

千葉県非破壊検査研究会

第34回 研究発表会・特別講演会

講演資料

日時 令和2年2月21日(金)

13:30~17:00

於 プラザ菜の花

# 目次

## 1. 研究発表

- ① 回転一様渦電流プローブによる溶接部の検出と追従機構の開発 ..... 1  
日本大学生産工学部 電気電子工学科 今城拓也
- ② 差動検出渦電流探傷プローブを用いたCFRP板のきず検出に関する研究 ..... 5  
日本大学生産工学部 電気電子工学科 宇野雄輝
- ③ FBGセンサを使用したCFRPのヘルスマモニタリングの検討 ..... 7  
日本大学生産工学部 電気電子工学科 坂本翔平
- ④ ローレンツ力を利用した渦電流試験による鋼材の探傷 ..... 9  
日本大学大学院 生産工学研究科 田村寛治
- ⑤ 屋内設備点検用『特殊球体ドローンELIOS』について ..... 13  
新和商事株式会社 君津営業所 大熊 直人
- ⑥ ドローンを用いた非破壊検査 ..... 18  
新日本非破壊検査(株) 技術開発室 和田秀樹

## 2. 特別講演

- 演 題 : プラスチックの劣化と非破壊検査による評価 ..... 26
- 講 師 : 日本大学生産工学部マネジメント工学科 教授 酒井哲也 氏

## 1. 研究発表

# 回転一様渦電流プローブによる溶接部の検出と追従機構の開発

Detection of welds with a rotating uniform eddy current probe and  
development of tracking mechanism

○今城 拓也、小野寺 大介、宇野 雄輝、坂本 翔平、小山 潔

Takuya IMAJO, Daisuke ONODERA, Yuki UNO, Shohei SAKAMOTO and Kiyoshi KOYAMA

日本大学生産工学部：千葉県習志野市泉町 1-2-1

College of Industrial Technology, Nihon university: 1-2-1 Izumicho Narashino, Chiba

キーワード：渦電流探傷、回転一様渦電流プローブ、溶接部検知

## 1. 緒言

石油備蓄タンクやガスホルダーなどの構造物では、安全性を確保する目的で溶接部に磁気などを利用した非破壊試験法による保守検査が行われている。従来の非破壊試験法による保守検査では検査対象物の表面に施されている防錆のための塗装を剥がしてから検査を行い、検査終了後に再度塗装を施すために検査に手間と時間を要するという問題点がある。そのため、近年では塗装を剥がさずに塗装の上から保守検査を行える方法が望まれている。

本報告では、回転一様渦電流プローブ<sup>(1)</sup>を用いた溶接部の基礎的な検知実験の結果と溶接部追従実験の結果について報告する。

## 2. 回転一様渦電流プローブによる溶接線検出

### 2.1 回転一様渦電流プローブの構造

回転一様渦電流プローブは、Fig.1 に示すように矩形に巻いた縦置きのコイルを十字に組み合わせた2つの励磁コイルとその中心下に配置したパンケーキ状の円形の検出コイルから構成される。

