

令和5年度（第28回）

# 秋の技術発表会 特別講演

開催日：令和5年10月26日（木）

会場：（一財）日本溶接技術センター



**神奈川県非破壊試験技術交流会**



**千葉県非破壊検査研究会**

Chiba Non-Destructive Testing Institute

## 特別講演 1

「渦電流探傷試験による炭素繊維複合材の損傷検出について」

千葉県非破壊検査研究会 会長

日本大学 生産工学部 電気電子工学科 教授 小山潔 様

## 特別講演 2

「水中ドローン SDQ-101 の開発」

(株) キュー・アイ 技術開発部 豊島雄樹 様

# 渦電流探傷試験による炭素繊維複合材 の損傷検出について

日本大学 生産工学部

電気電子工学科

小山 潔

# 本日の内容

- はじめに
- 渦電流探傷試験による  
炭素繊維複合材などの損傷検出  
研究紹介
- 検査技術の動向と今後の課題
- まとめ

# はじめに

## 炭素繊維強化プラスチック

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic)

- 比剛性や比強度の力学特性が優れている
  - 航空機や宇宙機構造物、  
建造物の補強材などに多用
- 使用用途拡大



# CFRP(炭素繊維強化プラスチック)に対する 非破壊検査法

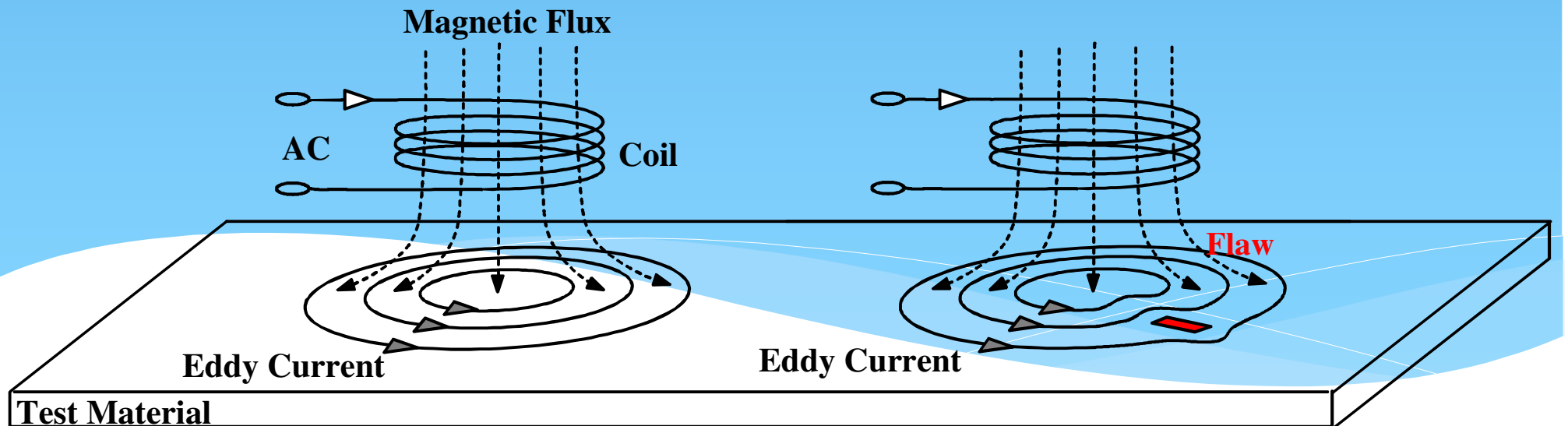
- 超音波探傷試験
- 放射線透過試験
- サーモグラフィ試験
  
- その他に  
電磁誘導試験法や  
電位差試験法に関する研究 etc

# 電磁誘導を利用した非破壊試験 渦電流探傷試験(ECT)の概要

# 渦電流探傷試験の特徴と原理

## ECT(Eddy Current flaw Testing)

- 非接触で試験可能
- 高速度で簡便な試験法
- 他の試験法にはないメリット



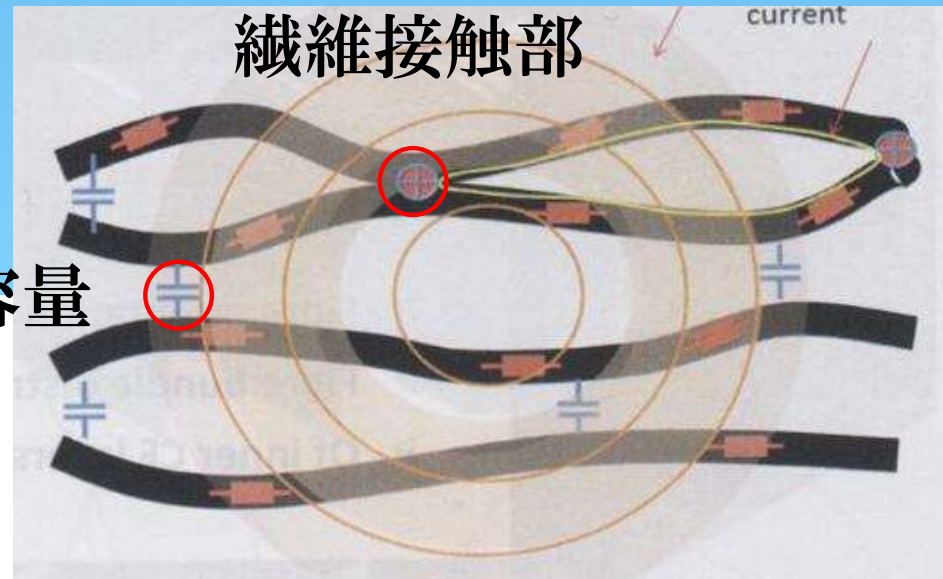


# 研究の目的

CFRP (炭素繊維強化プラスチック):

炭素を含有、  
金属に比べて $10^4$ 程度低い、導電性を有す

渦電流探傷試験 (ECT) を適用可



繊維間静電容量

# 研究の目的

CFRP (炭素繊維強化プラスチック):

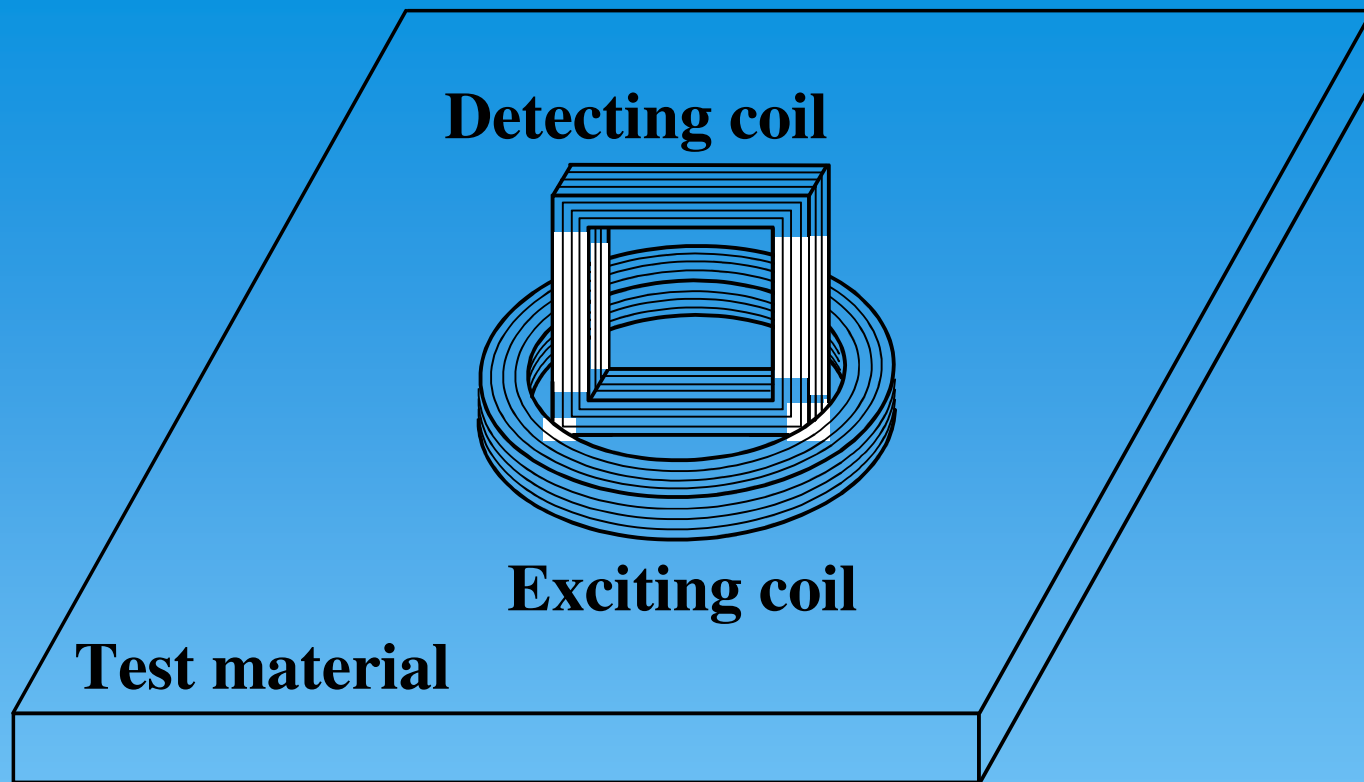
- 金属に比べ導電性が低い
- 導電性の異方性が強い

渦電流探傷試験 (ECT) を  
CFRPの検査に適用するためには

- 損傷検出に適したプローブの設計
- 検出信号に対する適切な信号処理

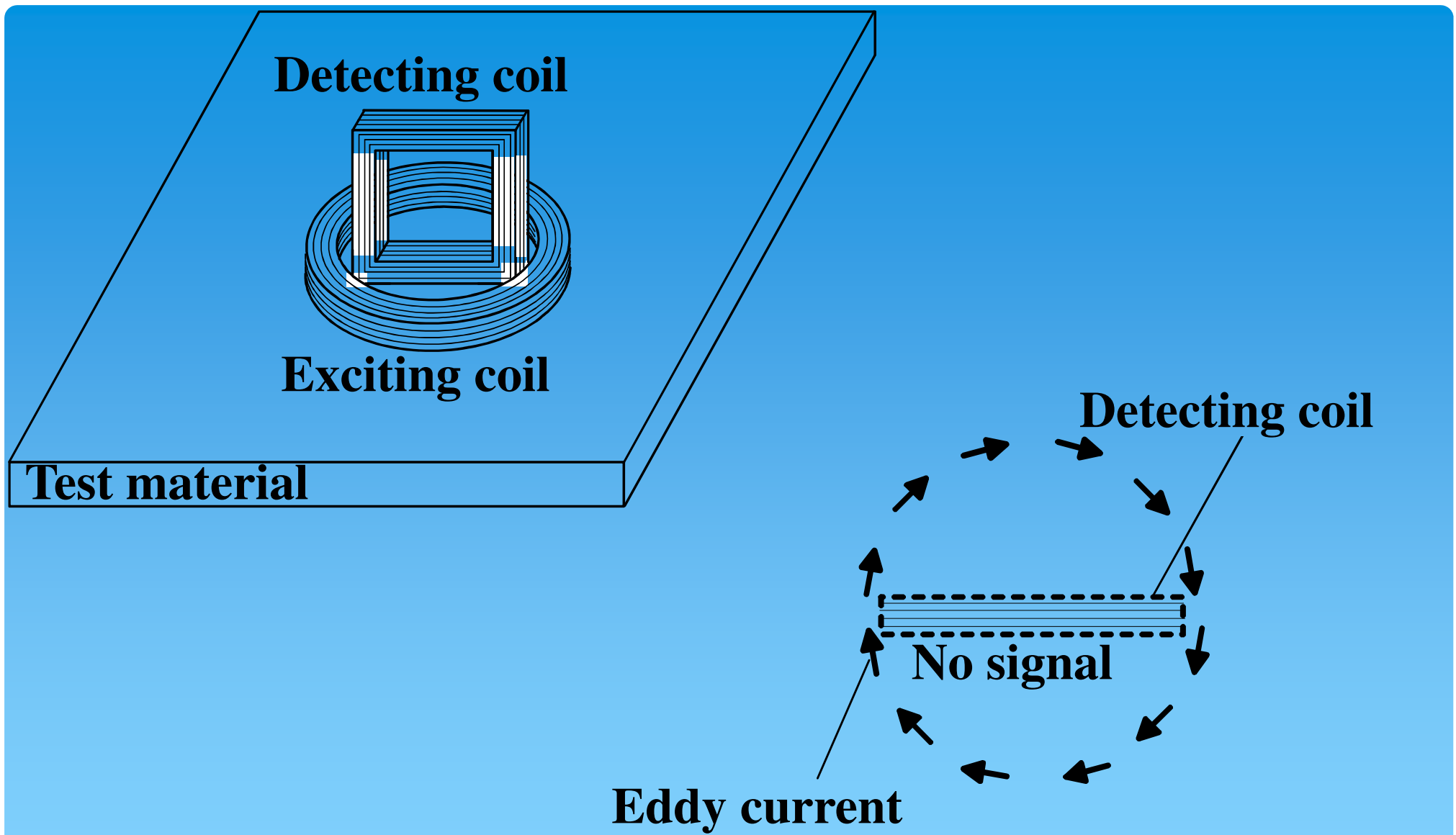
# これまでのCFRPに対する 渦電流探傷試験に関する研究報告

- Materials Evaluation (米国非破壊試験学会誌) 1973年頃～
- COMPOSITES 1976年頃～
- Composites Science and Technology
- 非破壊検査 (日本非破壊検査協会誌)
- (独) 産業技術総合研究所
- 他、散見

