプラス変換をして解く

$$u(x, t) = \theta(t) \left\{ \frac{1}{2} \frac{1}{(1 + \beta v \tau)^2} e^{-\beta x + \beta v t} + \frac{1}{2} \frac{1}{(1 - \beta v \tau)^2} e^{-\beta x - \beta v \tau} - \frac{(\beta v \tau) \beta v t}{1 - \beta^2 v^2 \tau^2} e^{-\beta x - \frac{t}{\tau}} + \frac{\beta^2 v^2 \tau^2 (\beta^2 v^2 \tau^2 - 3)}{(1 - \beta^2 v^2 \tau^2)^2} e^{-\beta x - \frac{t}{\tau}} - e^{-\beta x} \right\} A e^{-\beta_c d}$$

$$+ \theta\left(t - \frac{x}{v}\right) \left\{ -\frac{1}{2} \frac{1}{(1 + \beta v \tau)^2} e^{-\beta x + \beta v \tau} + \frac{1}{2} \frac{1 - \frac{v}{v_c} R}{1 + \frac{v}{v_c} R} \frac{1}{(1 - \beta v \tau)^2} e^{-\beta v (t - \frac{x}{v})} + \frac{\frac{v}{v_c} R}{1 + \frac{v}{v_c} R} \frac{(\beta v \tau) \beta v}{1 - \beta^2 v^2 \tau^2} \left(t - \frac{x}{v}\right) e^{-\frac{t - \frac{x}{v}}{\tau}} - \frac{1}{1 + \frac{v}{v_c} R} \frac{\beta v}{1 - \beta^2 v^2 \tau^2} \left(t - \frac{x}{v}\right) e^{-\frac{t - \frac{x}{v}}{\tau}} \right.$$

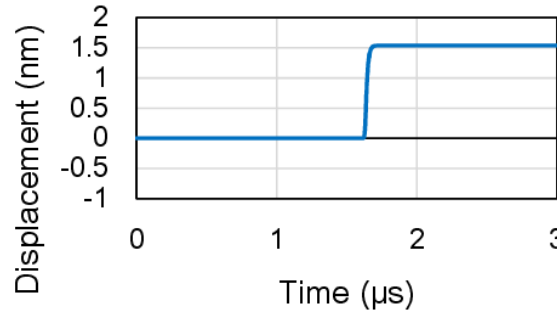
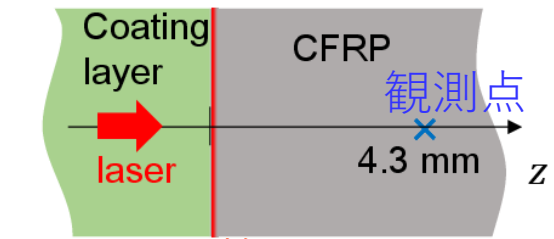
$$\left. - \frac{\frac{v}{v_c} R}{1 + \frac{v}{v_c} R} \frac{\beta v \tau (\beta v \tau + 2)}{(1 + \beta v \tau)^2} e^{-\frac{t - \frac{x}{v}}{\tau}} + \frac{\frac{v}{v_c} R}{1 + \frac{v}{v_c} R} \right\} A e^{-\beta_c d} + \dots$$

1次元モデルを用いて、表面樹脂の効果を解析する

# レーザーが樹脂を透過する場合

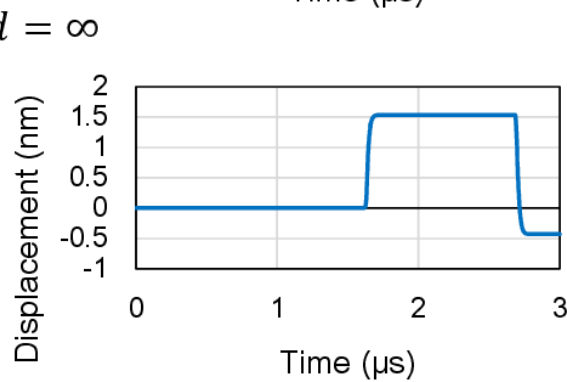
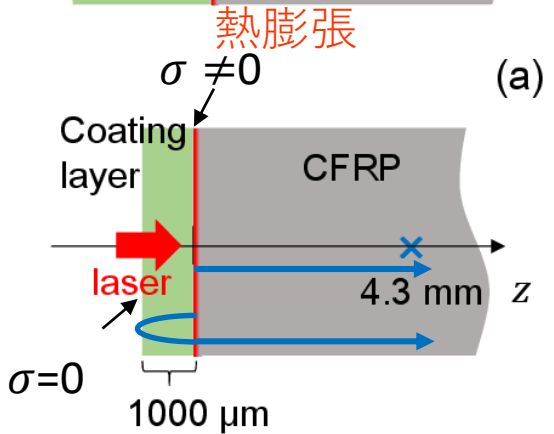
パラメータは典型的なウレタン樹脂の値を使用