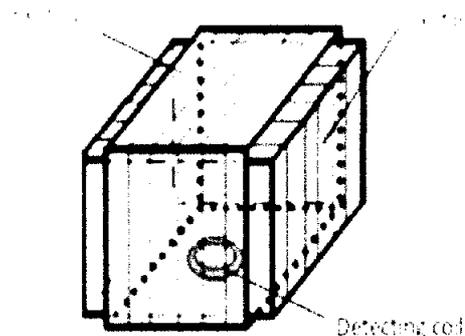


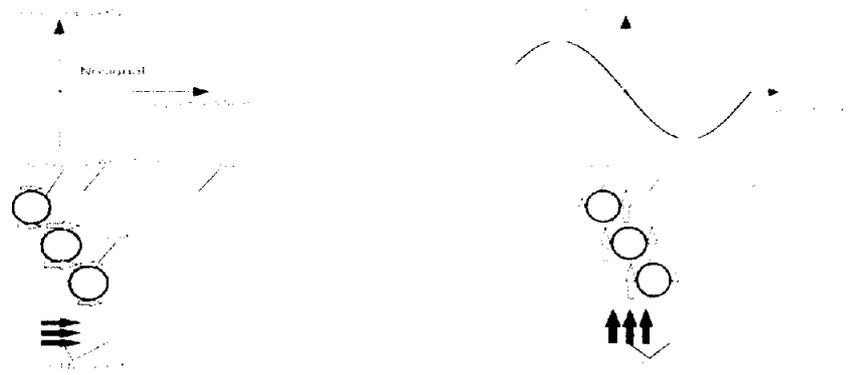
Fig.1 回転一様渦電流プローブの構造

### 2.2 溶接線の位置検知

回転一様渦電流プローブでは2つの励磁コイルに互いに90度位相の異なる交流電流を流すと回転磁界が発生し、導体内には回転渦電流が誘導される。誘導される回転渦電流を溶接線に垂直な成分と平行な成分に分けて考える。Fig.2(a)に示すように溶接線に回転渦電流が垂直な場合には、円形コイルの中心を通り溶接線に垂直な軸に対して左右で渦電流が対称であり、検出コイルの起電力を互いに打ち消し合うのでプローブの位置にかかわらず検出コイルに起電力は発生しない。

一方、Fig.2(b)に示すように溶接線に回転渦電流が平行な場合にはプローブが溶接線の端部に位置すると、円形コイルの中心を通り溶接線に平行な軸に対して左右で渦電流が異なるので起電力が発生し、溶接線に対するプローブの位置に対応した正負の符号が異なる信号を得ることができる。

また、プローブが溶接部の中央に位置すると、円形の検出コイルの中心を通り溶接線に平行な軸に対して左右で渦電流が対称となるため起電力は発生せず、信号値は零値を示す。この信号の振幅と極性に基づいて、溶接線追従機構を制御して溶接線の追従を行う。



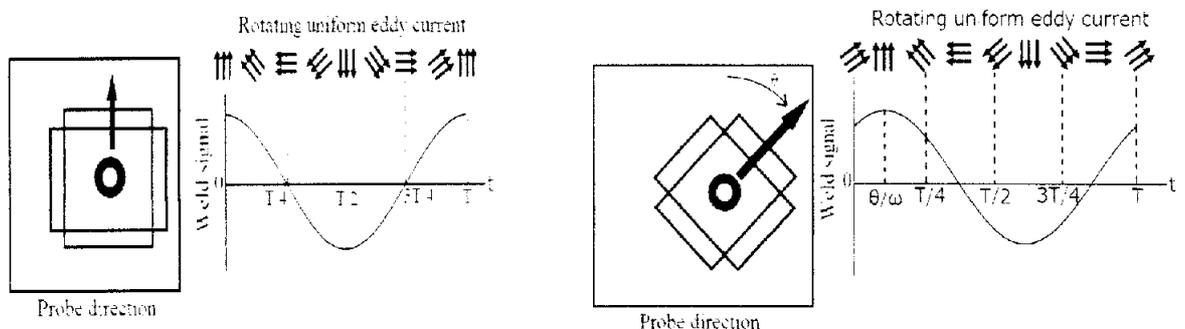
(a) 渦電流と溶接線が垂直の場合 (b) 渦電流と溶接線が平行の場合

Fig.2 溶接線と渦電流の関係

### 2.3 溶接線の方向検知

溶接線の位置検知の原理より回転渦電流の向きが溶接線と平行な場合に Fig.3(a)に示すように  $t=0$  で溶接線の信号を得る。

一方、Fig.3(b)に示すようにプローブが溶接線に対して角度  $\theta$  だけ傾いた場合、溶接線とプローブが平行な場合と比べて  $t=\theta/\omega$  で溶接線の信号を得るため、信号の位相が  $\theta/\omega$  分遅れることになる。以上より、信号の位相角から溶接線に対するプローブの方向もしくはプローブに対する溶接線の方向を検知することができる。



(a) プローブが溶接線に対して平行の場合 (b) プローブが溶接線に対して  $\theta$  傾いた場合

Fig.3 プローブの傾きと信号位相

## 3. 実験方法

### 3.1 実験条件

使用した回転一様渦電流プローブの励磁コイルは、幅 30mm、長さ 30mm、交差面積  $900\text{mm}^2$ 、単層巻きで、検出コイルは外径 6 mm、巻線断面積  $0.1 \times 0.1\text{mm}^2$ 、厚み 1mm、巻き数 100 回である。試験体には、中央に幅約 10mm で溶接された一辺の長さが約 160mm、厚み 5 mm の鋼板で、溶接部の余盛りは研磨したものをを用いた。回転一様渦電流プローブに印加する交流電流は振幅 3V、周波数 10kHz、位相差  $90^\circ$  の正弦波を印加した。プローブと溶接線が直交する形で走査を行った。