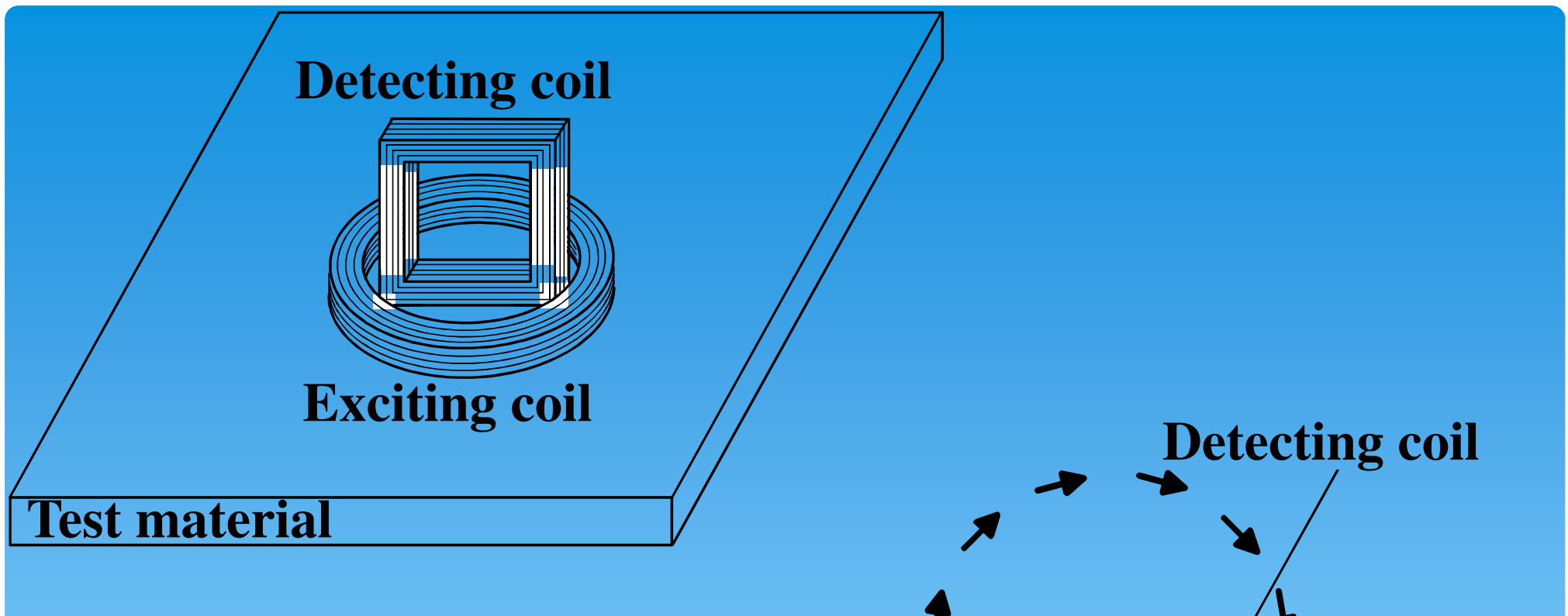


## 渦電流探傷のプローブの構造

- 励磁コイル：試験体に電磁誘導により渦電流を誘導
- 検出コイル：損傷などにより変化した渦電流で発生した磁束を検出、信号を発生

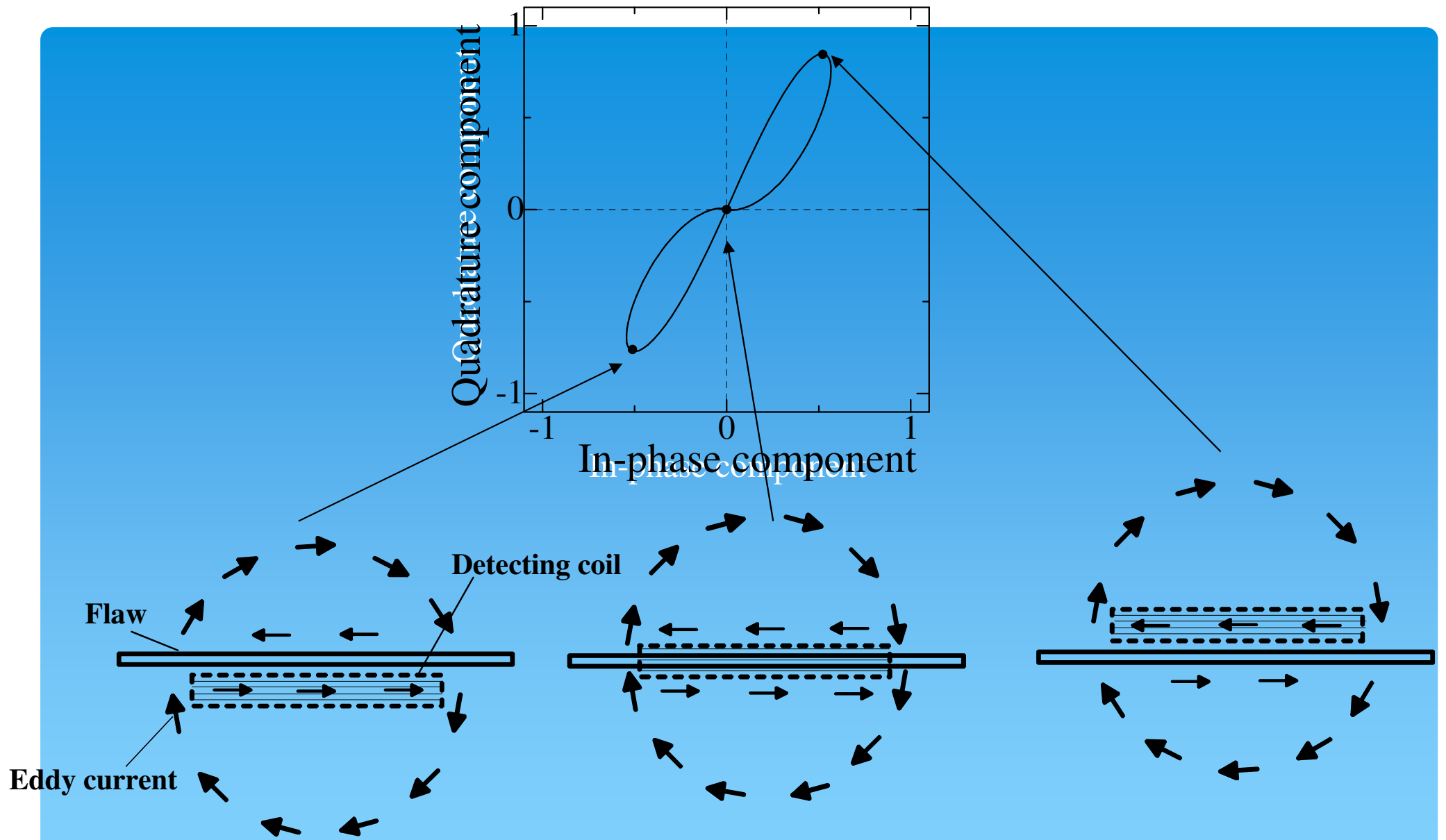


渦電流探傷のプローブの構造と  
きずが無い場合の渦電流の流れ



- リフトオフ雑音原理的に発生しない
- ダイナミックレンジを大きくできる

渦電流探傷のプローブの構造と  
きずが無い場合の渦電流の流れ

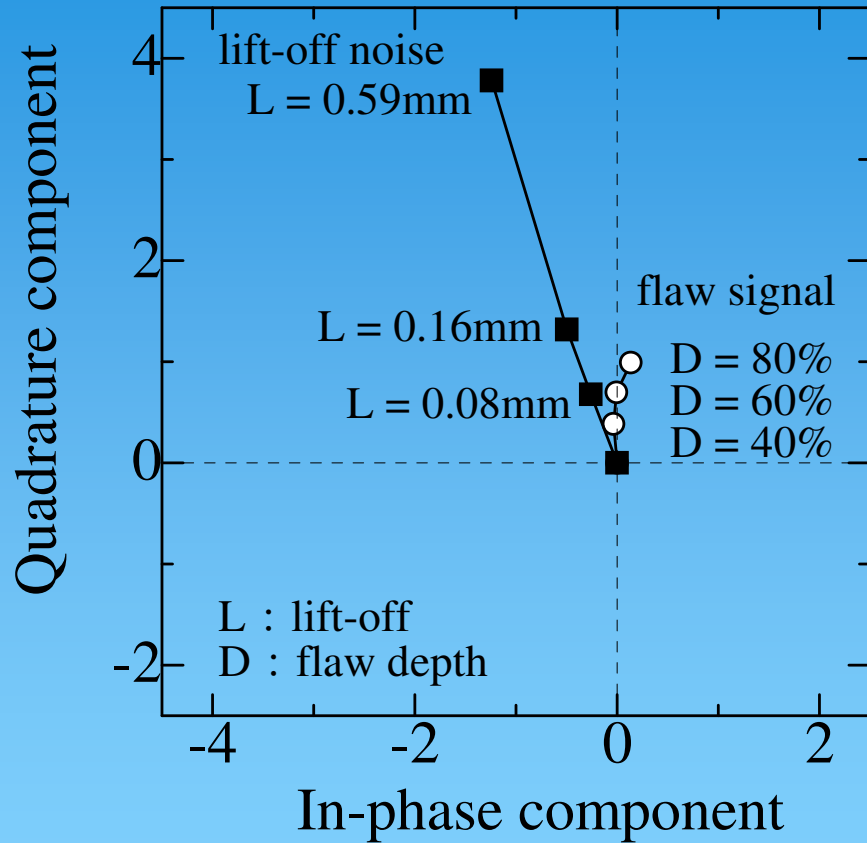


検出コイル巻線と平行なきずがある場合の  
渦電流の流れときず信号

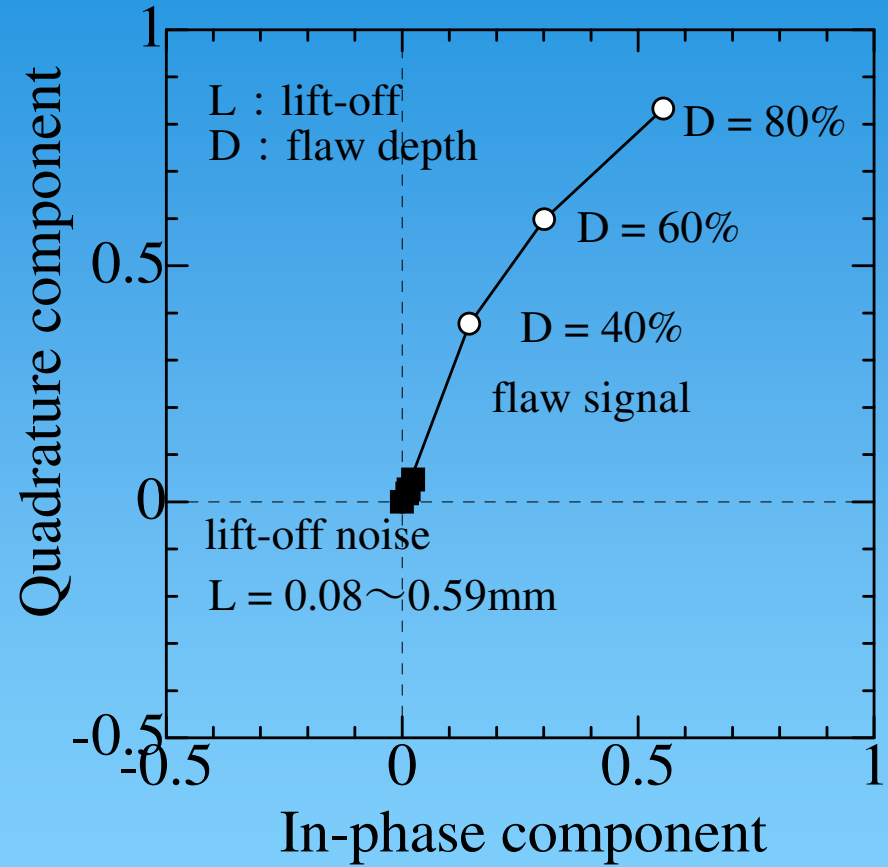
# 渦電流探傷のプローブの基礎的な きず検出特性



Test frequency : 20kHz  
 Flaw : length 15mm , width 0.5mm

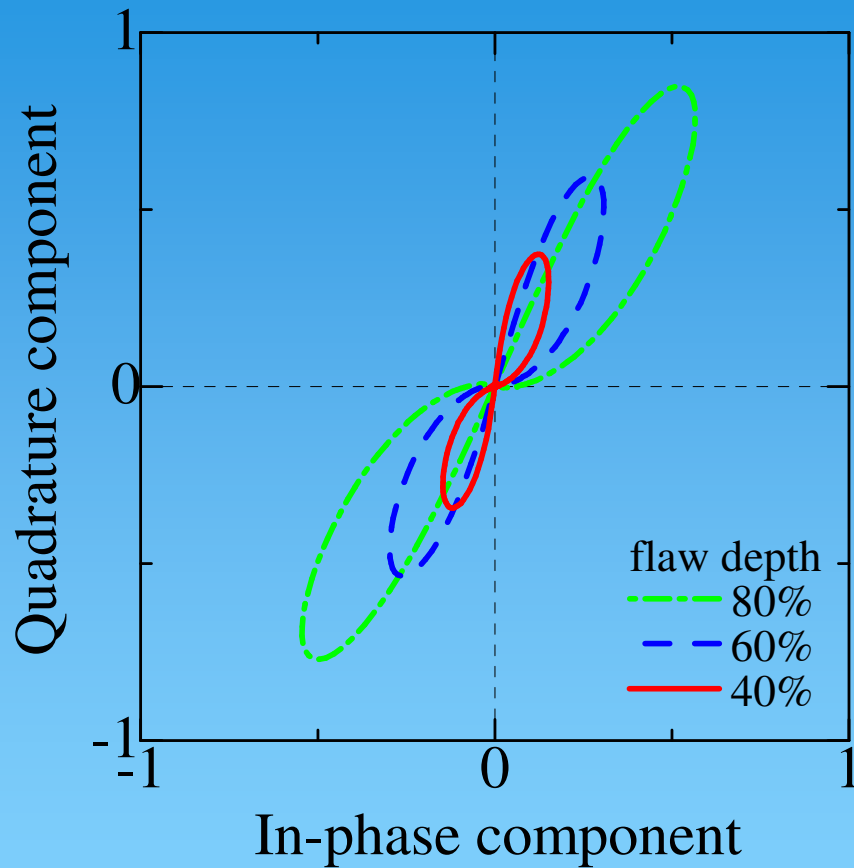


(a) 円形上置プローブ

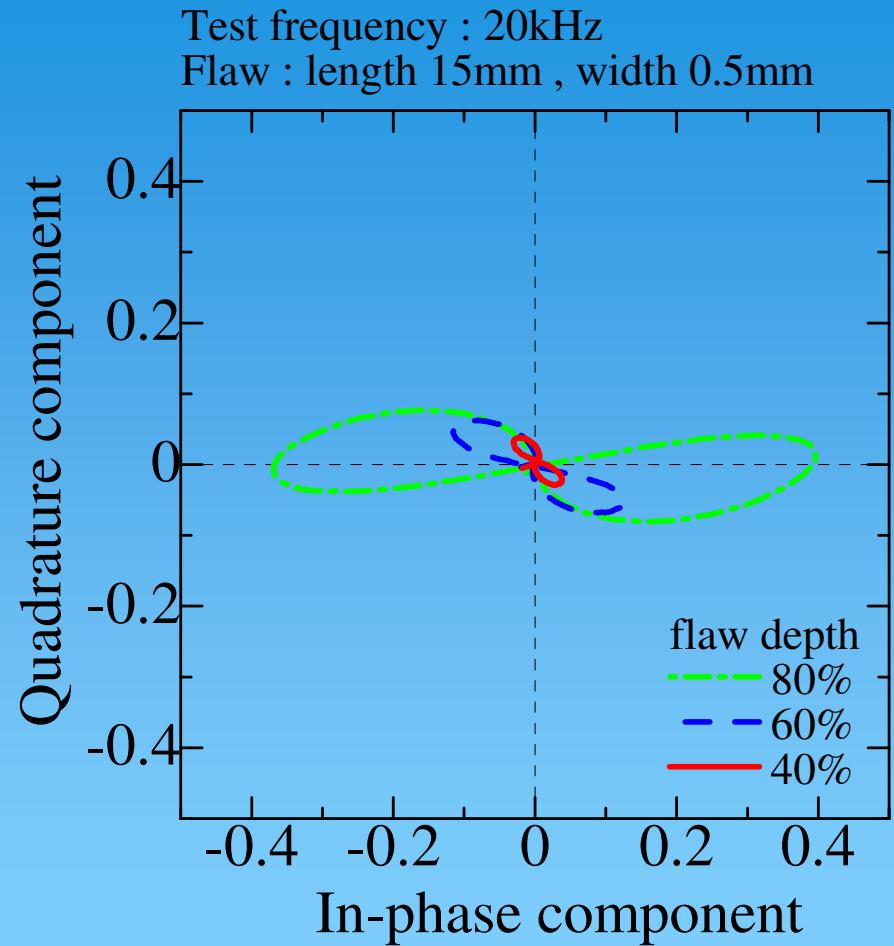


(b) 渦電流探傷θプローブ

リフトオフ雑音ときず信号

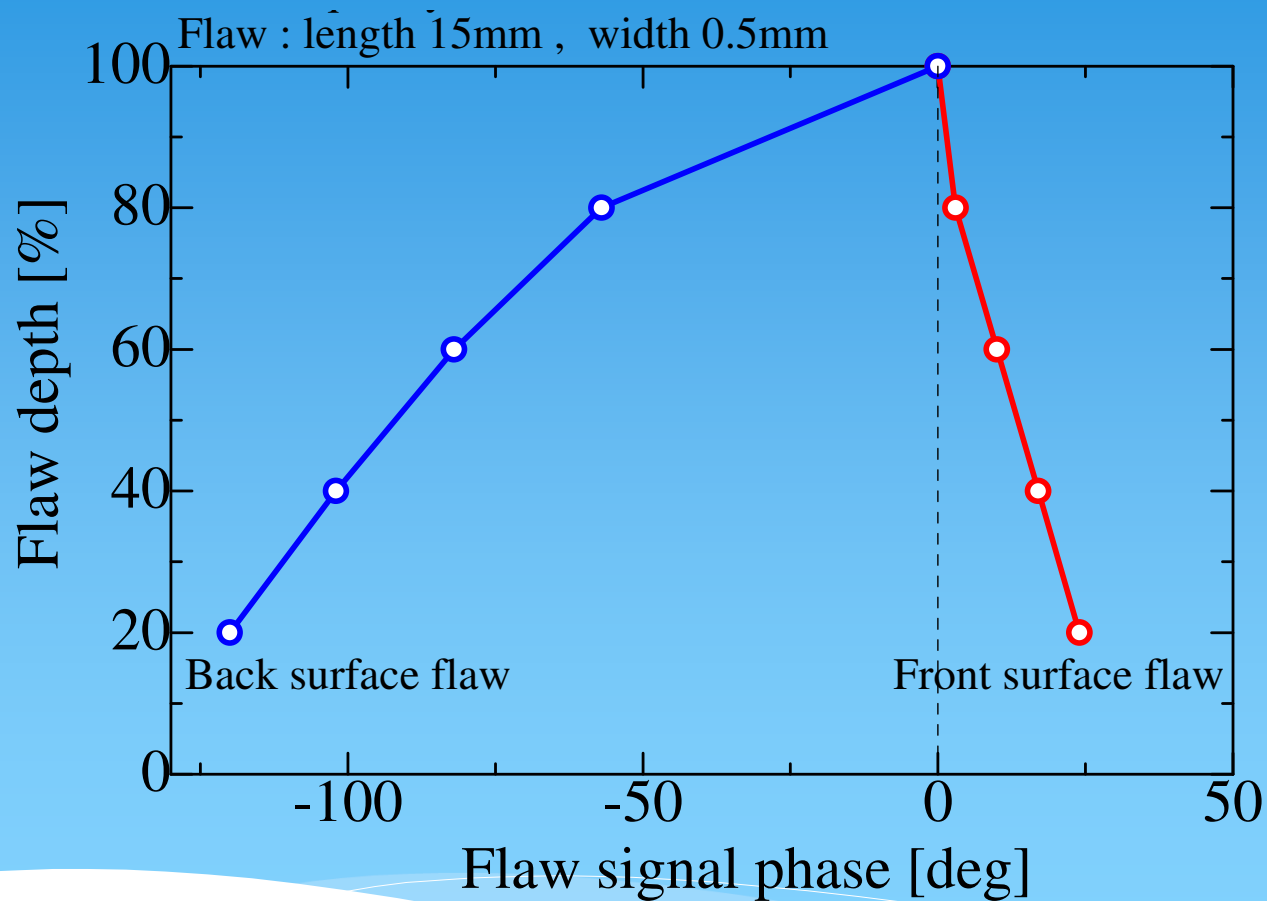


(a) 表面きずの場合



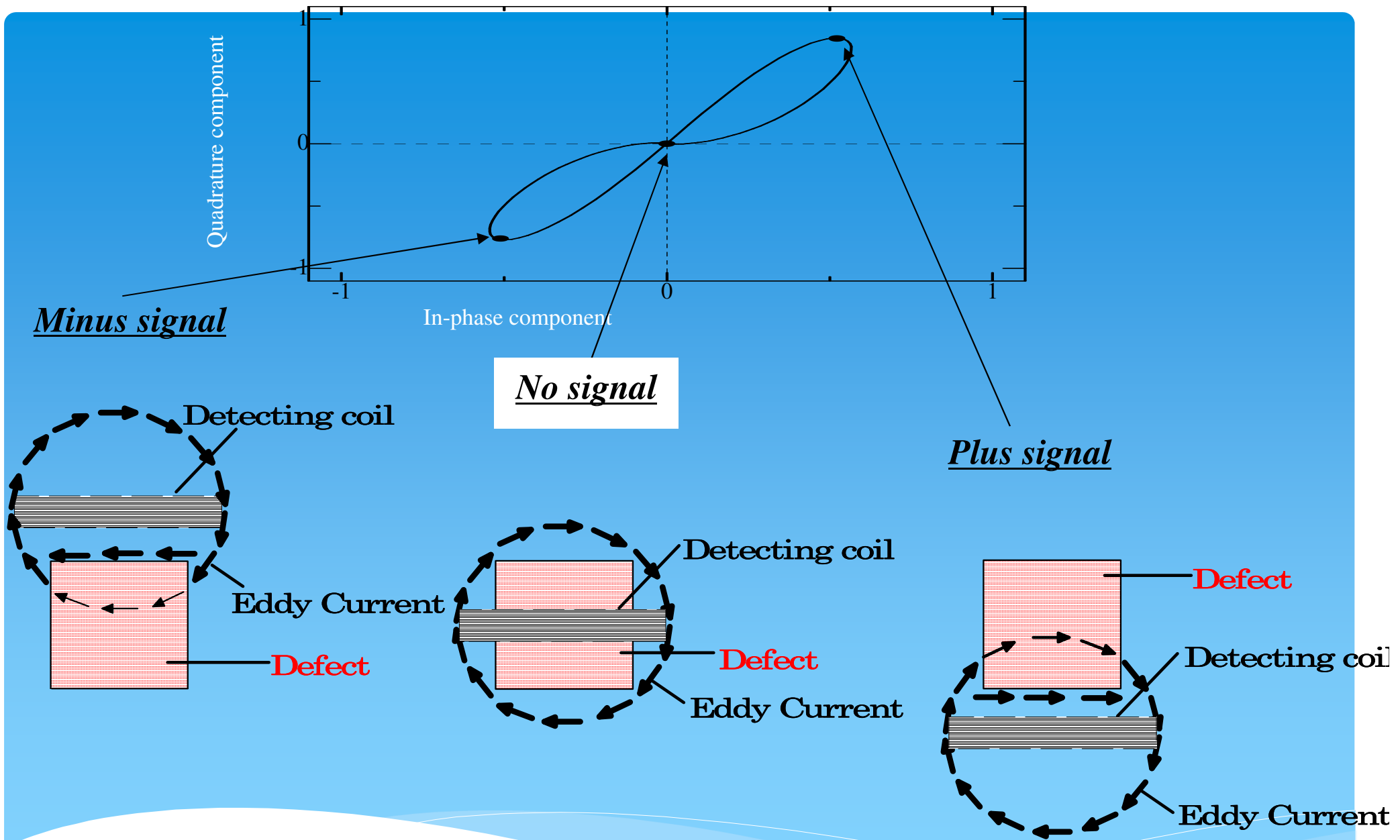
(b) 裏面きずの場合

きず深さが異なる場合のきず信号パターン



きず深さに対する信号位相

# 渦電流探傷のプローブによる CFRPの損傷検出



④プローブによる渦電流探傷試験  
 —織物CFRPの場合を想定—

# 模擬損傷の検出実験

- ・④プローブの寸法

励磁コイル: 外径9mm、巻線断面積 $1\text{mm}^2$

検出コイル: 幅・高さ7mm、巻線断面積 $1\text{mm}^2$

- ・CFRP試験体(3種類)

①織物CFRP: 0.2mmCFシートを15層積層

②擬似等方CFRP、③直交積層CFRP

: 0.2mm一方向CFシートを15層積層

導電率 繊維方向  $7700\text{ S/m}$

積層方向  $48\text{ S/m}$

# 模擬損傷の検出実験

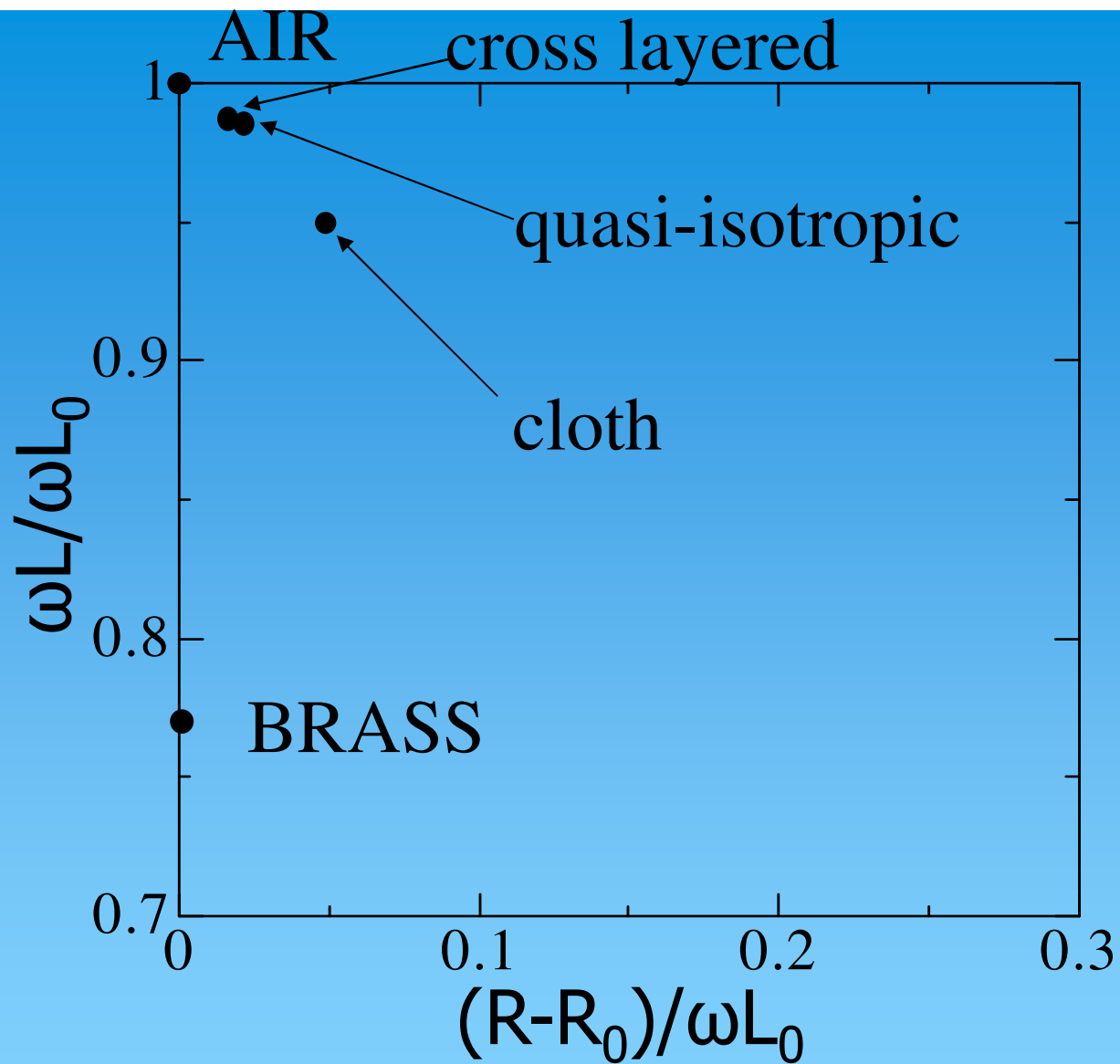
- ・試験周波数 1～5MHz

渦電流強度：試験周波数と試験体の

電磁気特性（導電率や透磁率）の積

- ・プローブの走査

x,y方向に間隔0.5mで2次元に走査



励磁コイルのインピーダンス変化  
 —CFRPの導電性の違い—



# 電磁界解析

## ・渦電流問題の支配方程式

(変位電流が無視できる問題)

$$\nabla \times H = J$$

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \cdot J = 0$$

但し、 $H$ : 磁界、 $E$ : 電界、 $B$ : 磁束密度

$J$ : 電流密度、 $t$ : 時間

# 電磁界解析

・  $A$ - $\phi$ 法では、

電気スカラーポテンシャル  $\phi$  と

磁気ベクトルポテンシャル  $A$  を導入して

$$E = -\nabla \phi - \partial A / \partial t$$

$$B = \nabla \times A$$

# 電磁界解析

- ・  $A$ - $\Phi$ 法の支配方程式

クーロンゲージ  $\nabla \cdot A = 0$  を代入

$$1/\mu \nabla^2 A = -J_0 \nabla - \sigma (\partial A / \partial t + \nabla \Phi)$$