レーザーはCFRPの表面付近で吸収される

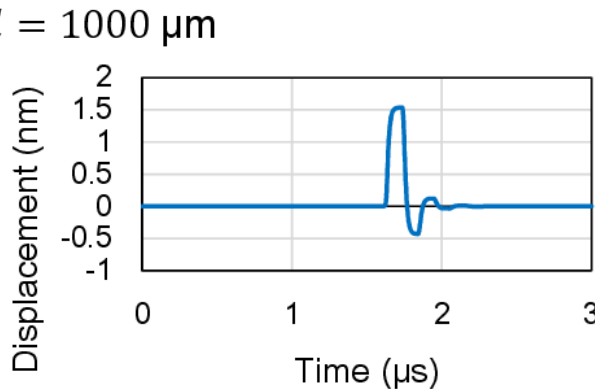
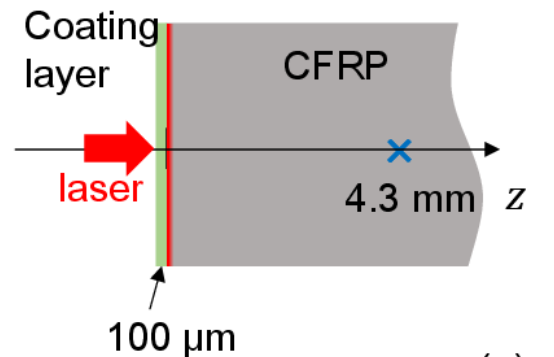


樹脂から反力を受けることで大きく変位する

(CFRPは右に変位  
樹脂は左に変位)



樹脂表面で反射した波が重なる



樹脂層内で反射を繰り返した波が重なり振動が生じる

(c)  $d = 100 \mu\text{m}$

# レーザーが樹脂を透過する場合

使用したパラメータ

密度  $1200 \text{ kg/m}^3$

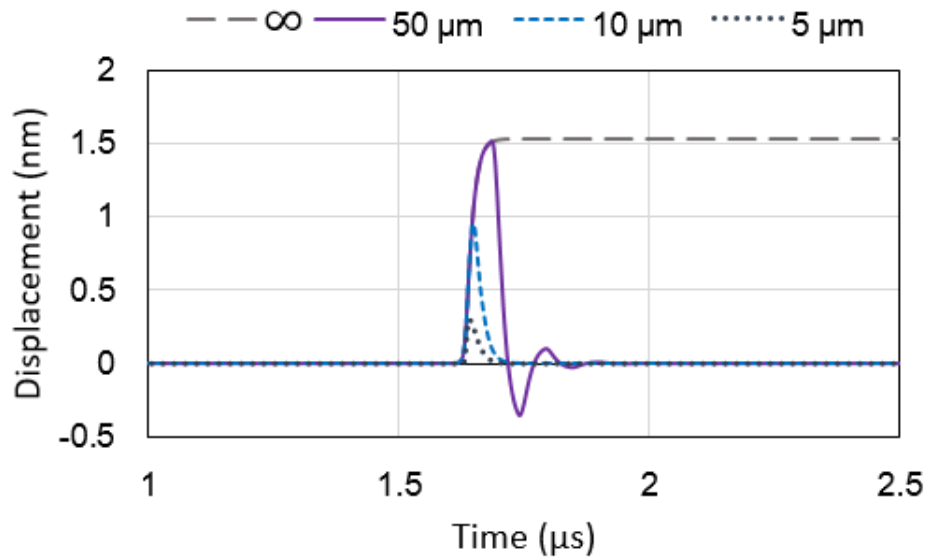
ラメ定数  $\lambda=0.332 \text{ [GPa]}$

ラメ定数  $\mu=2 \text{ [GPa]}$

比熱  $1800 \text{ [J/kg/K]}$

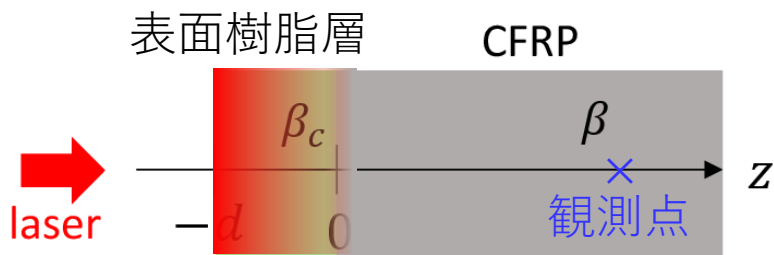
熱膨張係数  $15 \times 10^{-5} \text{ [1/K]}$