### 3.2 溶接線追従実験

Fig.4 に溶接線追従機構を示す。溶接線追従機構は 1 辺が 400mm のアルミ板にモータドライバと

ステッピングモータを取り付け、機構の前輪は  $\Phi 80\text{mm}$ 、厚み  $20\text{mm}$ 、後輪には  $\Phi 60\text{mm}$ 、厚み  $20\text{mm}$  の車輪を使用した。また機構に搭載したモータドライバやステッピングモータの重量で機体に変形しないようアルミ板に上部側に  $40\text{mm}$ 、下部側に  $20\text{mm}$  のステンレス L 字金具を取り付けた。プローブ取り付けのため機体の進行方向側に一辺が  $55\text{mm}$  の正方形にアルミ板をくり抜いた。溶接線検知実験の結果を基に溶接線追従機構のモータの駆動制御を行った。定格 DC  $1.43\text{V}$  のステッピングモータを使用し、モータドライバは電源電圧  $100\text{V}$  入力信号電圧 DC  $5\text{V}$  のものを使用した。追従のプログラムのフローチャートを Fig.5 に示す。最初の分岐で信号値の振幅から溶接線に対するプローブの位置、2つ目の分岐では信号の位相角から溶接線に対するプローブの角度を判定する。3つ目と4つ目の分岐では信号の進相成分の正負の判定を行い、正であれば右に曲がり、負であれば左に曲がるようにモータに信号を出力する。追従範囲で以上の処理が繰り返し行われる。



Fig.4 溶接線追従機構

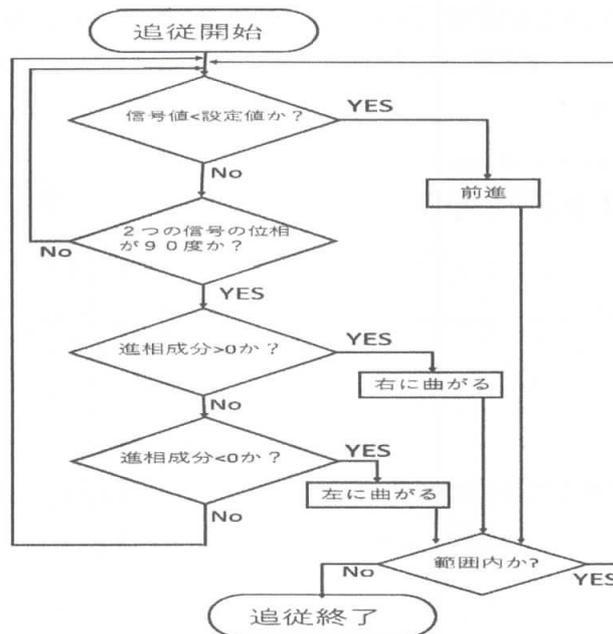


Fig.5 追従プログラムのフローチャート

#### 4.実験結果

##### 4.1 溶接線検知実験

溶接線に対してプローブを垂直方向へ走査させたときの検出コイルの信号値を Fig.6 及び Fig.7 に示す。

Fig.6 は溶接線に対するプローブの位置とプローブの起電力を示すもので、横軸はプローブ位置、縦軸は起電力の大きさである。プローブの角度を問わずプローブ位置が 0 付近で同相成分と進相成

分の正負の反転が発生した。また、プローブが溶接線に対し傾くことによって同相成分と進相成分の電圧の大きさが変化した。

Fig.7は横軸に検出コイルの同相成分、縦軸に進相成分をとり、信号のパターンを示す。Fig.7を見ると同相成分と進相成分がともに0の値をとる位置でプローブの信号が重なっている。また、縦軸を基準にプローブ方向が0度の場合には信号の位相角は90度、プローブ方向が45度の時には45度といったように信号の位相角とプローブの向きが対応している。

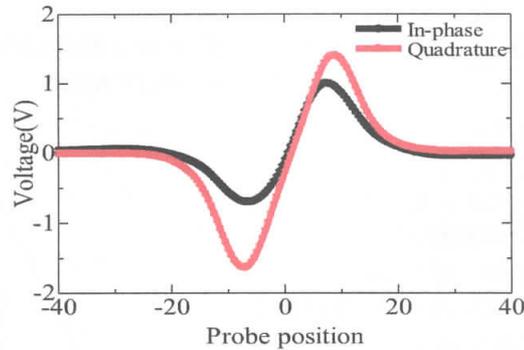


Fig.6 プローブの検出信号 (位置検知)