$$\nabla \cdot \sigma (\partial A / \partial t + \nabla \Phi) = 0$$

但し、 $\mu$ : 透磁率、 $\sigma$ : 導電率

- ・ 離散化

ガラーキンの法を適用

# 電磁界解析

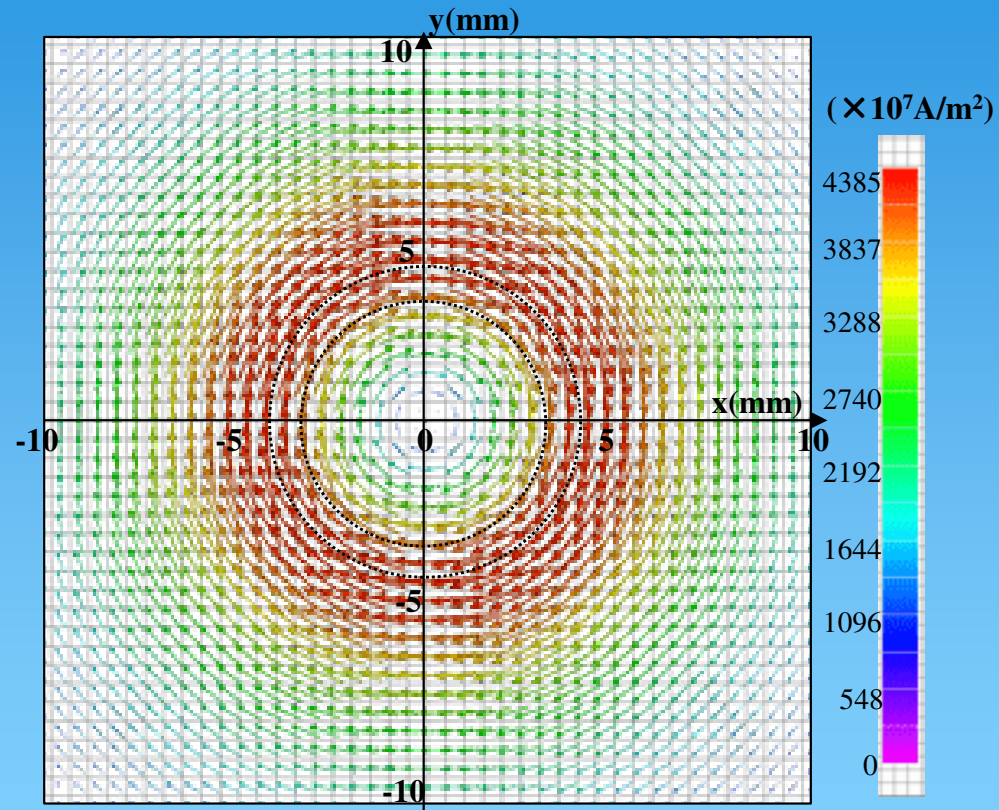
- ・電流密度 $J$ [A/m]と電場 $E$ [V/m]との関係

$$J = \sigma E$$

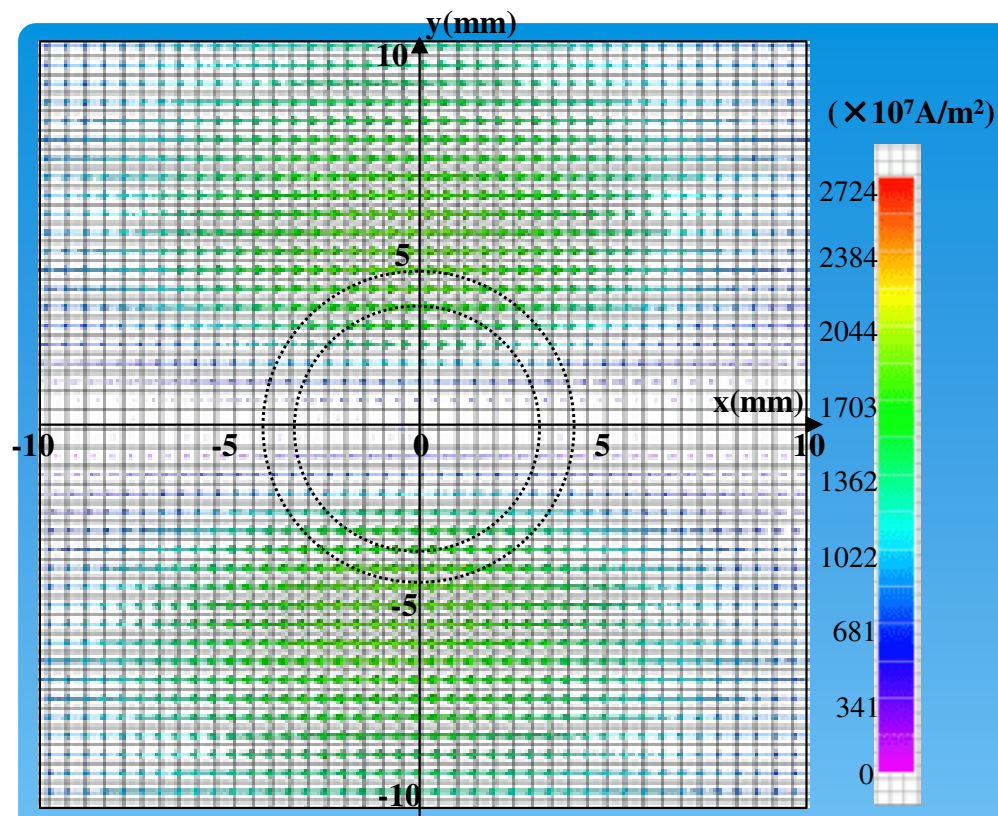
- ・異方性材料

導電率 $\sigma$ をテンソルで表現

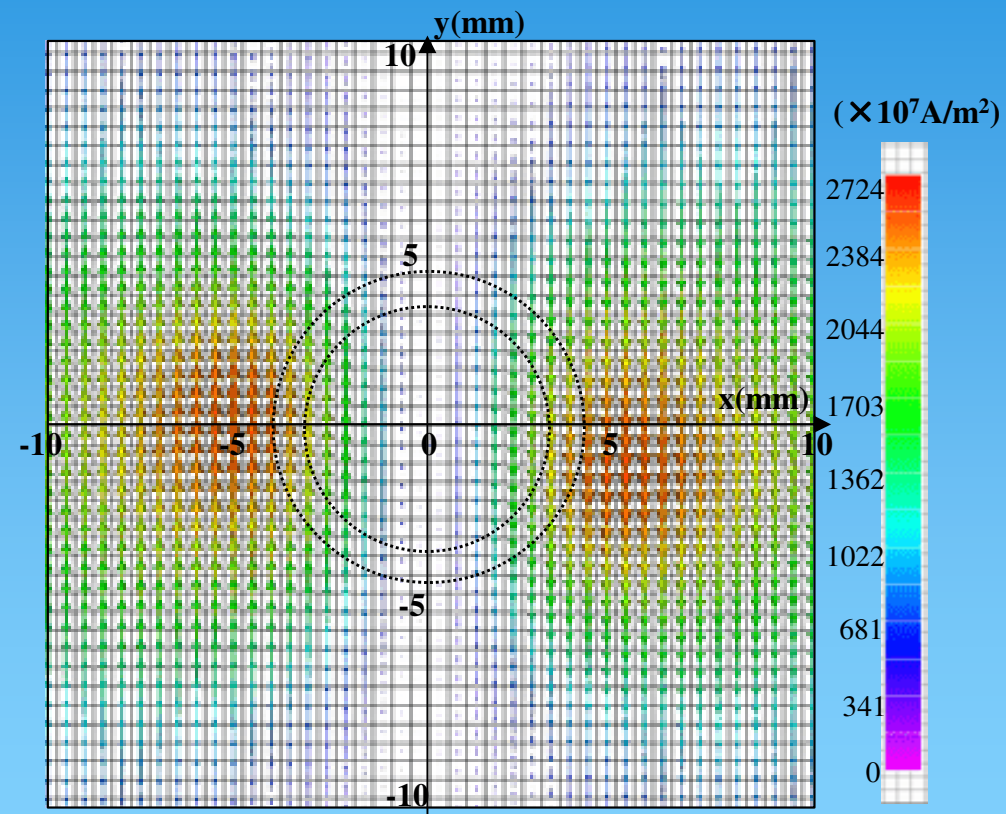
$$\begin{pmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}$$



織物CFRPの渦電流分布(実数成分)

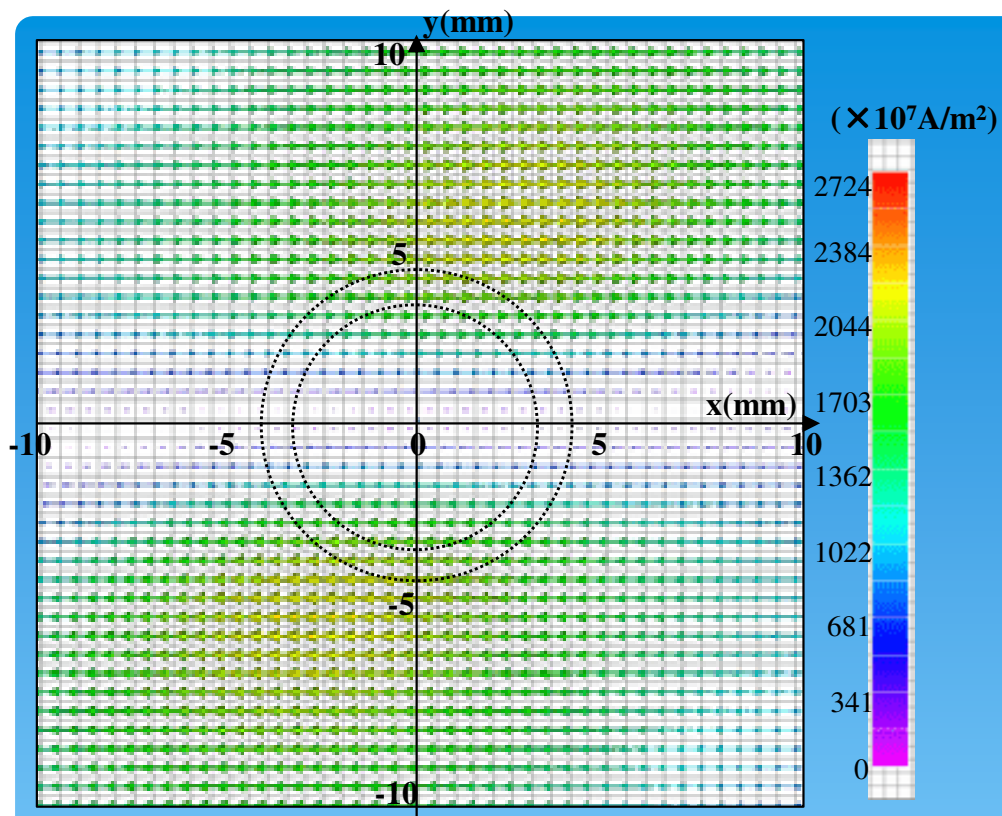


(a)  $0^\circ$  シート

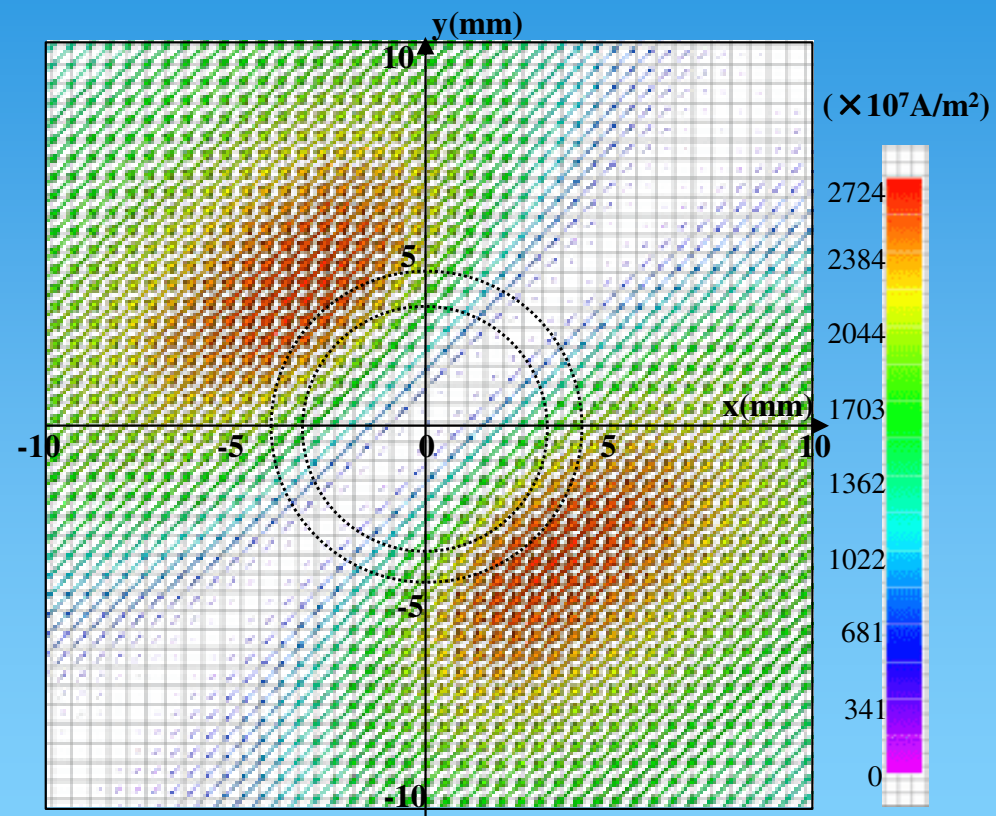


(b)  $90^\circ$  シート

直交積層CFRPの渦電流分布(実数成分)

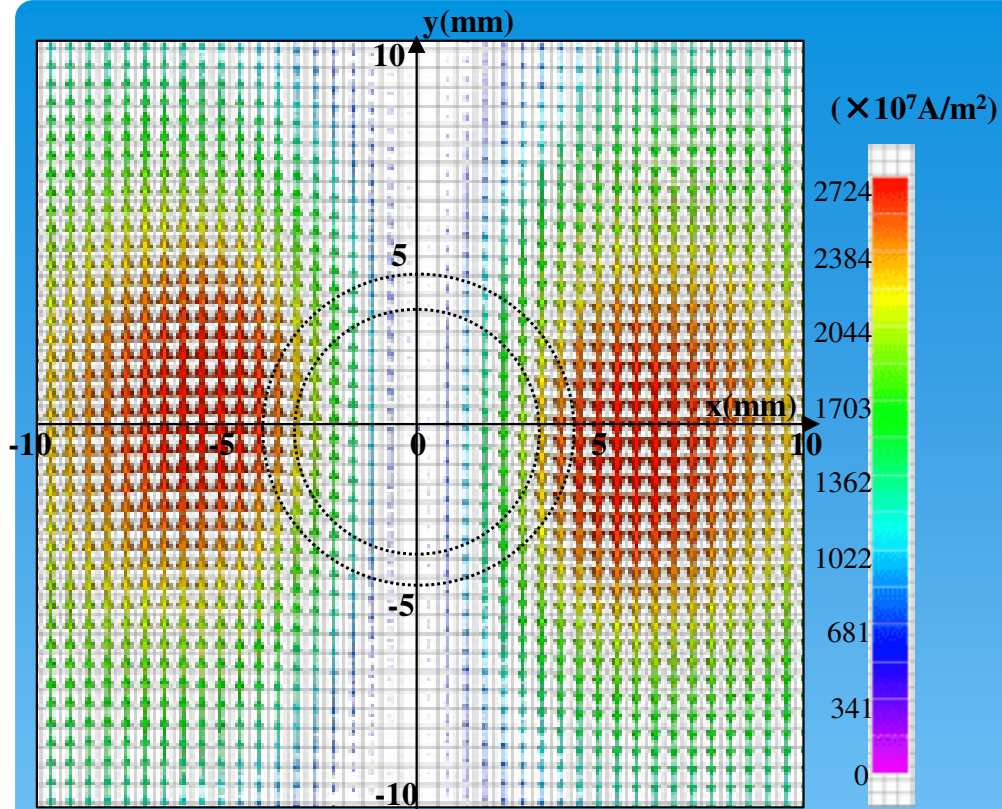


(a)  $0^\circ$  シート

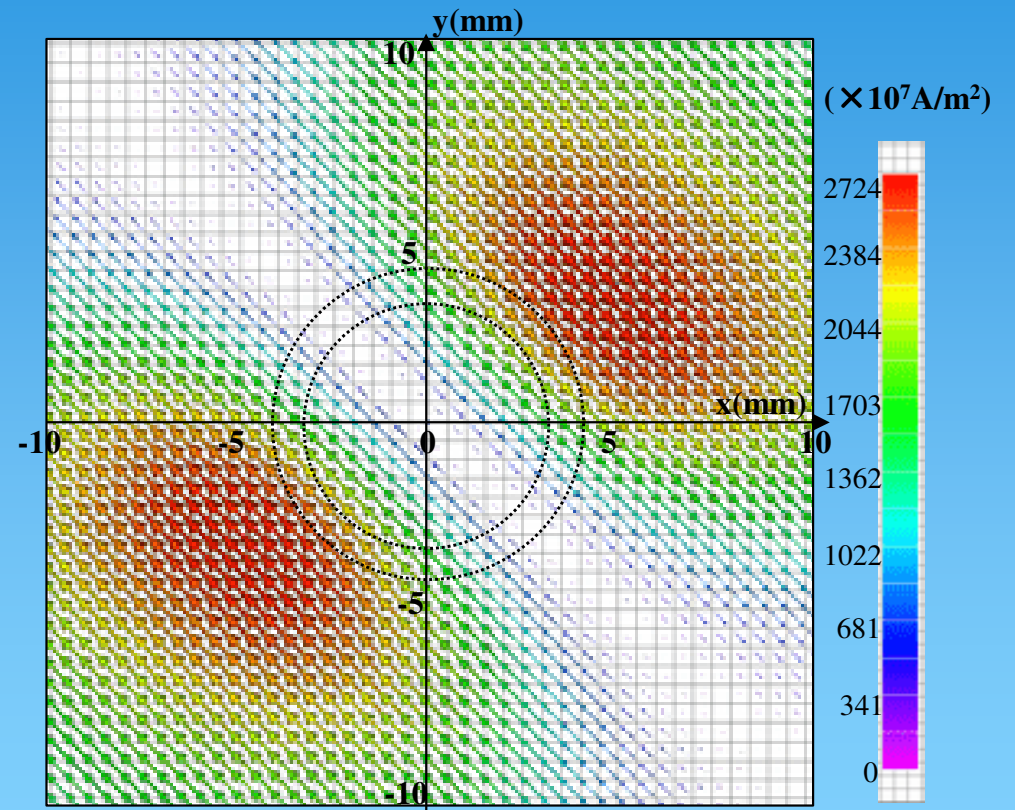


(b)  $45^\circ$  シート

擬似等方CFRPの渦電流分布(実数成分)



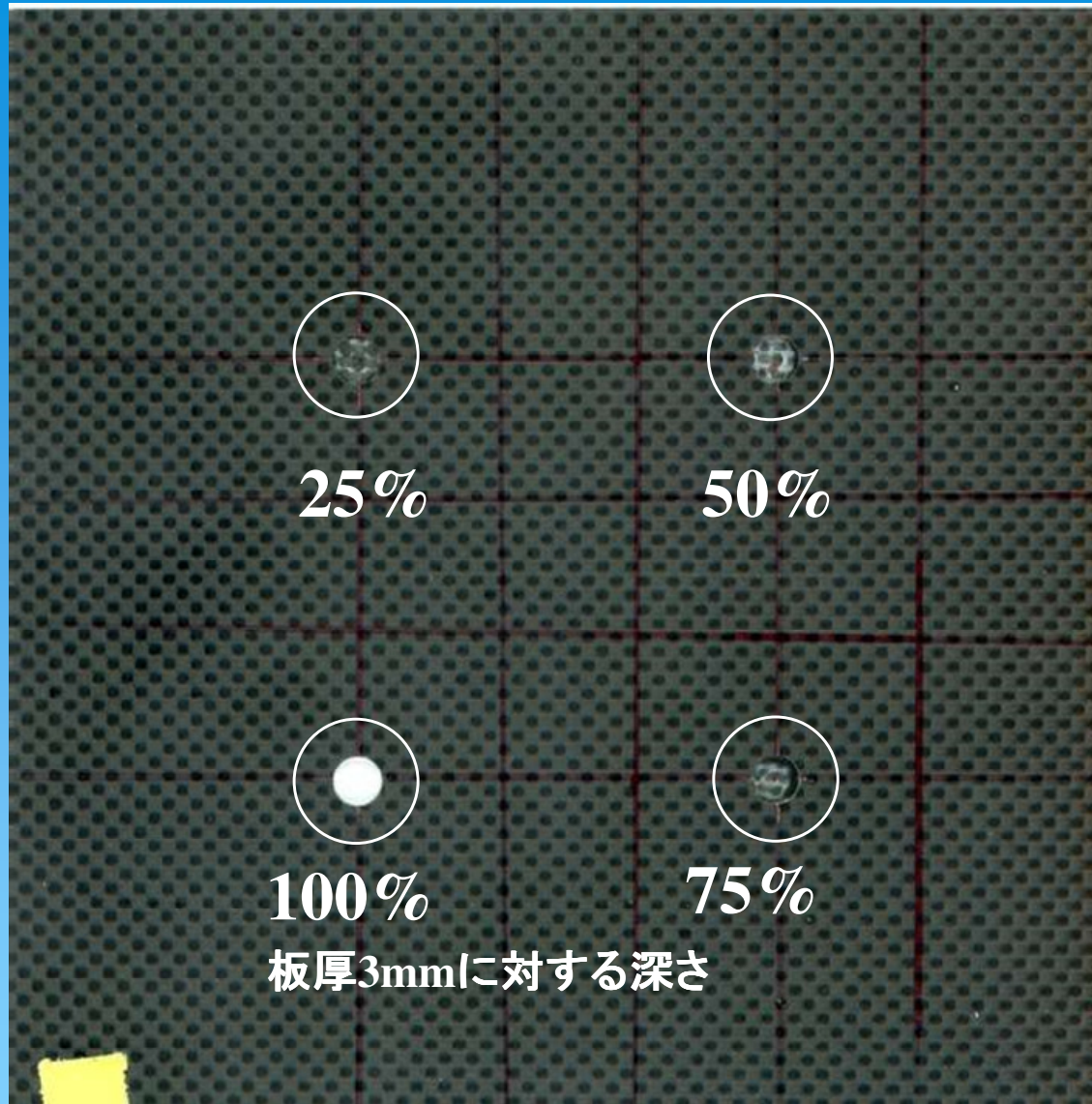
(c)  $90^\circ$  シート



(d)  $135^\circ$  シート

擬似等方CFRPの渦電流分布(実数成分)