CFRPへの侵入深さ  $10 \text{ [}\mu\text{m]}$



さらに、樹脂層を薄くしていくと、  
反射波が重なるのが早くなり、  
変位が抑制される

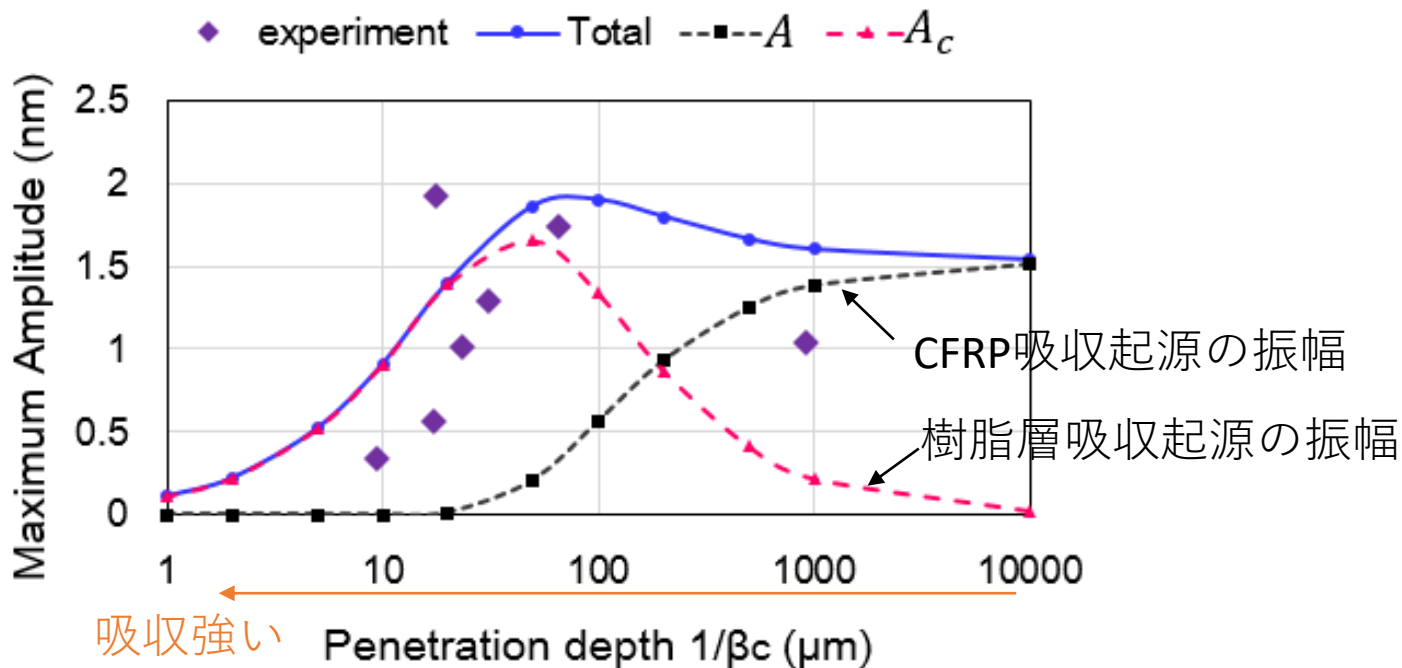
# 樹脂による吸収の影響



レーザーの一部は樹脂に吸収され、  
残りがCFRPに吸収される場合

樹脂層からも超音波が発生する

樹脂層のレーザー吸収率と超音波振幅の関係



樹脂層の吸収が強くなると、超音波の振幅が小さくなる

## 5. 結論

- 航空機のCFRP部材の新しい非破壊検査法として、レーザ超音波法が着目されている
- CFRPに超音波を励起するのに適したレーザ波長を調査したところ、CFRPの表面樹脂層を透過する波長が適していることが分かった