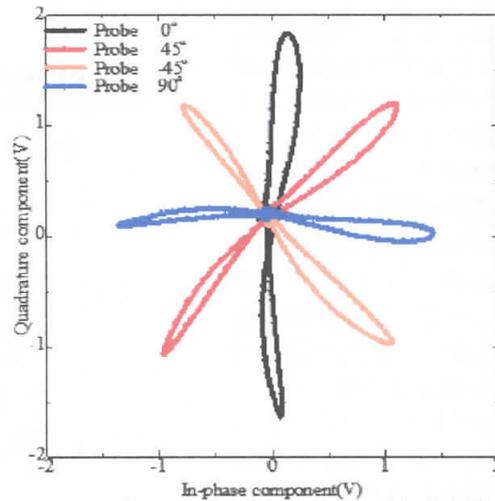


Fig.7 プローブの検出信号 (方向検知)

## 4.2 溶接線検知実験

4.1の結果を元に追従実験を行い、溶接線に対するプローブの位置によって溶接線追従装置がプログラムの処理に従って動く結果を得ることができた。

## 5. 結言

回転一様渦電流プローブによる溶接部検知の基礎的検討と追従機構の開発を行った。その結果、検知信号の大きさと極性および信号の位相角から信号値が常に零値を取るように溶接線追従装置の制御を行えば溶接線の追従は可能であることが分かった。

今後の課題としてプローブの検出コイルの大きさの検討も考えている。今回の研究では、検出コイルは溶接線の幅より小さいものを使用した。検出コイルの大きさを変化させて、より精度の高い検出が可能か検討する予定である。

## 参考文献

- (1) 小山潔・星川洋・成瀬讓：「電磁誘導を利用した塗装上かからの溶接線の検知」電学論 A, 124 巻, 9号 P797-802 (2004)

# 差動検出渦電流探傷プローブを用いた CFRP 板のきず検出に関する研究

Study on flaw detection of CFRP board using differential detection eddy current probe

日本大学院 生産工学研究科 電気電子工学専攻 ○宇野 雄輝、小野寺 大介  
今城 拓也、坂本翔平、小山 潔

Yuki Uno, Daisuke ONODERA, Takuya IMAJO, Shohei Sakamoto  
And Kiyoshi KOYAMA

## 1. はじめに

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic、以下CFRP)とは、炭素繊維を強化材とした複合材の一種で剛性に優れ、軽量かつ高強度であり、錆びないという特徴を持つ。そのためゴルフクラブのシャフト、釣り竿、航空機、自動車、建築構造物や耐震補強材など幅広い分野に適用されている。しかしながら、CFRPは強い衝撃を受けると、樹脂割れ、層間剥離、繊維破断などによって力学的強度が低下する問題がある。そのため非破壊検査によりきずを検出する品質管理が必要である。

現在CFRPに対して使用されている非破壊検査法は超音波探傷法や放射線透過法などが用いられている。しかし、検査に長時間かかることや大掛かりな装置が必要であり、コストがかかるという問題がある。一方、渦電流探傷法を適用することにより、高速かつ簡便に検査できるため検査効率の向上が期待できる。

そこで、直交積層CFRPに対して新たに、差動検出渦電流探傷プローブを用いたきず検出の検討を行った。きずの深さの異なる4種類の人工きずに対する検出結果と従来のプラスプローブとの比較、検討について報告する。

## 2. 構造図及び原理

CFRPは導電性をもつため、電磁誘導現象を利用する渦電流探傷法が適用できる。円形横置ききの励磁コイルと矩形縦置ききの検出コイルから構成される $\Theta$ プローブによれば織物CFRPに対してはSN比が高くきず検出ができることを確認している。しかし、直交積層CFRPに対しては雑音が大きいため、SN比が低い問題がある。そこで直交積層のCFRPに対して、雑音を低下させるため差動検出プローブを提案する。差動検出プローブの構造図をFig.1に示す。このプローブは円形横置ききの励磁コイルと2つの縦置き検出コイルから構成される。この検出コイルは互いに逆巻きにして、差動検出をしている。