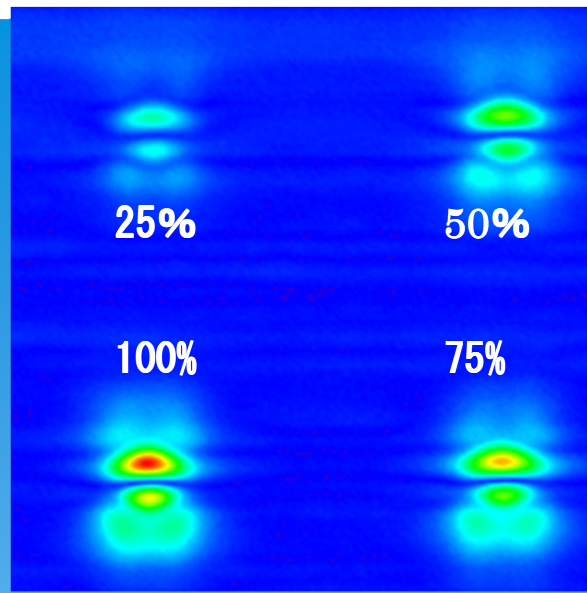




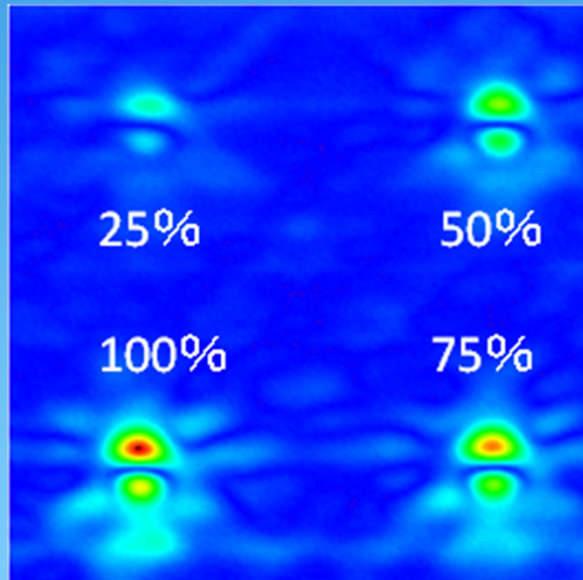
**Defect size**  
**Φ7mm**

**100%**  
板厚3mmに対する深さ

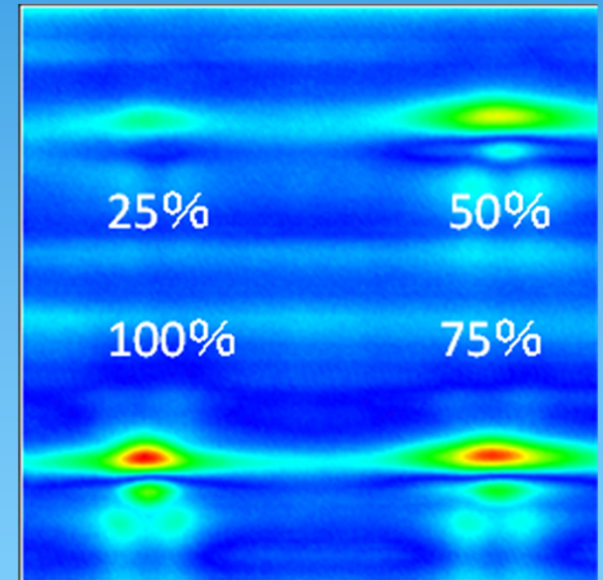
## 平底円筒損傷の検出実験



(a) 織物CFRP

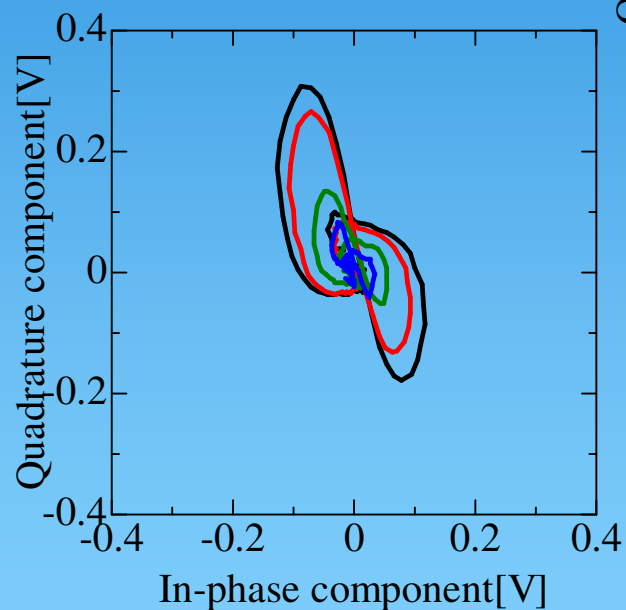


(b) 擬似等方CFRP

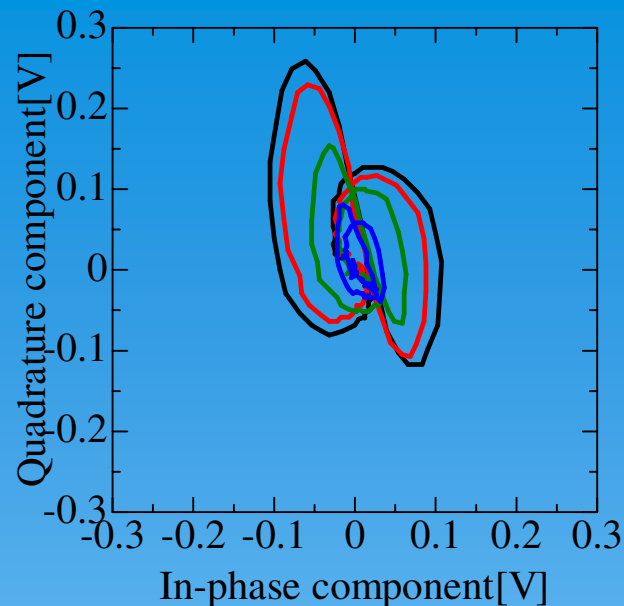


(c) 直交積層CFRP

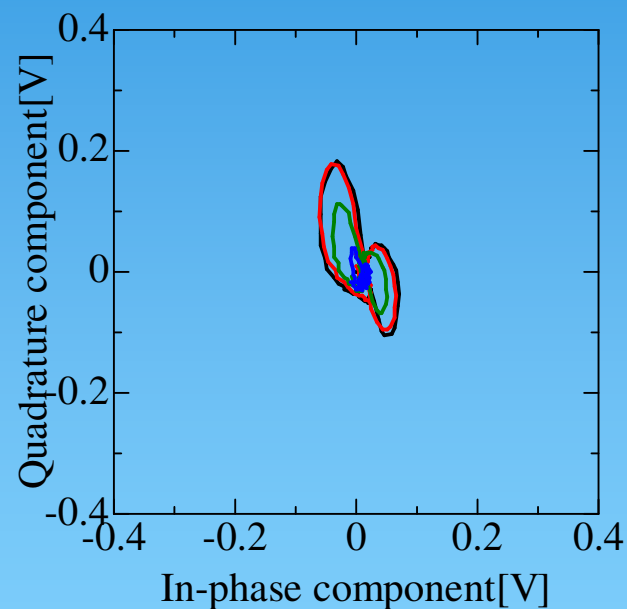
信号振幅の画像表示  
プローブ走査面側の損傷



**(b) 擬似等方CFRP**

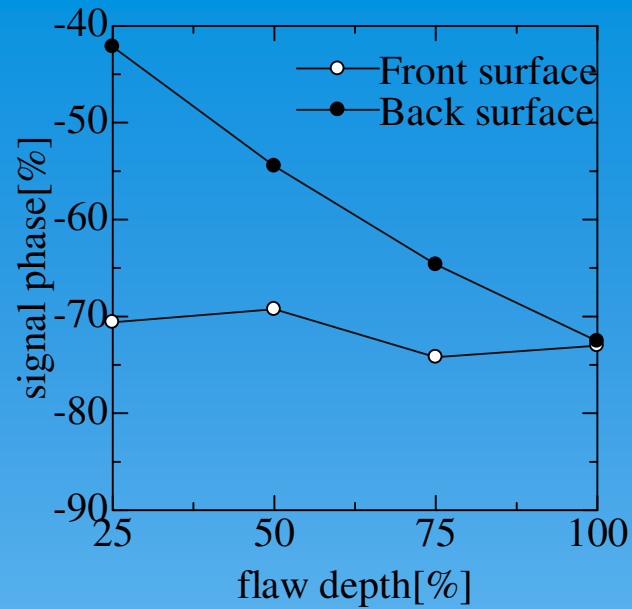


**(a) 織物CFRP**

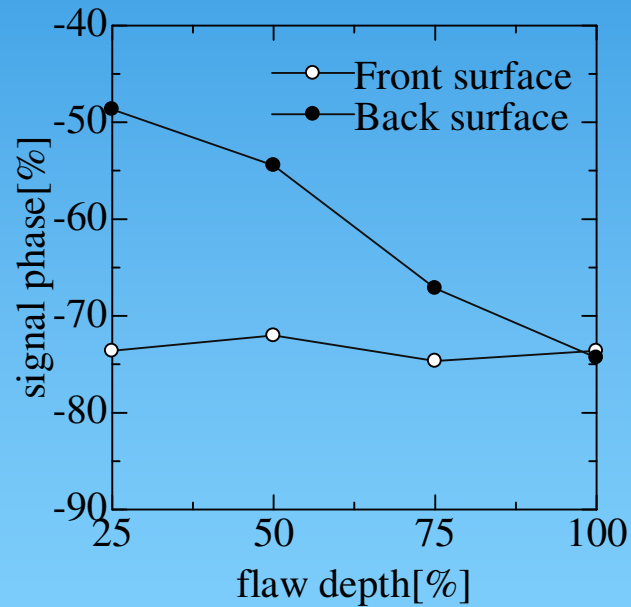


**(c) 直交積層CFRP**

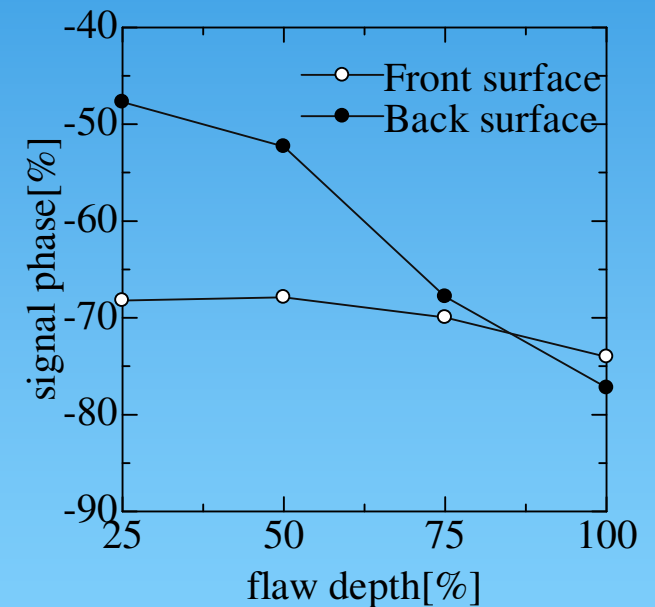
検出信号パターン  
プローブ走査面側の損傷



(a) 織物CFRP



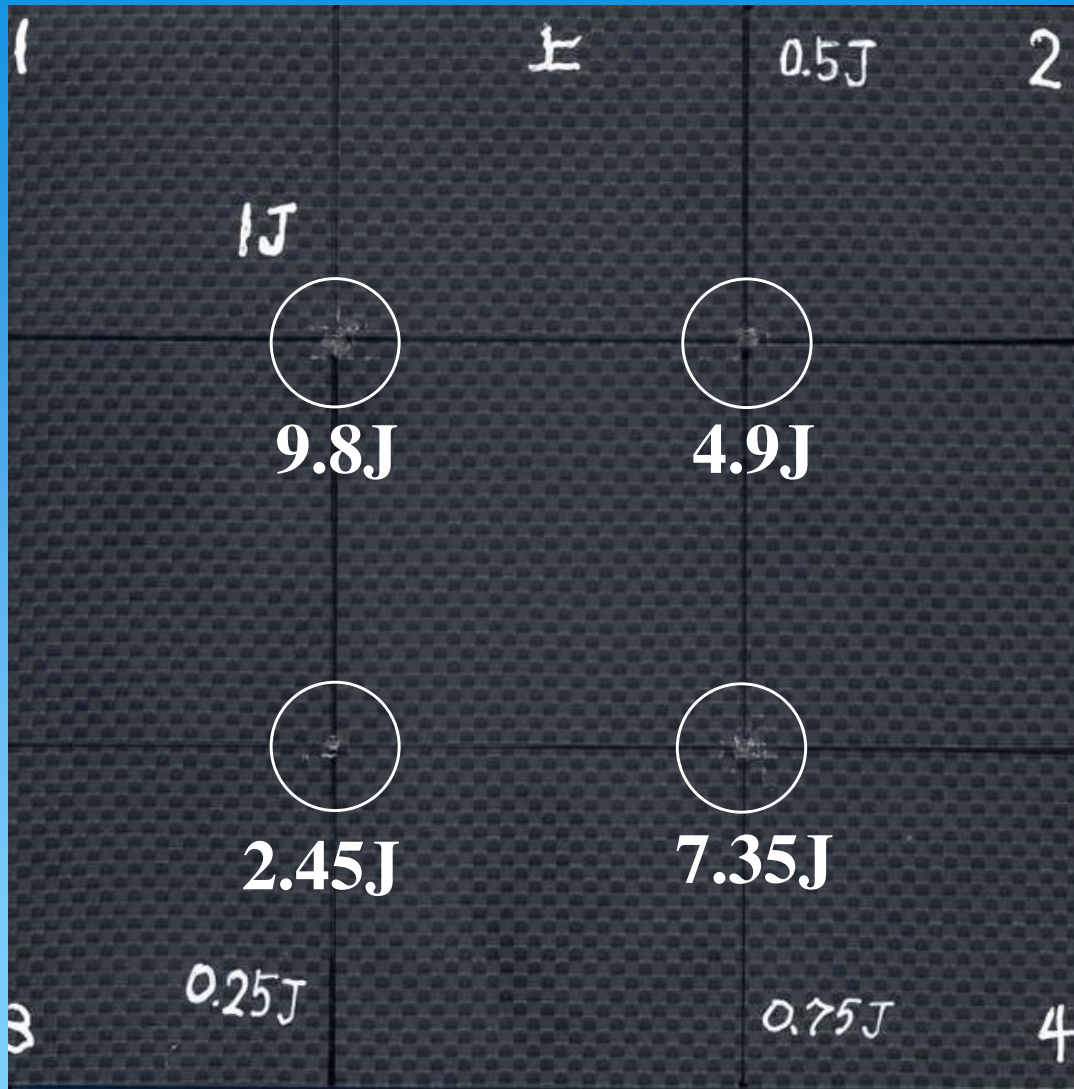
(b) 擬似等方CFRP



(c) 直交積層CFRP

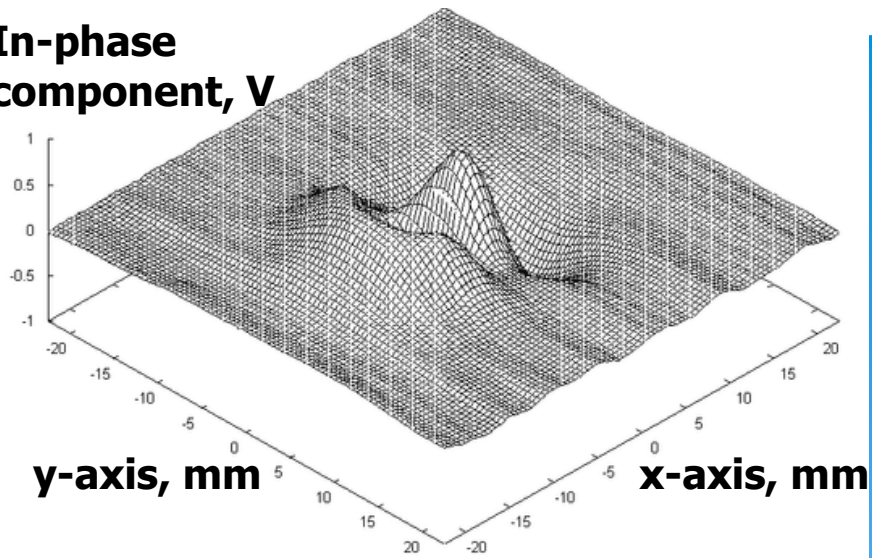
損傷深さに対する信号位相の変化





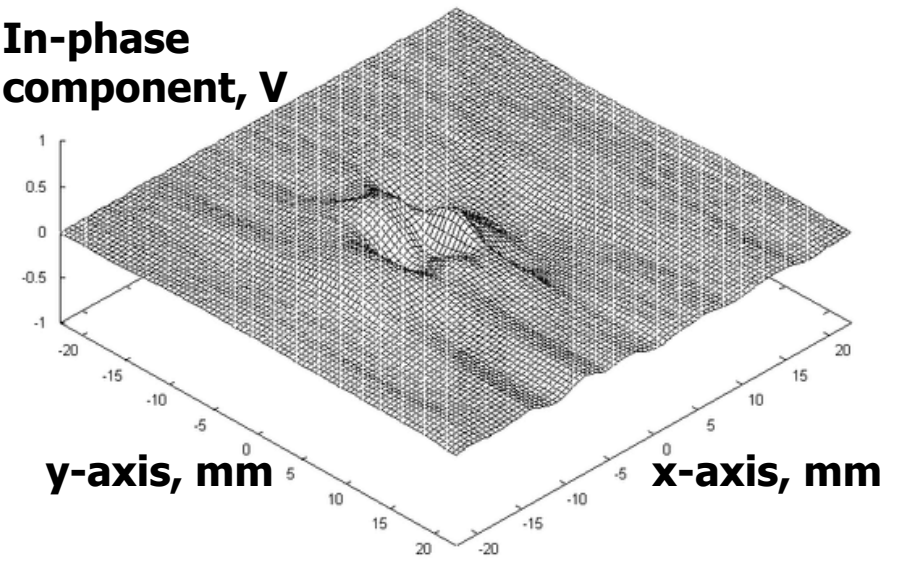
人工的に衝撃を加えた損傷欠陥

**In-phase  
component, V**



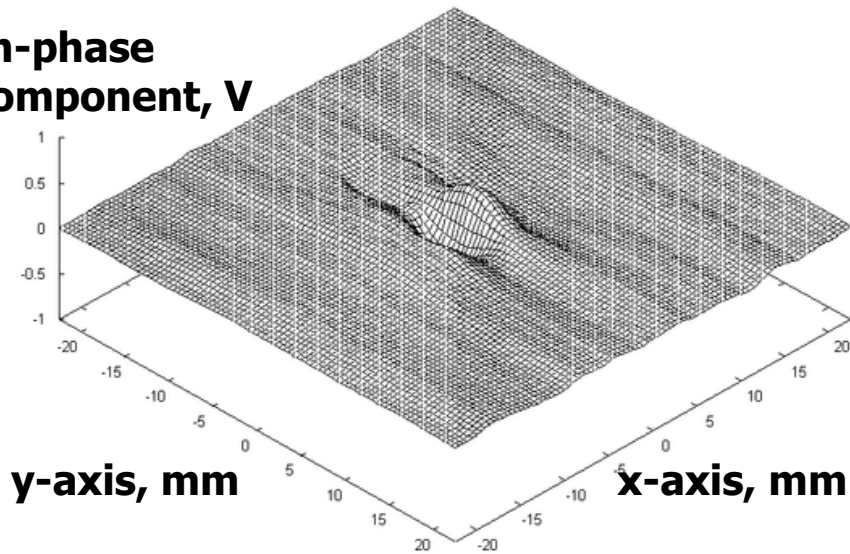
(a) 9.8J

**In-phase  
component, V**



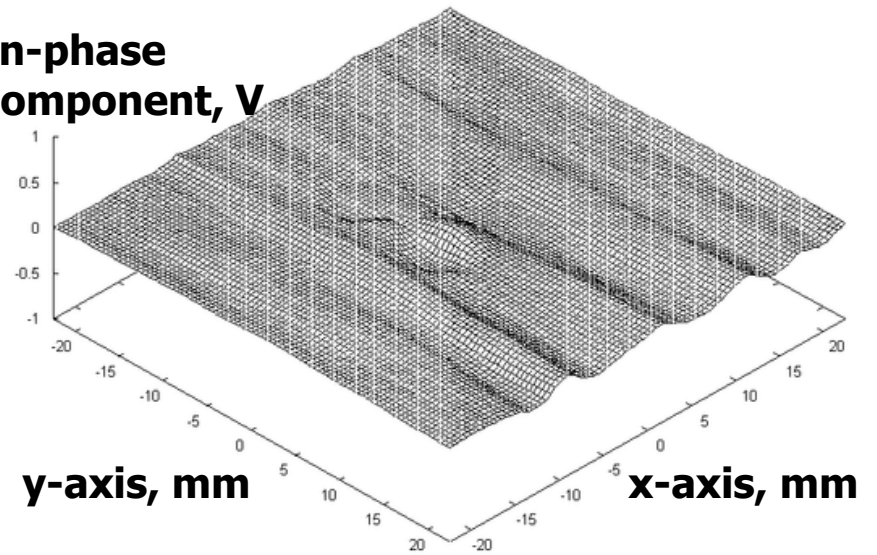
(b) 7.35J

**In-phase  
component, V**



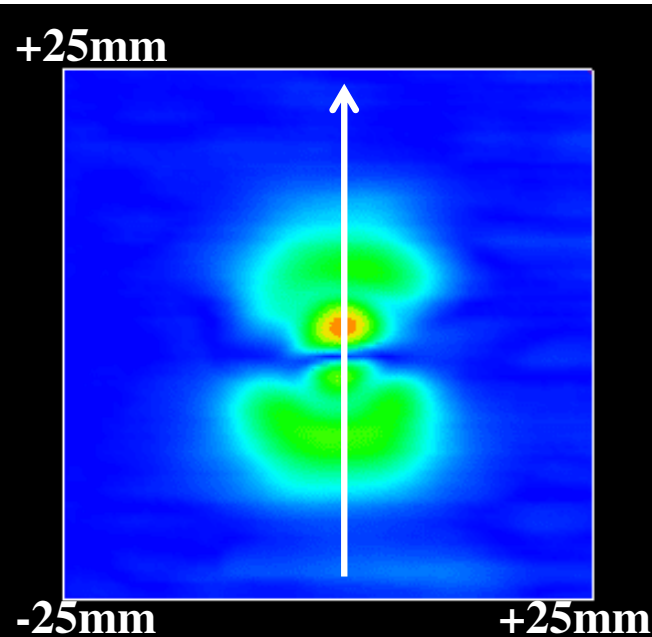
(c) 4.9J

**In-phase  
component, V**

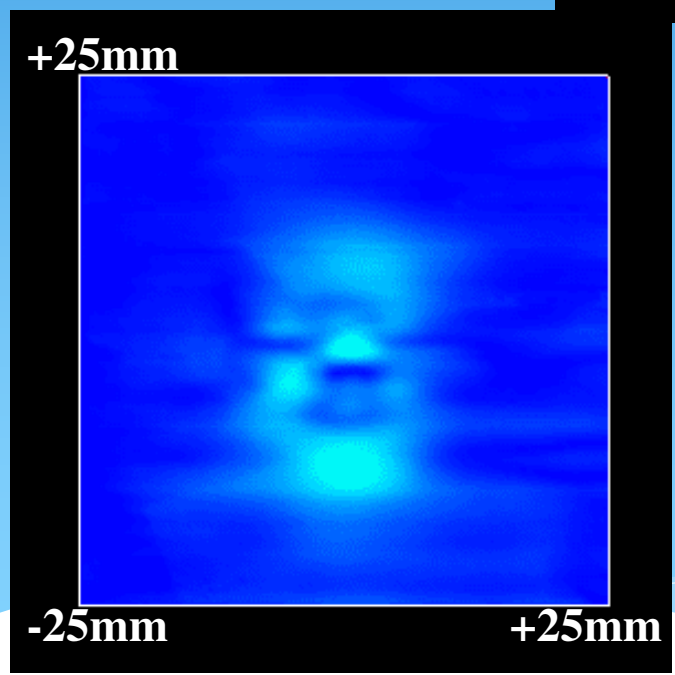


(d) 2.45J

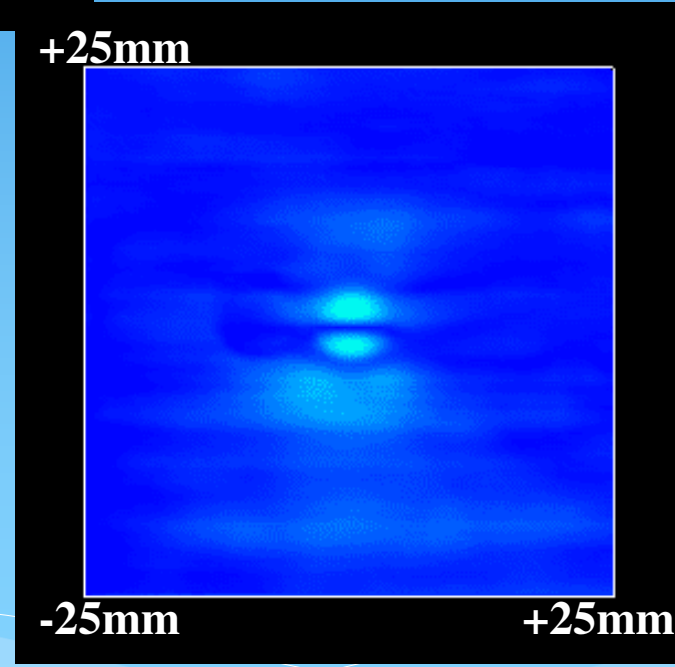
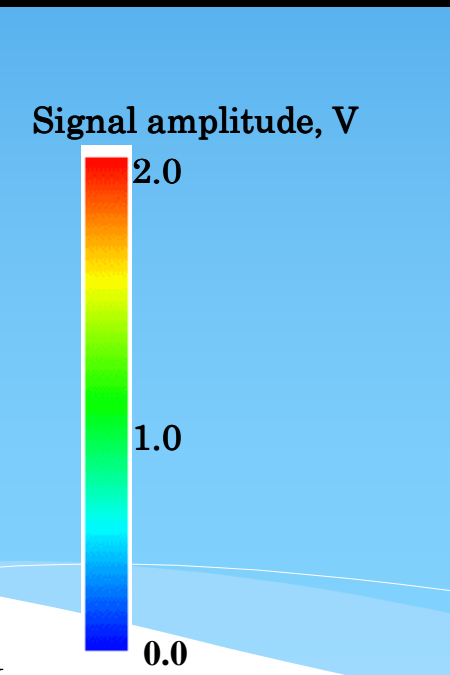
**検出信号の三次元表示**



(a) 9.8J

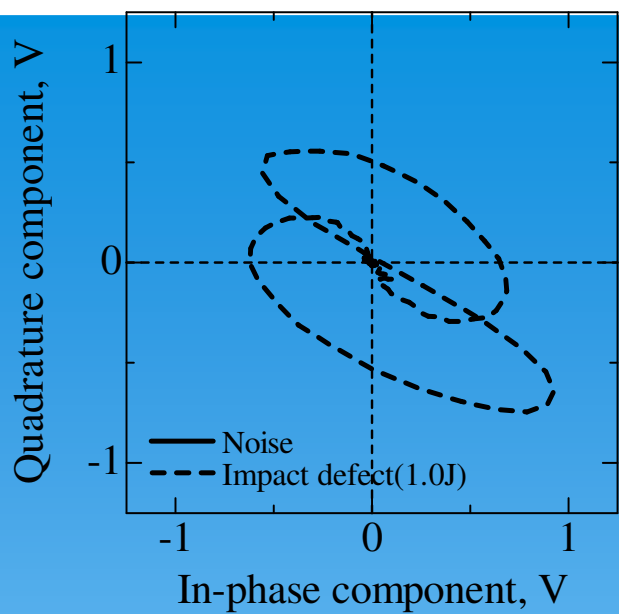


(b) 7.35J

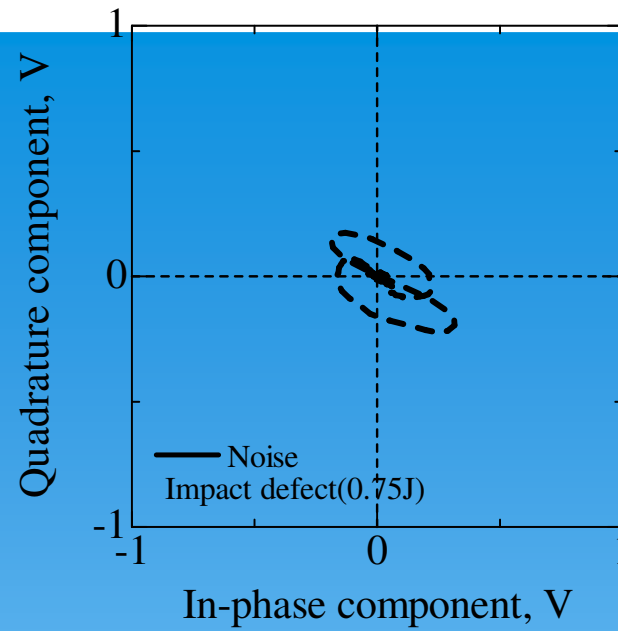


(c) 4.9J

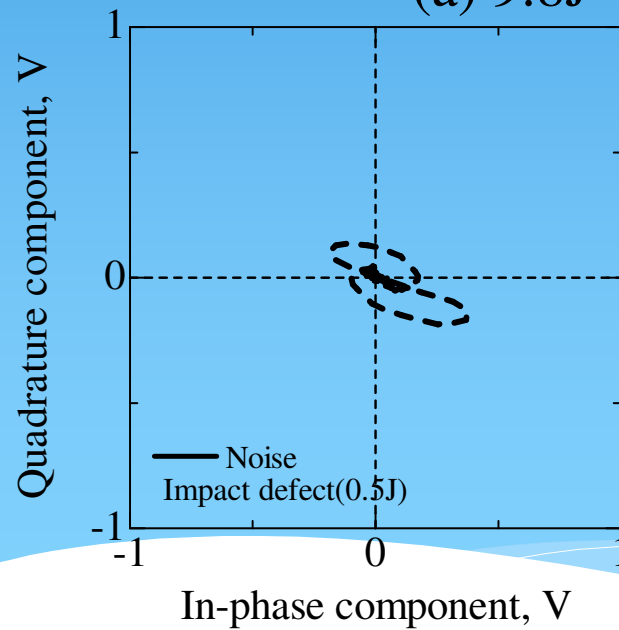
# 信号振幅の画像表示



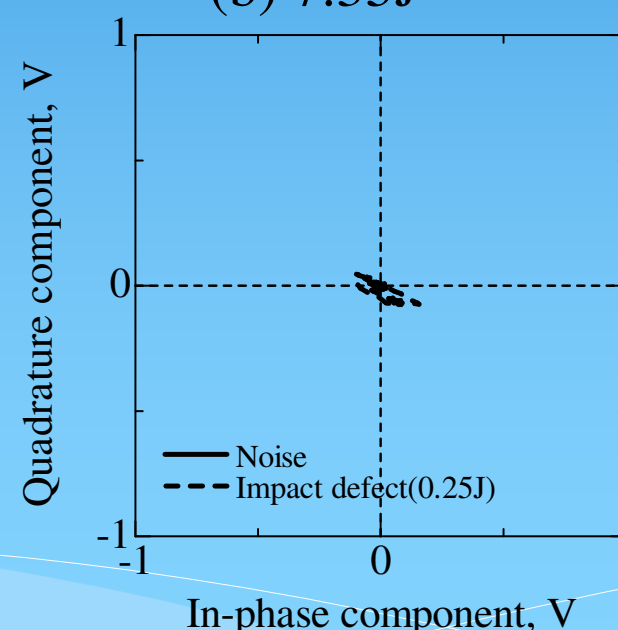
(a) 9.8J



(b) 7.35J



(c) 4.9J

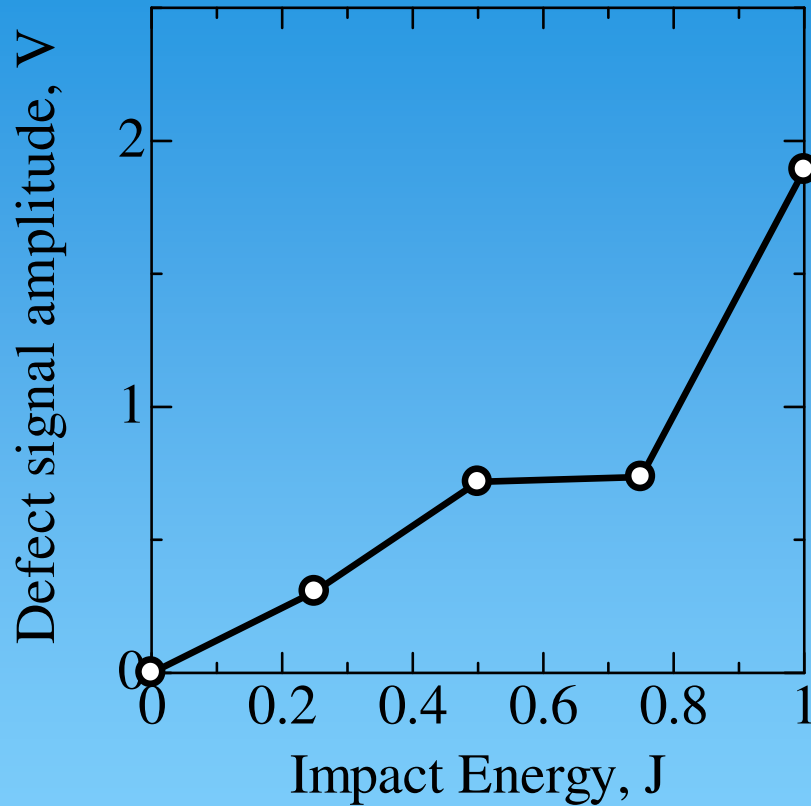


(d) 2.45J

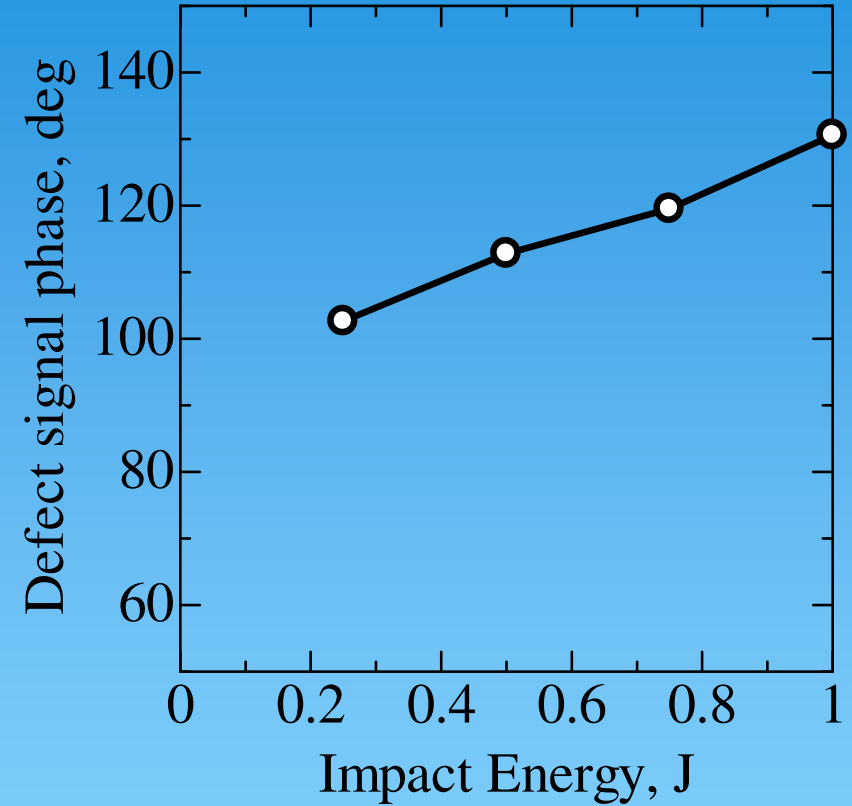
# 検出信号パターン



Test frequency : 1MHz、 Test coil :  $\Theta$  probe  
Cloth CFRP



(a) 信号振幅

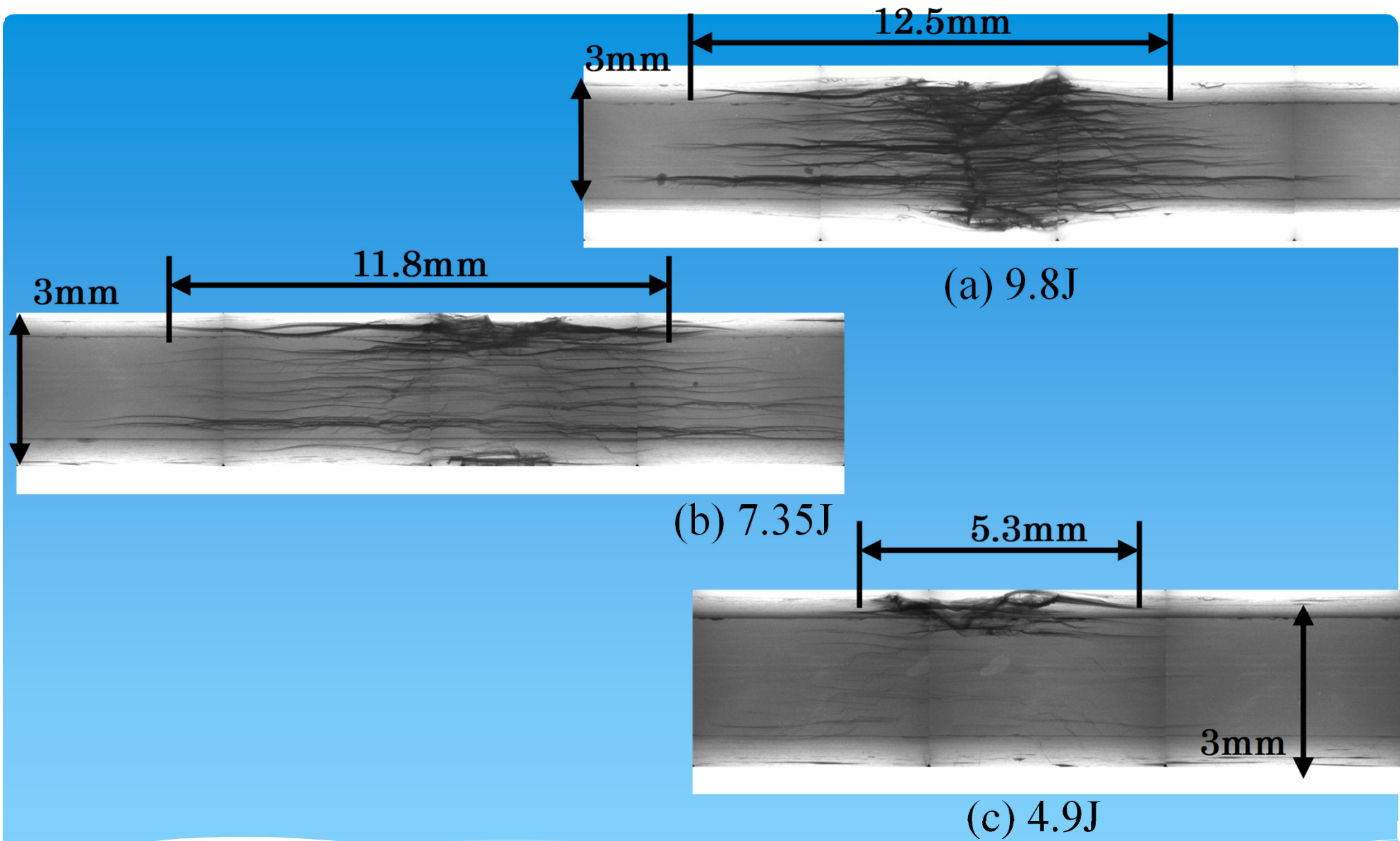


(b) 信号位相

エネルギーに対する  
信号の振幅と位相変化

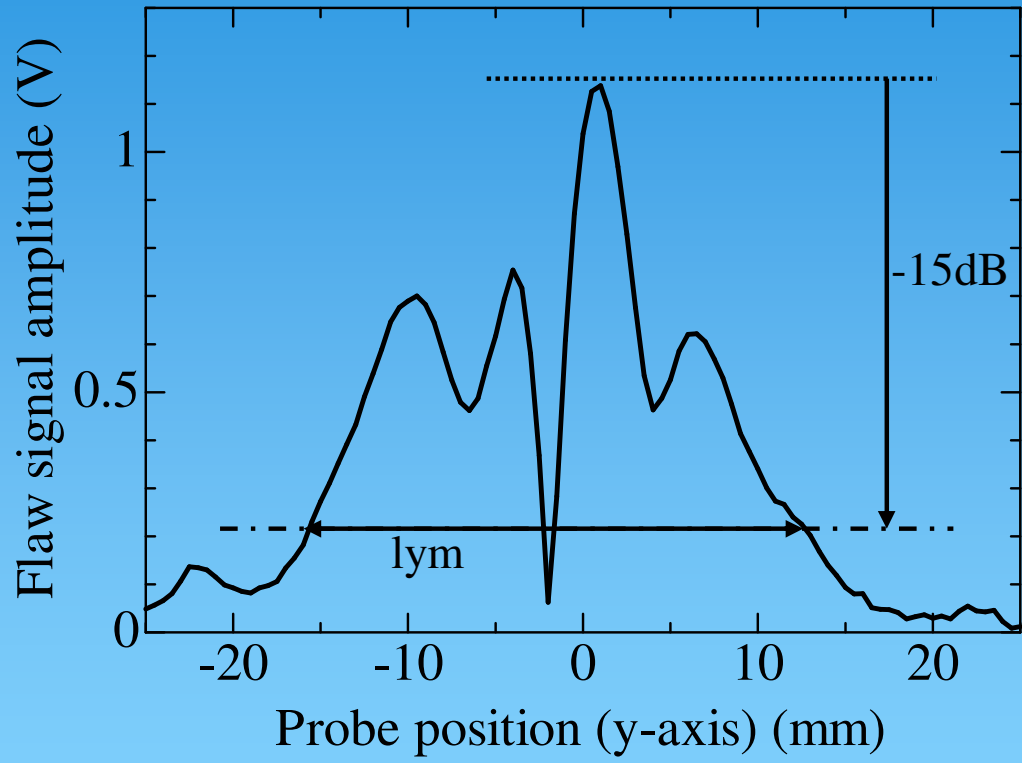
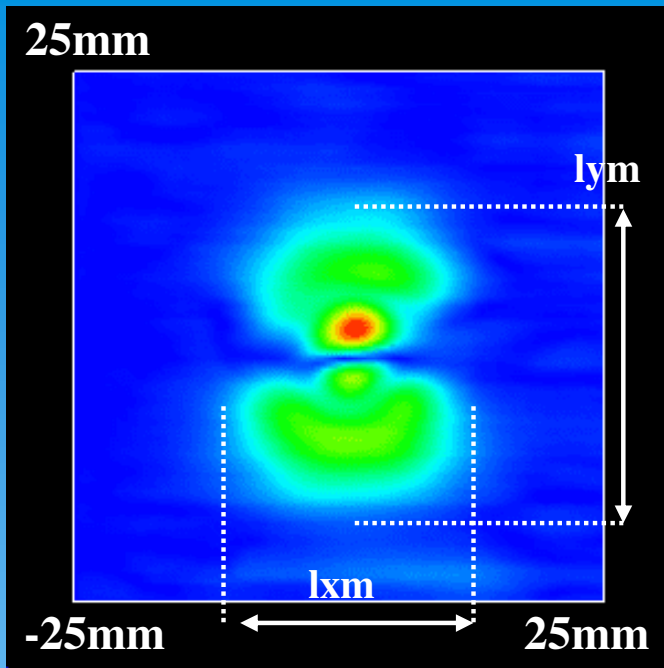


(管電圧40kV, 管電流200 $\mu$ A)  
**X線透過観測装置**

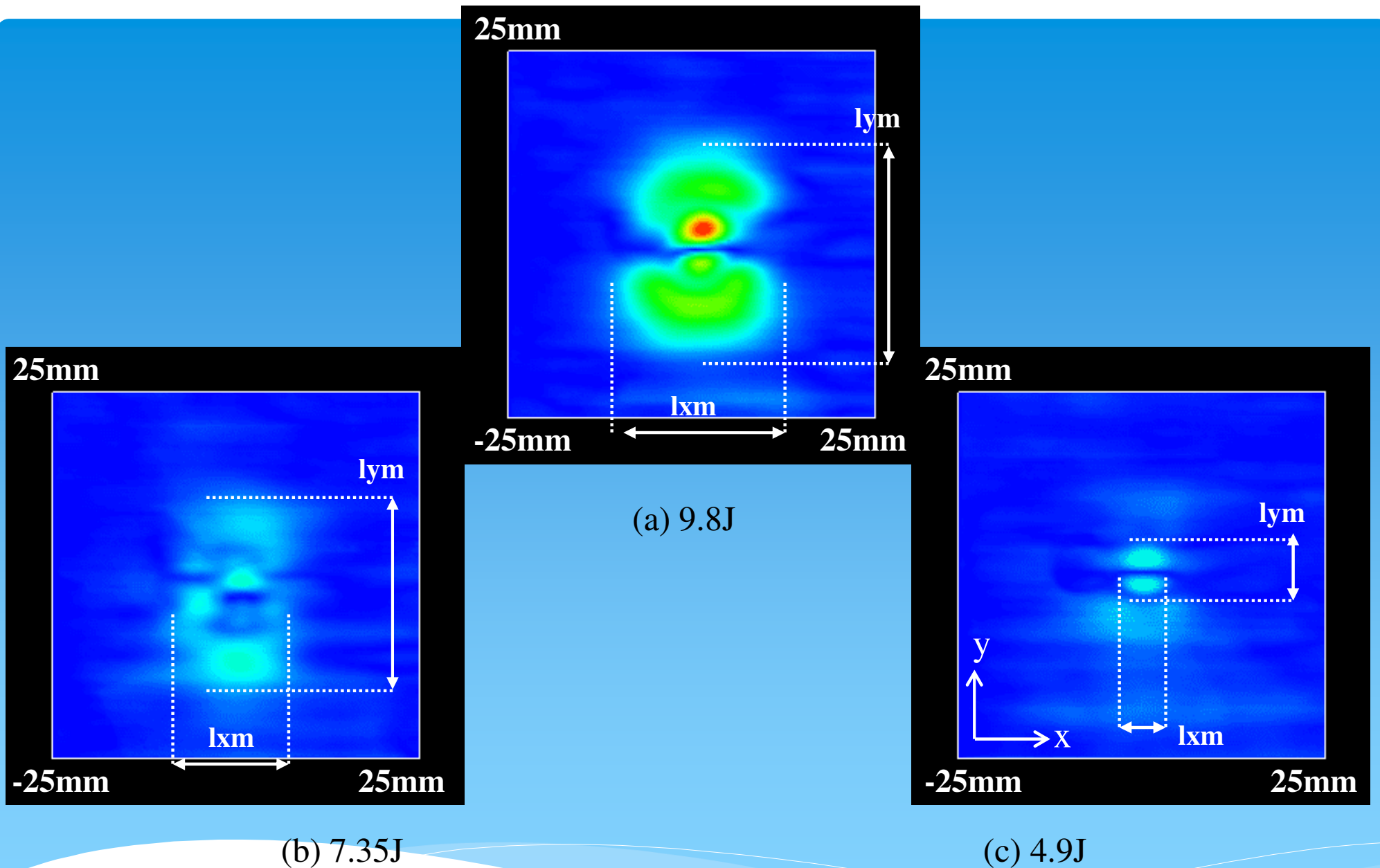


損傷部の板厚断面のX線透過画像

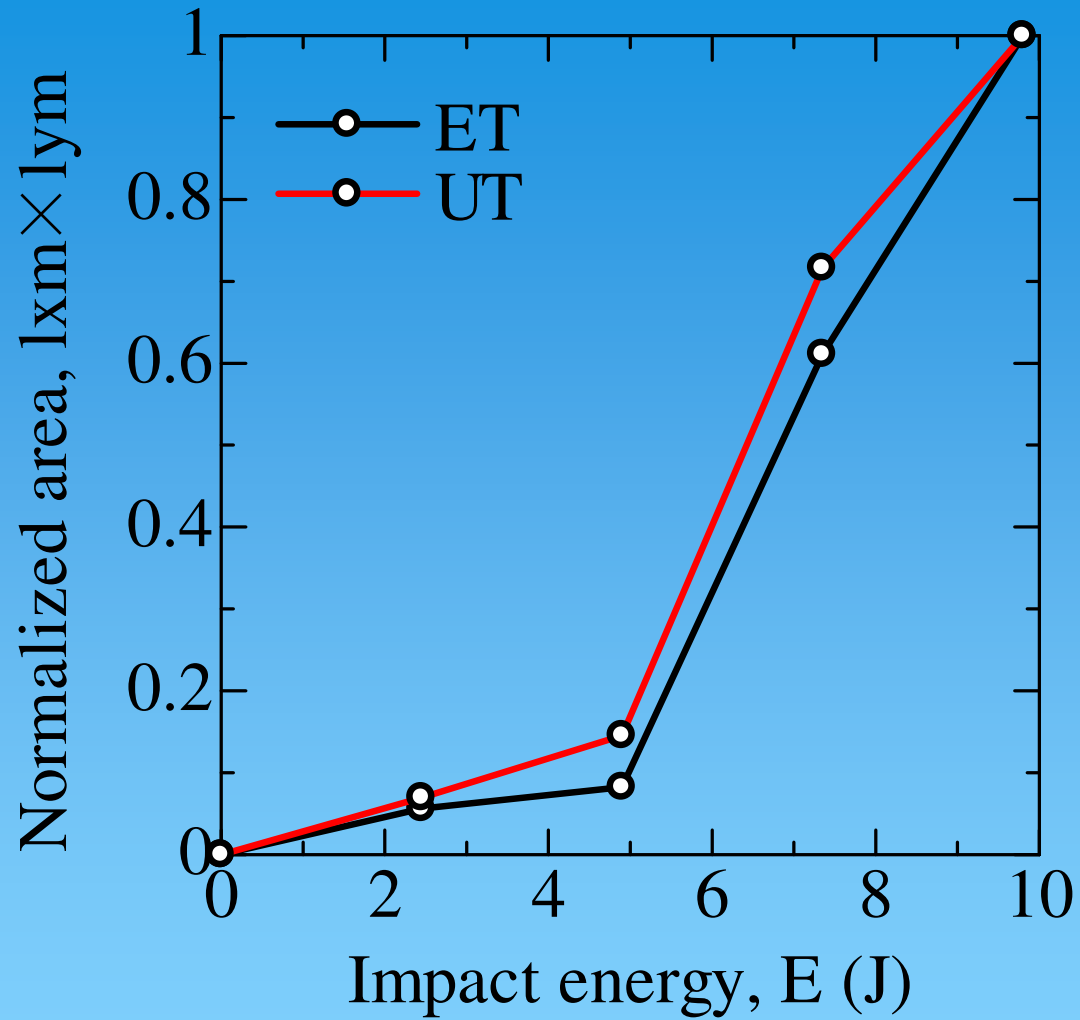
# 損傷評価方法の検討



# プローブ走査位置に対する損傷信号



# 人工衝撃損傷の渦電流探傷による 検出信号振幅の画像表示



衝撃エネルギーに対する信号表示面積

# 炭素繊維複合ケーブル(CFCC) に対する損傷検出



・炭素繊維複合ケーブル  
(Carbon Fiber Composite Cable:CFCC)