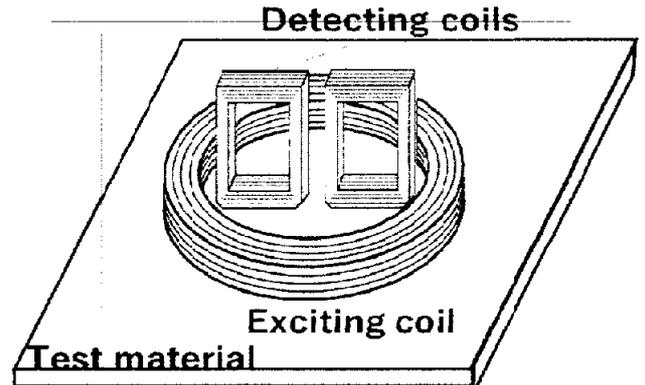
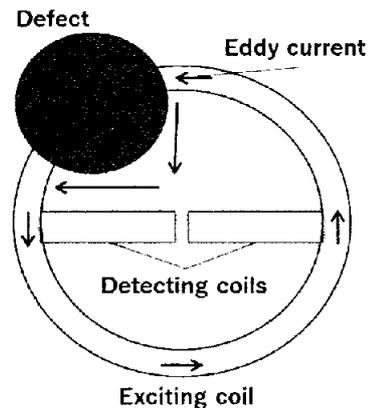
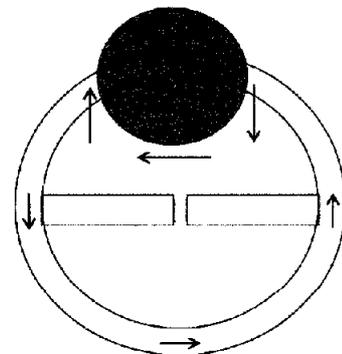


Fig.1 差動検出プローブの構造図



(a) きずが検出コイルの片側に位置する場合



(b) きずが2つの検出コイルの中央に位置する場合

Fig.2 差動検出プローブの探傷原理

Fig.2に試験体が直交積層の場合における差動検出プローブの探傷原理を示す。直交積層CFRPは一方向の繊維シートが90°ごとに積層されている。励磁コイルは巻線方向に渦電流を誘導し、検出コイルは渦電流によって発生する磁束の変化を信号として検出する。きずがない場合、検出コイルの巻線方向に対し、繊維方向が90°のとき、渦電流は検出コイルに対して垂直方向に流れるため検出コイルに信号は発生しない。検出コイルの巻線方向に対し、繊維方向が0°のとき、渦電流は検出コイルに対して平行に流れるが、検出コイルが差動をとっているため、それぞれ逆の起電力が発生し、打ち消しあう。そのため信号は発生しない。

きずがある場合、Fig.2(a)のきずが検出コイルの片側に位置する場合、渦電流はこれを避けるように誘導され磁束が検出コイルを鎖交し、起電力を誘起し信号を得る。反対側の検出コイルにおいても同様の原理を得る。次にFig.2(b)のきずが2つの検出コイルの中央にある場合、差動をとっているため、逆向きの起電力が発生するため、打ち消し合い、信号は発生しない。よって検出結果としては、きずの四隅で信号が最も大きくなる。

### 3. 実験方法

作製した差動検出プローブの円形横置き励磁コイルの寸法は、内径7mm、外径9mm、高さ1mm、巻数を35とした。2つの矩形縦置き検出コイルの寸法は長さを3.5mm、高さを9mm、巻線断面積を1×1 mm<sup>2</sup>、巻数を50とした。CFRP試験体は、一方向繊維シートを90°ごと交互に積層させた直交積層CFRPを使用した。試験体の寸法は160×160 mm<sup>2</sup>で板厚は3mmである。外径7mmの平底穴できずの深さを100%、75%、50%、25%の4つを人工きずとした。

プローブを試験体の中心からXY軸方向ともに±50mmの範囲を0.5mm間隔で二次元走査させた。

### 4. 実験結果

Fig.3は100%～25%まできずの位置を明瞭に検出できる結果となった。しかし若干の雑音は発生していることが分かる。Fig.4では各きずの深さに対して縦軸に虚数電圧、横軸に実数電圧をとった信号パターンである。きずの深さの変化に応じて振幅も変化していることがわかる。