特長：軽量、比強度、比剛性、  
耐食性、低線膨張に優れる



【東京製綱(株)HPより引用】

# ・炭素繊維複合ケーブル (Carbon Fiber Composite Cable:CFCC)



【東京製綱(株)HPより引用】

用途：腐食環境下の構造物補強材  
橋梁、コンクリート構造物への  
適用拡大

• 鋼ワイヤーケーブル(橋梁等)

非破壊検査法が開発・適用

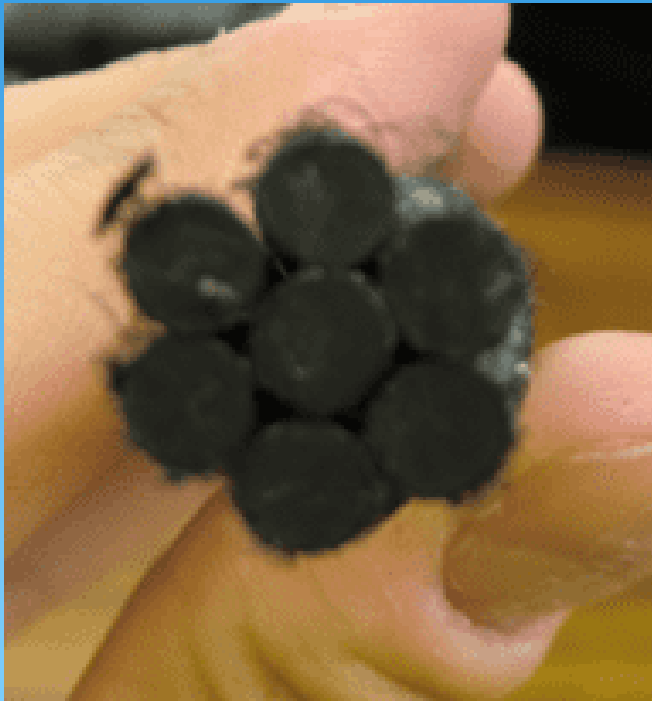
• 炭素繊維複合ケーブル

非破壊検査法があるか？

• 検査法の提案

# CFCCの損傷検出実験

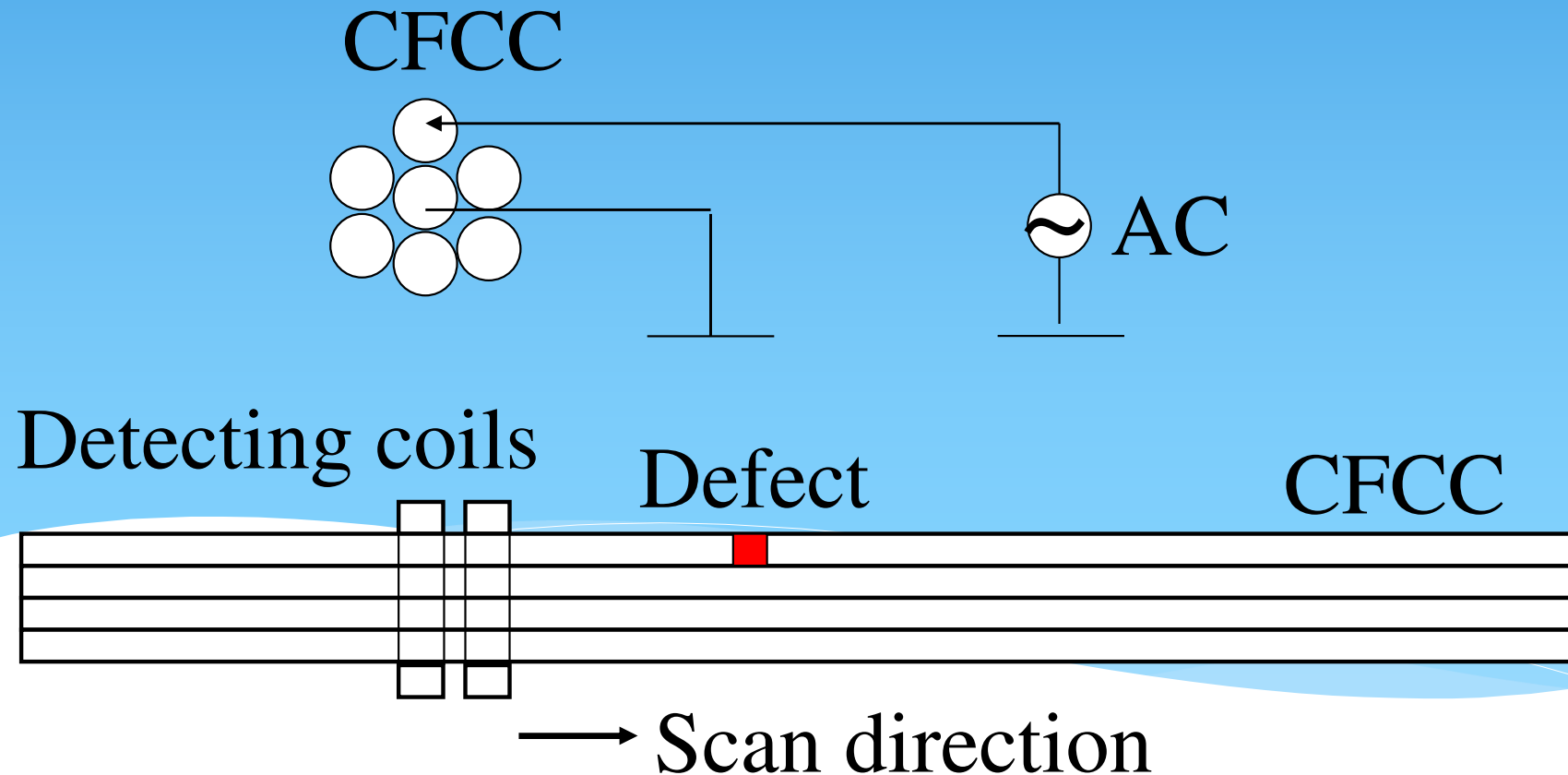
- ・試験体【東京製綱(株)様から提供】

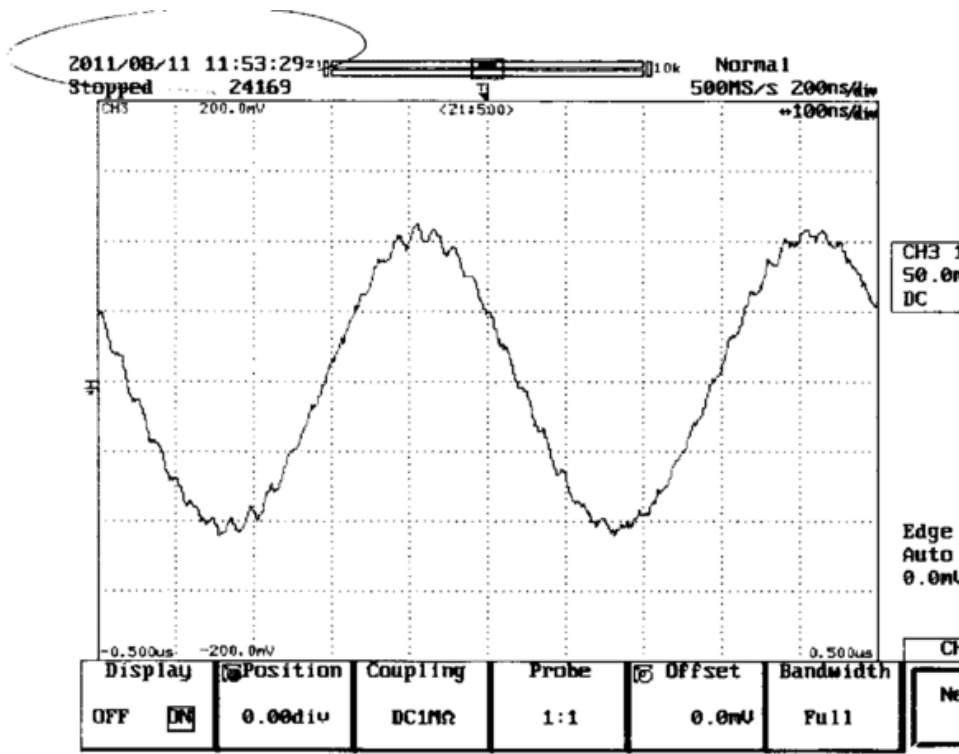


径12.5mm(1x7 12.5Φ)

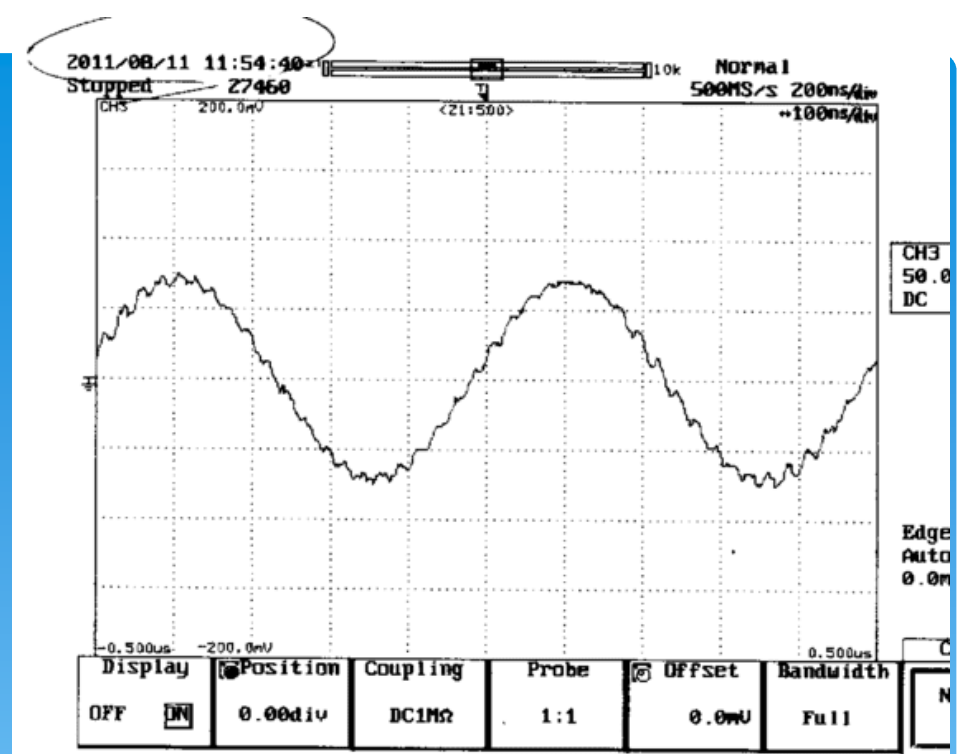
# 交流電圧印加による方法

- CFCCに交流電圧を印加
- ストランド間の静電容量により電流を誘導
- 貫通型差動検出コイルで磁束検出





(a) 電圧供給-損傷間



(b) 損傷以降

AC supply side

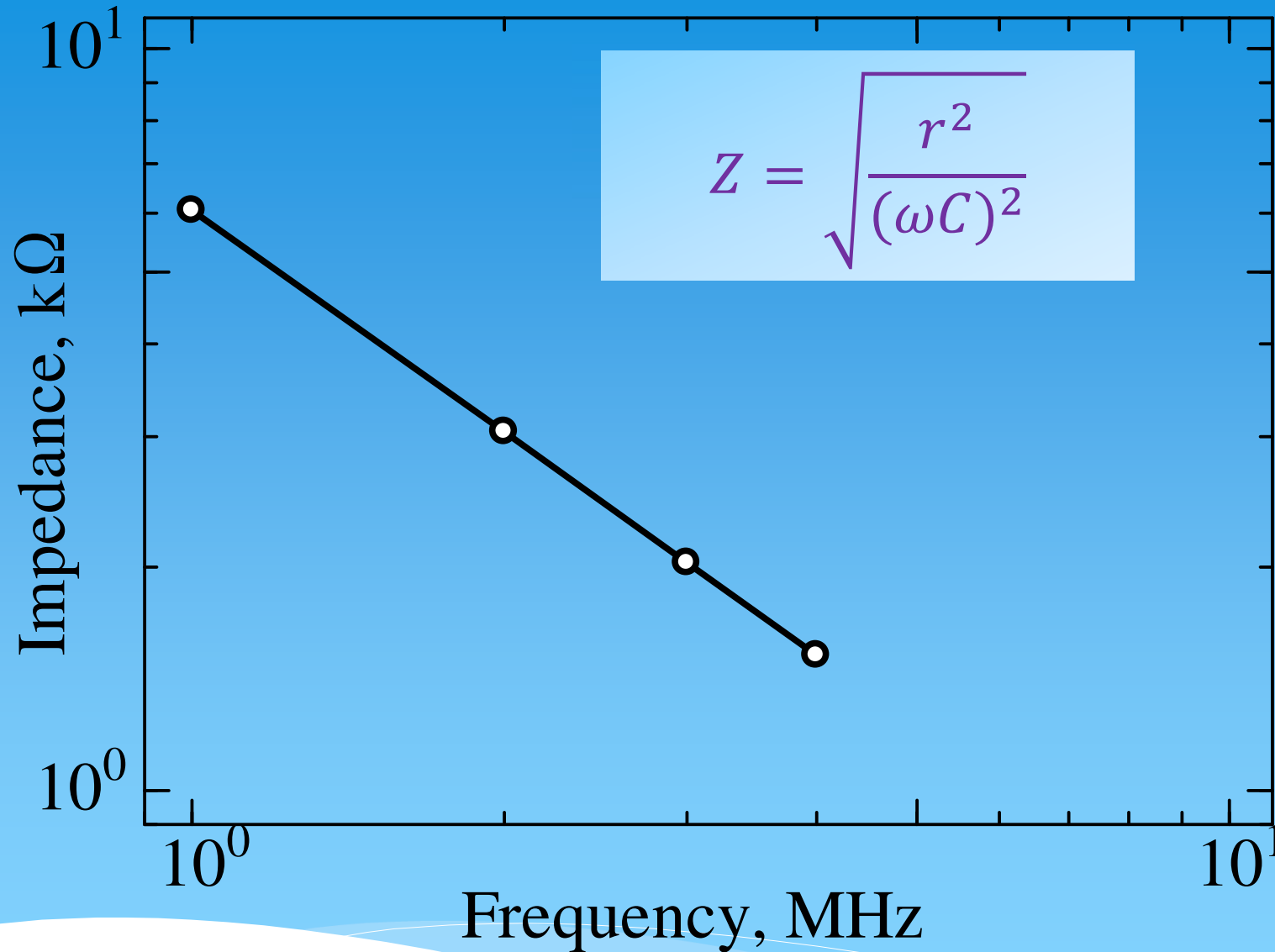
Defect



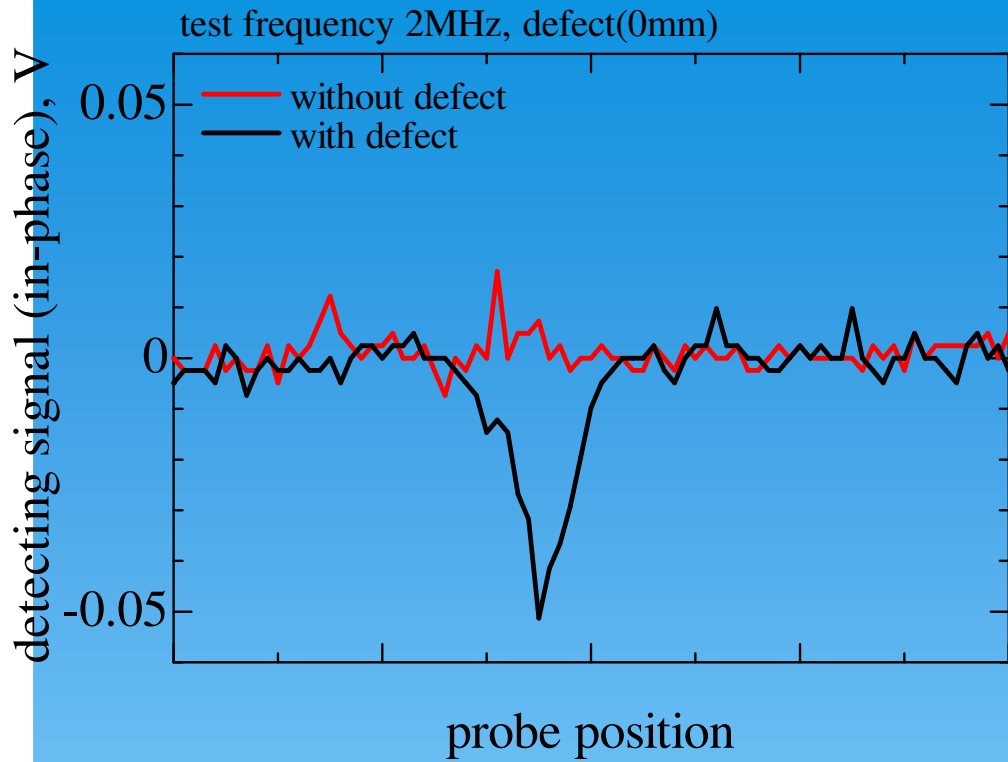
誘導電流による  
差動検出コイル(1つ)の起電力波形



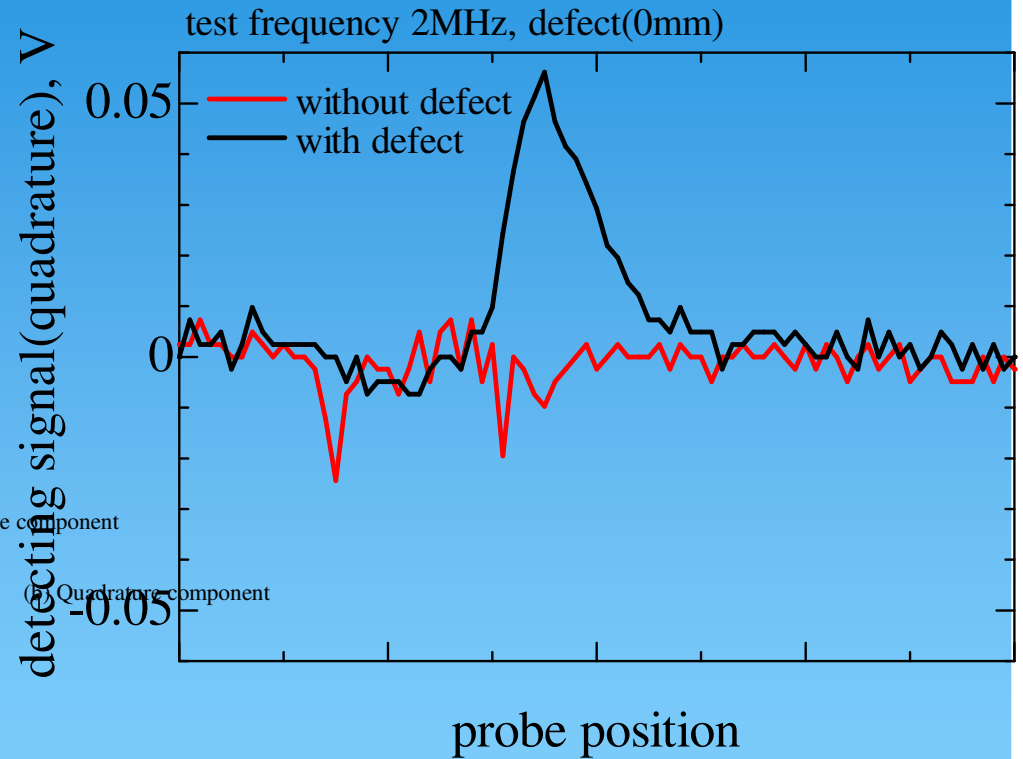
Electrode length : 50mm



周波数に対するインピーダンス変化



(a) In-phase component



(b) Quadrature component

# 損傷検出の実験結果

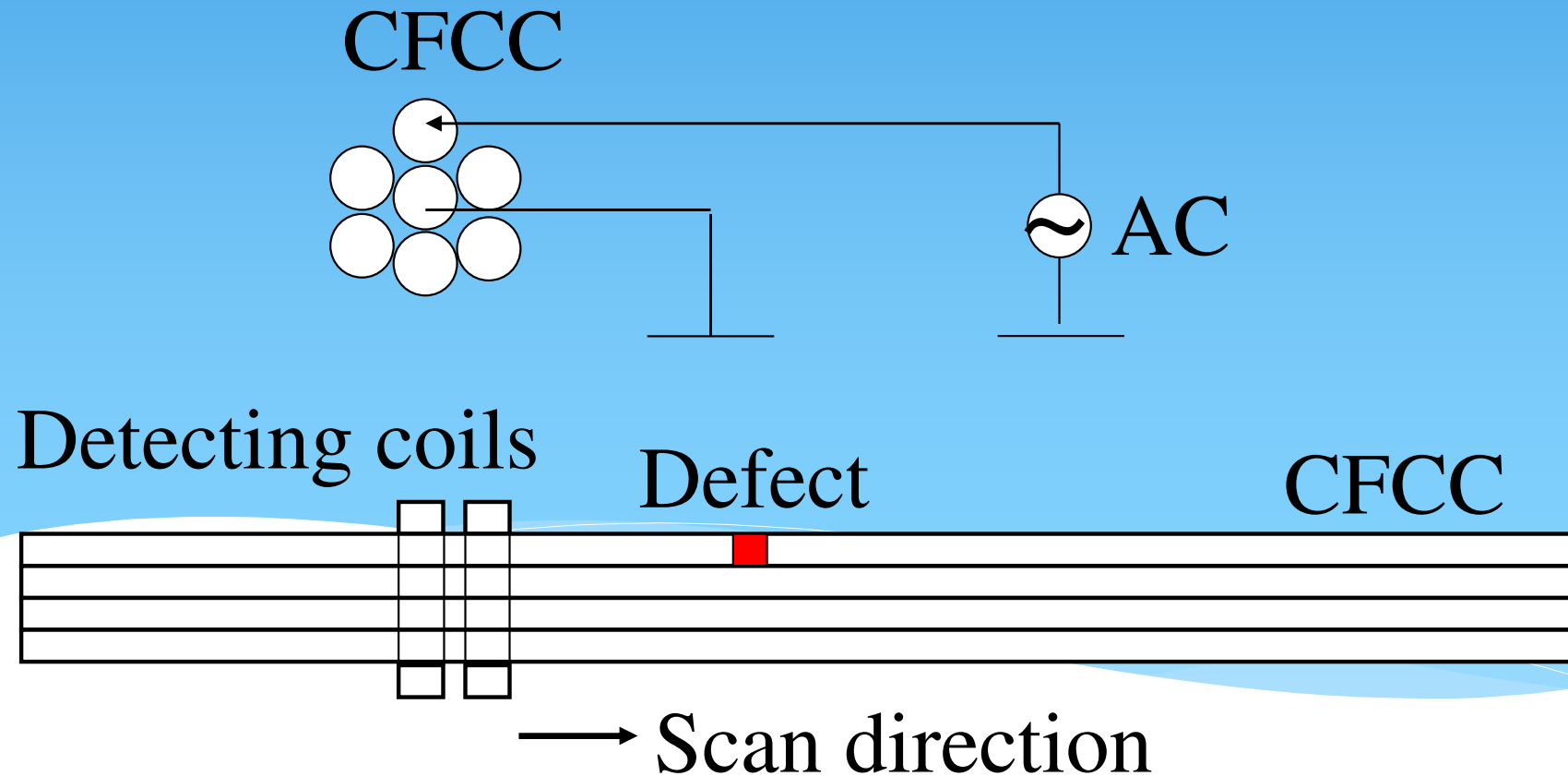
## —差分信号処理—



# 交流電圧印加による方法

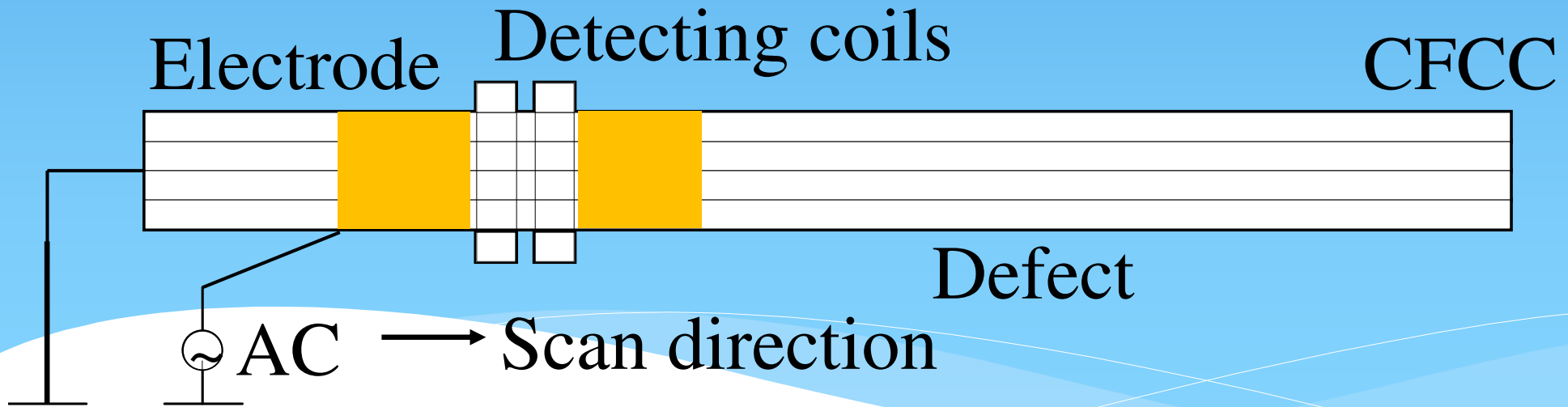
問題点:

- ・各ストランドに電極を設置する必要
- ・施工等の際して煩雑

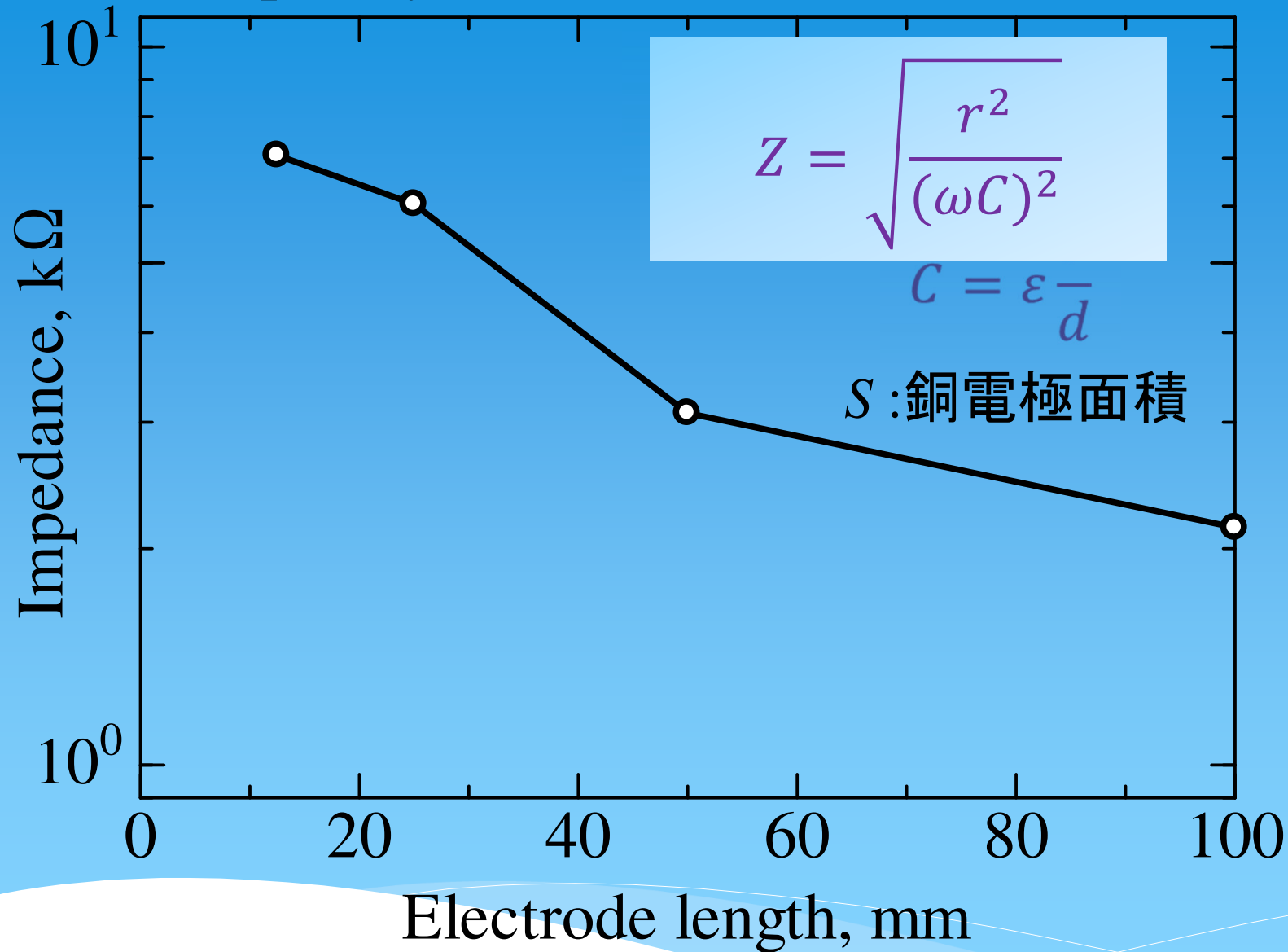


# 静電誘導による方法

- 1本のストランドのみを接地電極
- 円筒状の銅電極をCFCCに外装
- 銅電極とCFCC間の静電容量により誘導電流
- 貫通型差動検出コイルで磁束検出



Frequency 2MHz



銅電極長さに対するインピーダンス変化

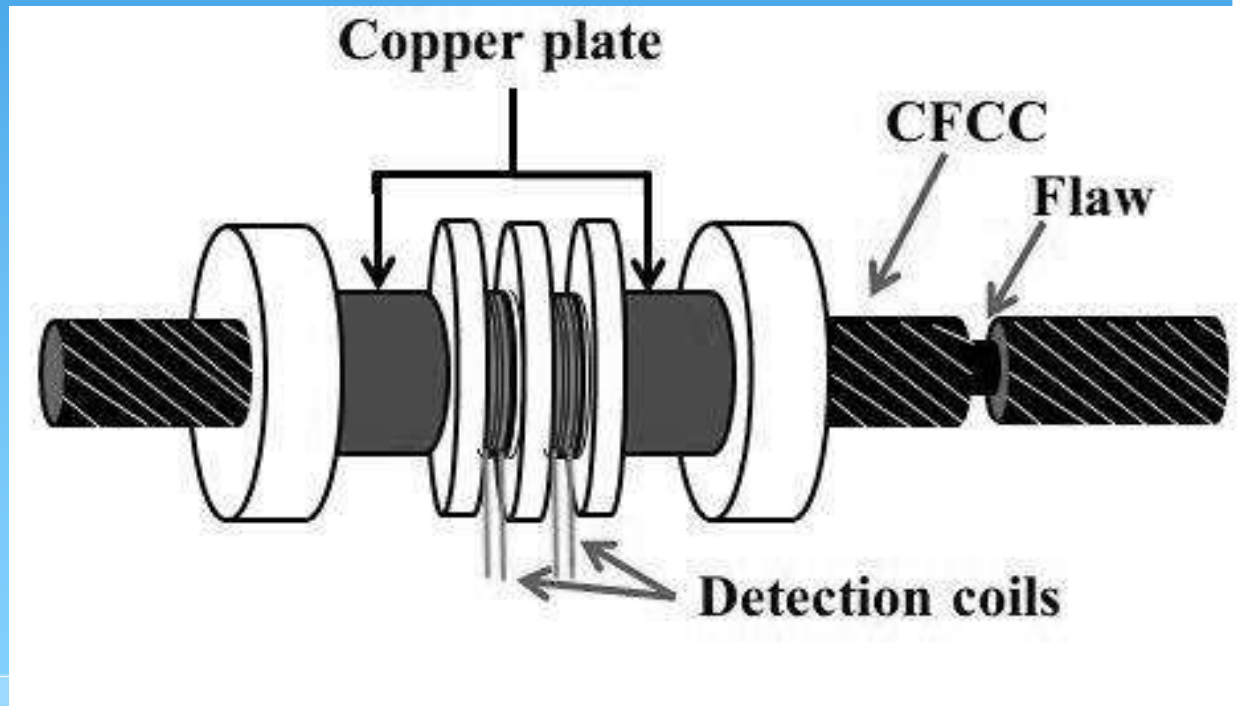
# CFCCの損傷検出実験

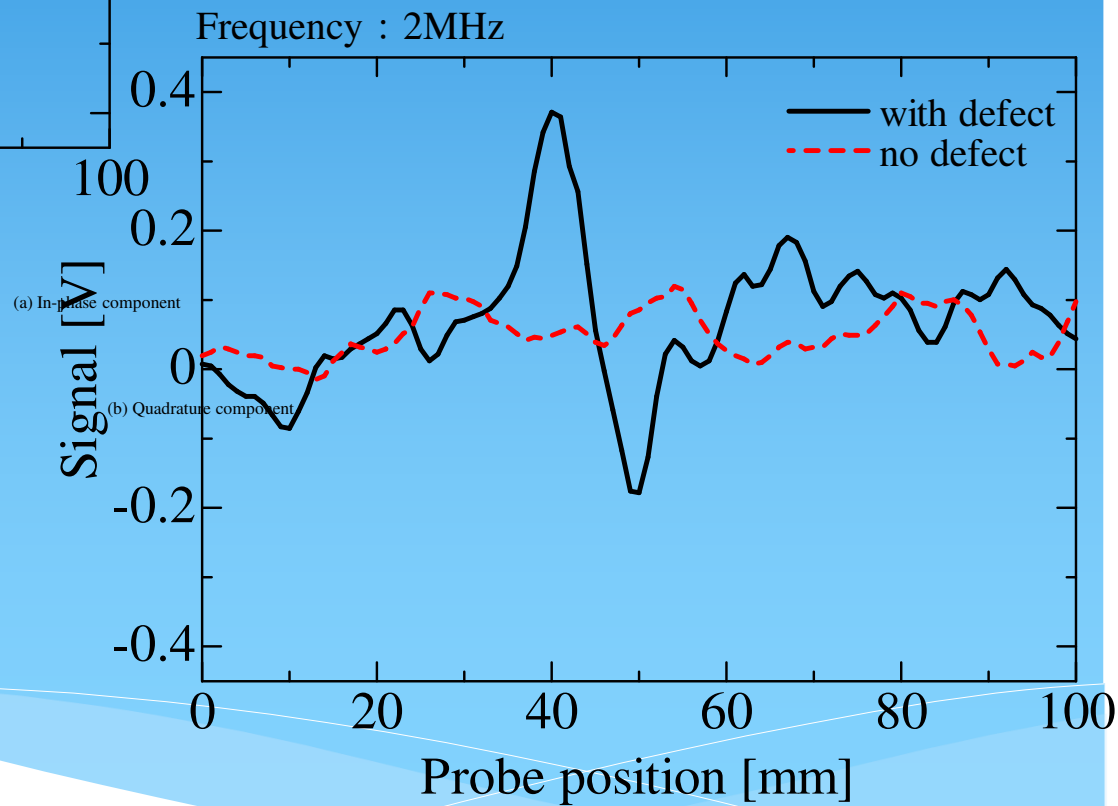
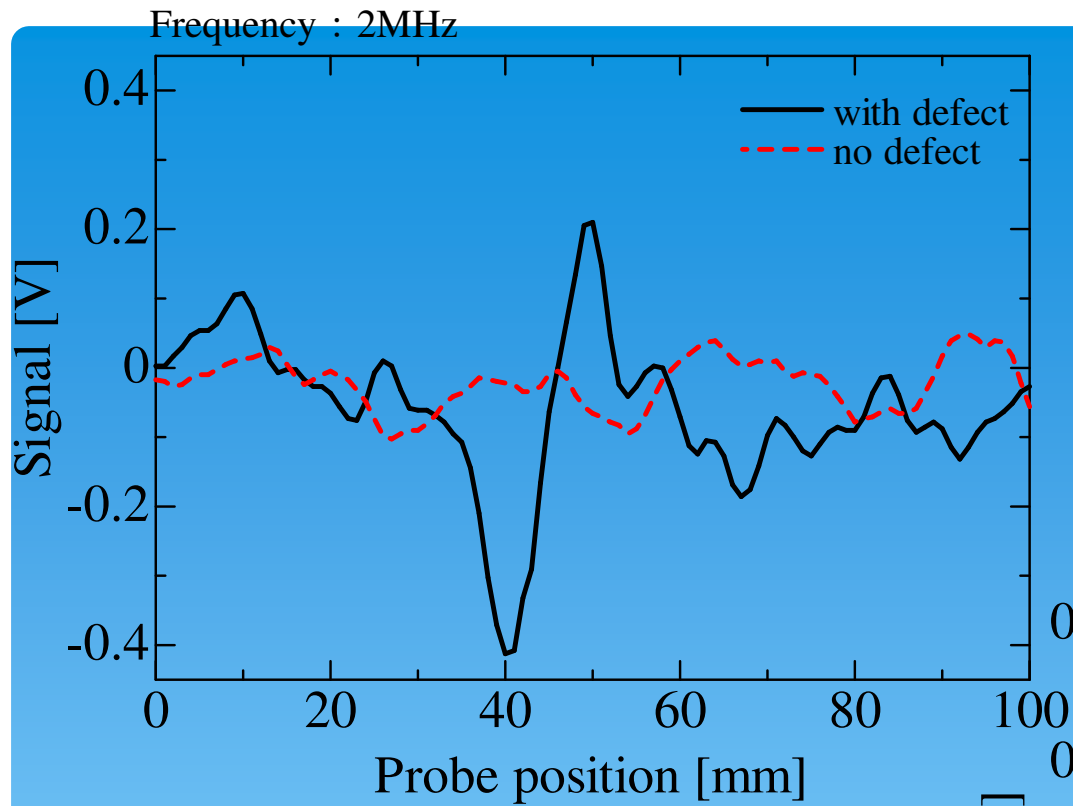
- ・銅電極：外径13mm、長さ12.5～100mm
- ・差動検出コイル：内径13mm、

巻線断面積  $3 \times 3 \text{mm}^2$ 、間隔1mm

- ・試験周波数：  
1～5MHz

- ・CFCC長さ：1.0m





# CFCC損傷の検出信号

# 検査技術の動向

## ECTによる非破壊計測の方向性

# 検査技術の動向

## ECTによる非破壊計測の方向性

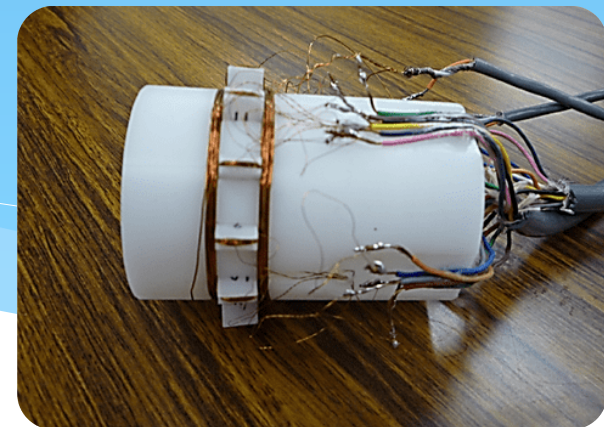
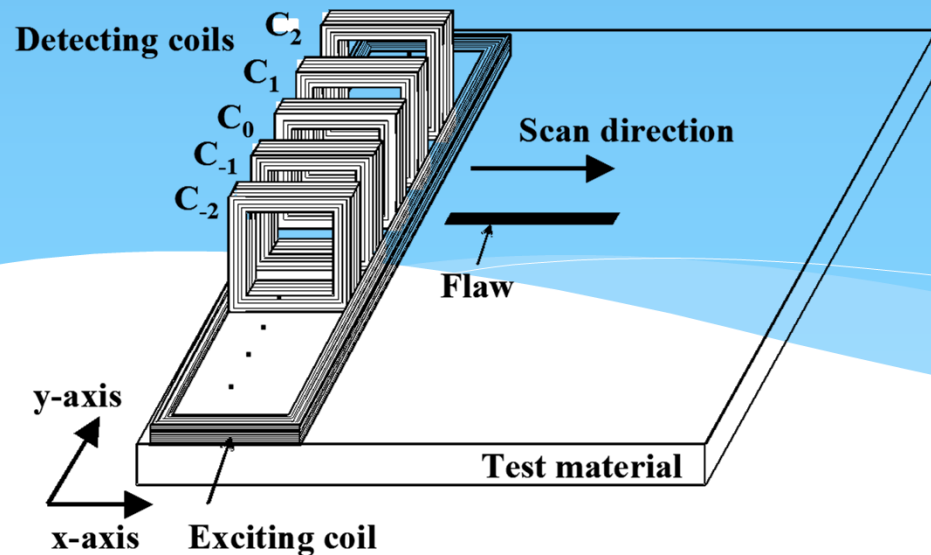
- NDI(Non-Destructive Inspection)

⇒ NDE(Non-Destructive Evaluation)

### • きず検出性能の高いセンサプローブの開発

- 各種用途に応じたプローブの提案

- プローブのマルチ化(検査時間の短縮化)

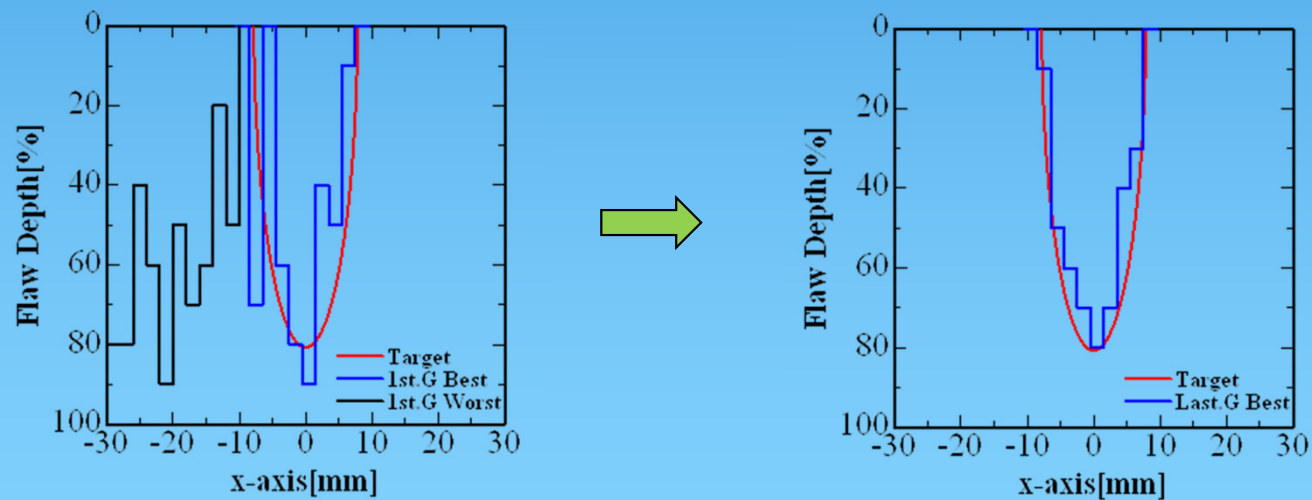


# 検査技術の動向

## ECTによる非破壊計測の方向性

### ・きず評価のための各種信号処理手法

遺伝的アルゴリズム(GA)、  
ニューラルネットワーク(NN)、  
データフュージョン(DF) etc



遺伝的アルゴリズム(GA)によるきず形状推定結果



# 検査技術の動向

## ECTによる非破壊計測の方向性

- ぎず評価のための各種信号処理手法
- 電磁界解析 (FEM, BEM, etc) による逆問題解析
- 磁気光学素子による計測 (画像化)
- 電磁波などを利用した方法

神奈川県工業技術大賞  
未来創出賞 受賞



[第一部]

# 水中ドローン SDQ-101

## 各機能ご紹介

(株) キュー・アイ

技術開発部 主任 豊島 雄樹



本社：神奈川県横浜市金沢区福浦 2 - 4 - 7

# 機体の各部

HDカメラ

大角度のチルト機能  
機体直下の視認が可能

LEDライト

ラインレーザ  
(オプション)

超音波距離センサ  
(オプション)

パイロードスペース  
(マニピュレータ、  
センサ等の搭載可能)

サイドスラスト



# 機体の各部



# 機体の仕様



機体仕様	
質量	約 12kg
稼働時間	約6時間
スラスタ	5基 最大出力 各 350W ブラシレスモータ駆動
カメラ	画素数 200万画素 チルト 下方80° 上方70°
搭載センサ	ジャイロセンサ (3軸) 加速度センサ (3軸) 水深センサ 方位センサ 温度センサ 超音波距離センサ (オプション)
ライト	高輝度白色 LED
耐水圧性能	最大水深 100m
材質	FRP、ABS、ナイロン 耐食アルミニウム



## スクリーニング調査機能

超音波距離センサ（オプション）を搭載することにより水中壁面に正対し、一定距離を保持します。水中壁面の自動スクリーニング調査が可能です。

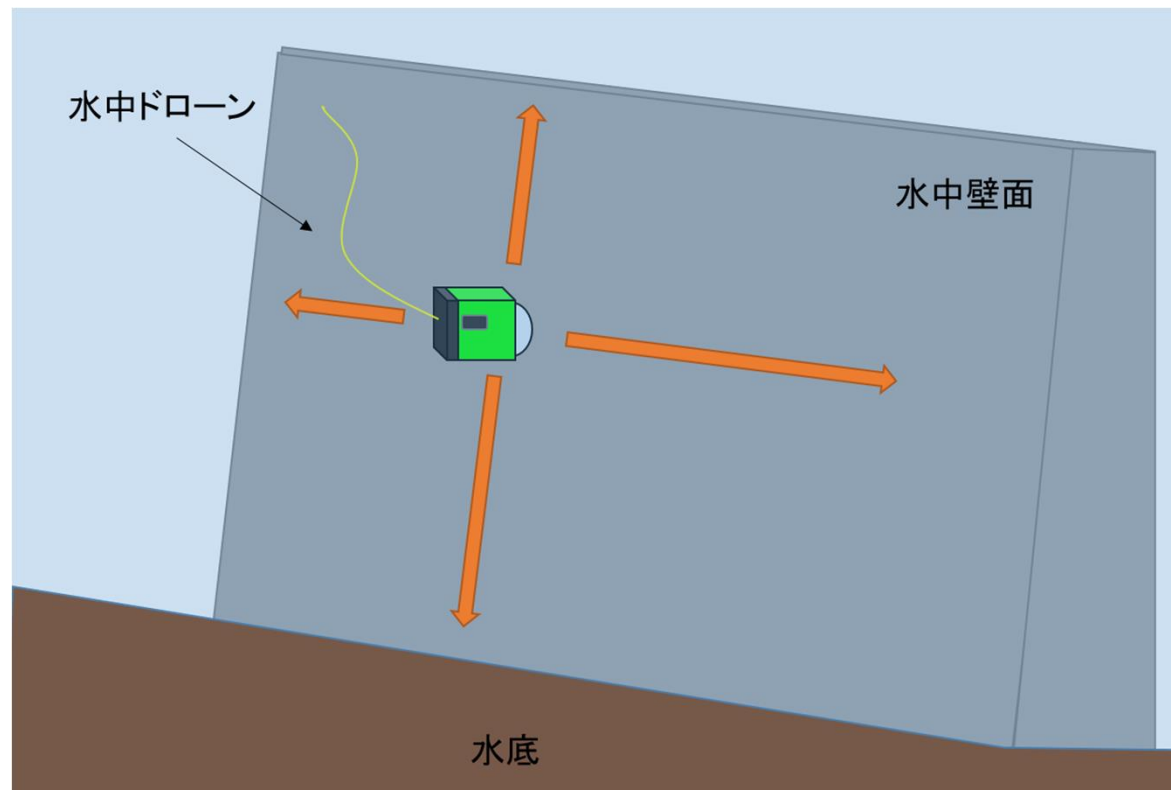
## [機体コンセプト]

- 高機動&イージー操作
- アクティブな姿勢制御
- ロバスト性



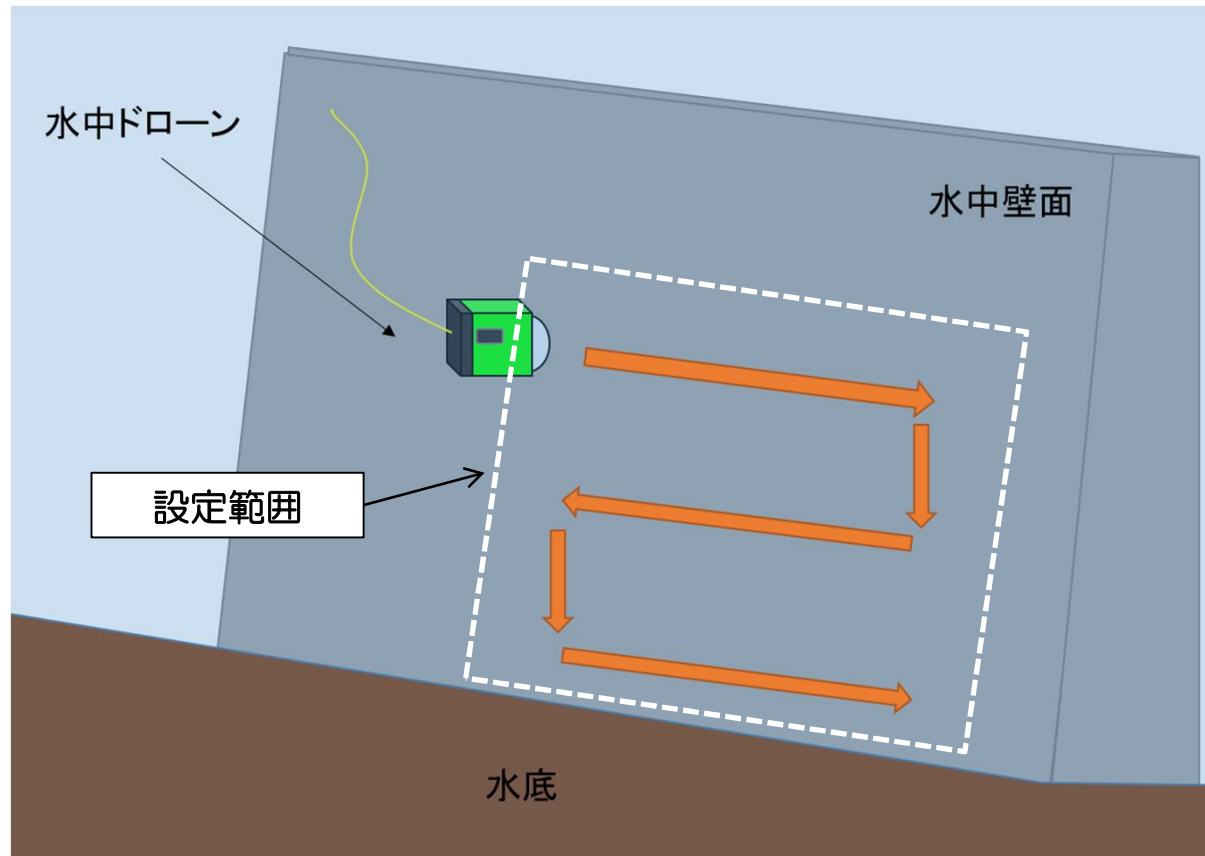
## [一方向スクリーニングモード]

水中ドローンが水中壁面に正対し、設定された一定距離を保ちます。ジョイスティックで指示した方向（上下、左右）へ自動航行を開始、安定した映像撮影が可能です。



# [自動スクリーニングモード]

水中ドローンが事前に設定した範囲を矩形波状に自動航行し、壁面の自動スクリーニング撮影を行います。操作の習熟度に関わらず、どなたでも高品質な映像撮影が可能です。

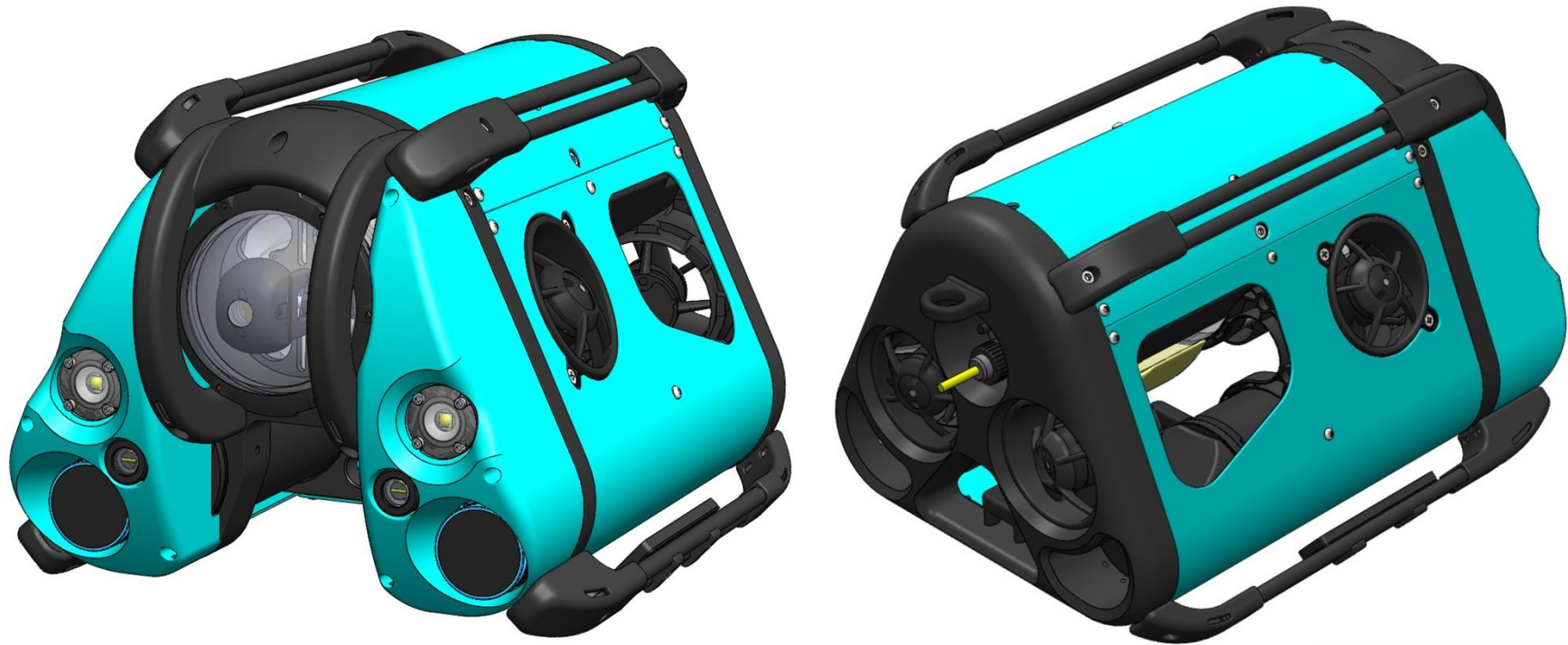




横浜SBIR助成事業

[第二部]

# 水中ドローン SDQ-101の開発



# 開発の概要

## 背景

水中テレビロボット = ROV (Remotely Operated Vehicle) は、1970年代から油田開発、各種水中調査等、産業用途において発展してきた。

弊社は50年の歴史がある日本のROVメーカー。

## 開発の目的

産業用途に耐えうる機動性・堅牢性・長稼働性能を備えたローコスト水中テレビロボット = 水中ドローンを開発し、新たな市場を開拓する。

### 機動性 (Mobility)

操作性が高く、機敏に動くことができ、かつ、安定した航行ができる

### 堅牢性 (Robustness)

突起部が無く水中干渉のリスクが少ない形状、かつ耐衝撃性を有する

### 長稼働性能 (endurance)

積載できる電力量が大きく、省電力で、長時間稼働ができる能力

# 本開発機の特長

## ■ 高機動&イージー操作

5基の独自スラスト配置により、高い機動性能を確保。さらに自在な操作性を併せ持つ。

## ■ アクティブな姿勢制御

ジャイロセンサを搭載し、水平2軸（ピッチ、ロール）、方位、深度4軸の自動制御を最少5基のスラストで達成。（特許申請済み）

## ■ 自動スクリーニング調査機能

超音波距離センサ（オプション）を搭載することにより水中壁面に正対し、一定距離を保持。水中壁面の自動スクリーニング調査が可能。



自動スクリーニング撮影の様子

# 本開発の新規性

## 新規性

・本開発機はバッテリーを内蔵することにより、**陸上側の電源確保の必要が無い**。これは調査を少人数化（最少人員1名）し、**関連コストの大幅な削減**につながる。これまでROVをコスト面から採用できなかった業種に対し、**プロユース水中ドローン**という**安全で効率的な調査手法**を提供できる。



システムの構成

## 優位性

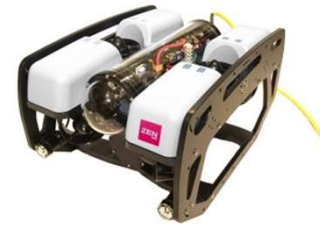
・本機は**コンパクトサイズ**で**堅牢**、かつ**長時間稼働性能**を備えた製品である。  
・**自動スクリーニング調査機能**は、ダムの中水堤体面調査等において**圧倒的な調査効率の向上とコストメリット**を生む。

# 課題と解決手段

## 機動性の確保

### [課題]

- 一般的な構造のROVは、浮力体を最上面に配し、平面で構成することにより高額な浮力材の加工コストを低く抑えている。



しかし、浮上・潜行の際の**水流抵抗は非常に大きく**、水中ドローンにおいては**稼働時間の減少**という大きなデメリットが生じる。

### [解決手段]

• **本機体の上面は流線型を成し、水流抵抗を最小化**する。理想の機体形状を実現するため、**3Dプリンターを用いた浮力体**の開発に挑んだ。**30回を超える試作と耐圧試験の結果、耐水圧構造を持つ浮力部品(\*)**の開発に成功。従来比で**数十分の一という超低コストを実現**した。また成型自由度が高いため、**整流部品としての機能**も合わせ持つ。

\* **浮力整流部品** (←機体内部 7ヶ所に設置)



# 課題と解決手段

## 堅牢性の確保

[課題]

・最も危惧すべき事態は、網・ロープ・水中植物が機体に絡まり、**機体本体が回収不能な状態**に陥ることである。  
そのリスクは機体の回収に専門のダイバーや船の手配等、**膨大な時間と費用の浪費**に繋がる。



※防護性能の高い水中ロボットの例（いずれも高額な機体）

[解決手段]

・**カウリングで機体を覆う**ことにより、**機体の防護性と推進効率が向上**する。機体内部の**スラスト(推進プロペラ)の流路を確保するため吸入・排出を計算**し機体を設計。さらに**流体シミュレーション解析**を実施し、解析結果に基づき**流路を最適化**。  
**堅牢で推進効率に優れた機体(\*)**を実現した。

\* **前進最大速度 2ノット[1.0m/秒]**（←駆動スラスト2基）

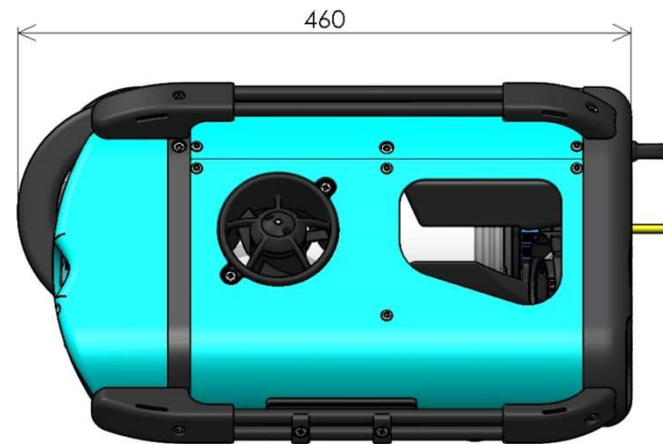
# 課題と解決手段

## 長稼働性能の実現

- **機動性 + 堅牢性の相乗効果**により
  - 機体の推進効率が向上
  - バッテリー2基分の浮力を確保
  - スラスト水流を最適化



**最長6時間の  
超長時間稼働**



同クラス機体と比較し、**2倍の電力量 (約530Wh)** 確保。  
かつ、**機体ボリュームは2/3**のコンパクトサイズ。

# オプション機能の開発

## 水中壁面調査機能の実現

### [課題]

・ダムの中水堤体面をはじめとする、水中壁面調査の要望は多い。  
従来はダイバーによる潜水目視調査に依存していたが、長時間の潜水調査は人命の危険と隣合せの上、高額な費用が発生する。

### [解決手段]

・2016年度～2017年度に実施したNEDO助成事業による次世代インフラ調査ロボットの開発において、以下の水中壁面調査に係わる技術開発を完了している。

- ・超音波センサーを用いた水中壁面との距離計測技術
- ・水中壁面と一定距離を保ち続ける機体制御アルゴリズム
- ・水中壁面に正対し続ける機体制御アルゴリズム
- ・水深、方位を一定に保つ機体制御アルゴリズム

これらの知見を基に開発を実施した。

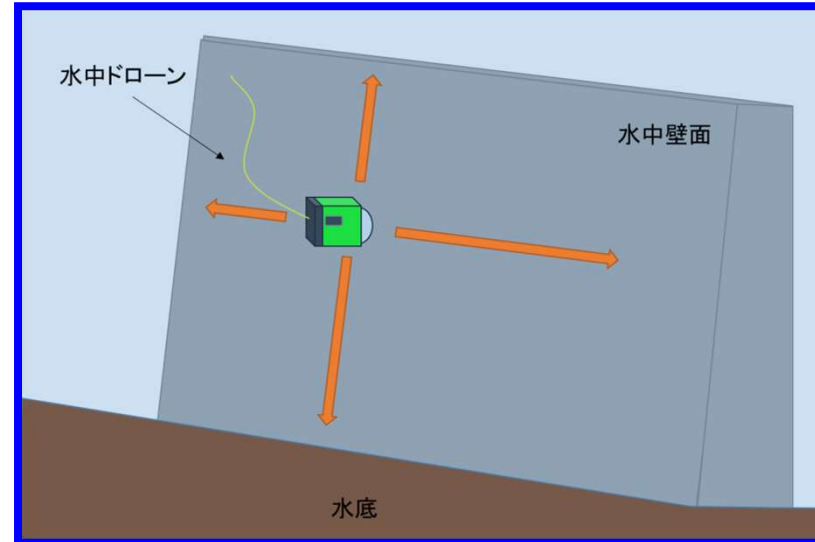


# オプション機能の開発

## 水中壁面調査機能の実現

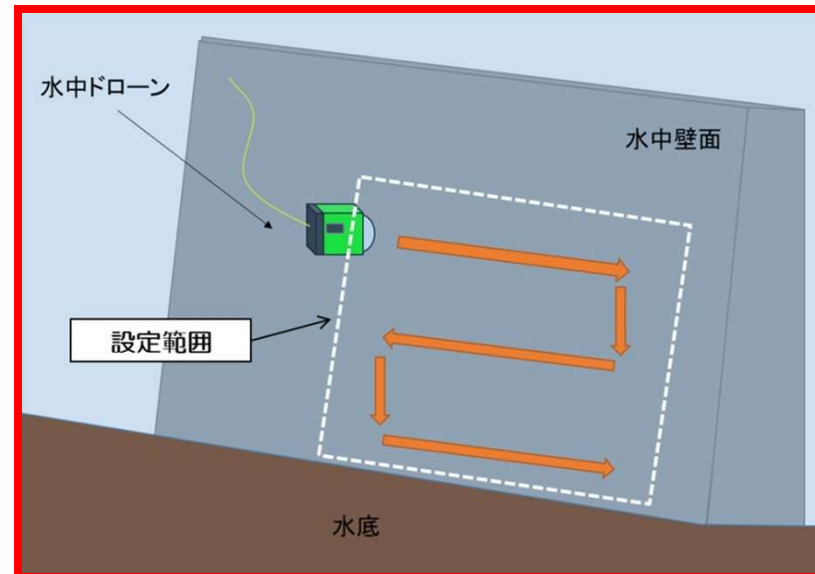
### 一方向スクリーニングモード

機体が水中壁面に正対し、設定された一定距離を保持。コントローラで指示した一方向（上、下、左、右）へ自動航行撮影を行う。常に安定した映像撮影が可能。



### 自動スクリーニングモード

事前に設定した範囲を、矩形波状に自動航行し、設定範囲の全自動スクリーニング撮影を行う。常に高品質な映像取得が可能。



# 社会的効果

## さがみロボット産業特区

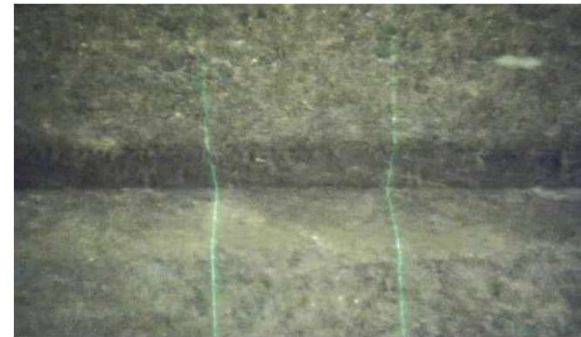
### 重点プロジェクト 実証実験

[日程]2021年12月14日(火)

[場所]城山ダム

- ①水平継目及び垂直継ぎ目の自動撮影
- ②全自動の堤体面スクリーニング撮影

ダムの点検・調査を行う**ロボットの有用性、操縦者の技量によらず、誰でも高品質な映像取得が可能**であることを実証した。



水中映像：ダム堤体面水平継目

## 製品への反響

・上記実証実験を**テレビ神奈川**と**日本テレビ**に取材して頂き、同日、及び翌日の各局ニュース番組内で放送された。

(日テレNEWS【水中ドローン】“ダム点検”の実証実験

<https://www.youtube.com/watch?v=Ez6Pm9b8u-I&list=WL&index=9>)

・各紙の掲載実績

**日刊工業新聞社「TheRobot」、かながわ経済新聞、**

**横浜タウンニュース、広報よこはま**