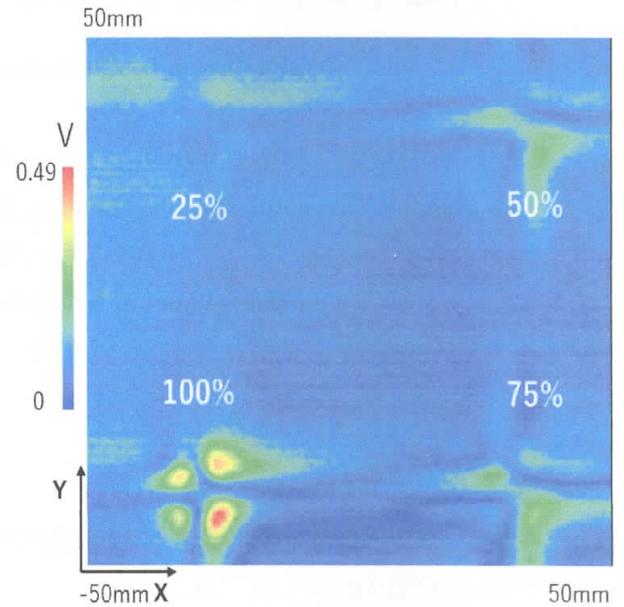


Fig.3 きず信号振幅の擬似カラー画像表示

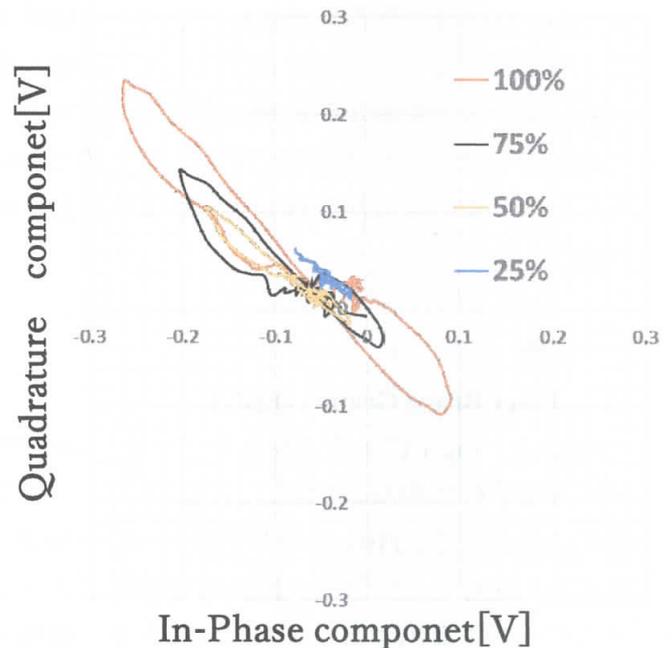


Fig.4 きずの深さが異なる信号パターン

### 5. まとめ

直交積層CFRPに対して差動検出渦電流探傷プローブを用いたきず検出の検討を行った。結果として、差動検出プローブはきずを明瞭に検出でき、従来のプラスプローブよりもSN比の向上に成功した。また雑音は2つの検出コイルの起電力差によって生じたものと考えられる。

今後は $\Theta$ プローブを基盤に励磁コイルの寸法の変更、実損傷における探傷や新たなプローブの開発による検出精度の向上を目指していく。

# FBG センサを使用した CFRP のヘルスマモニタリングの検討

Investigation of health monitoring of CFRP using FBG sensor

○坂本 翔平、小野寺 大介、今城 拓也、宇野 雄輝、小山 潔  
Shohei Sakamoto, Daisuke Onodera, Takuya Imajo, Yuki Uno, Kiyoshi Koyama

日本大学大学院生産工学研究科

Graduate School of Industrial Technology, Nihon University

キーワード：ヘルスマモニタリング、FBG、CFRP、ニューラルネットワーク

## 1. 緒言

近年、航空機や建造物等の構造物に炭素繊維を強化材とした軽量かつ高強度である炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が多く使用されている。このような大型な構造物を、適切に保全していくには一定周期の点検が必要であり、検査時に正常であっても次の検査までに安全である保証がない。そのため、点検後に異常が発生しても次の点検時までに事故などのリスクが高くなってしまう。そこで常時監視するモニタリングシステム<sup>(1)</sup>を導入することで異常が発生しても即急に対処することによってリスクを最小限に抑えることが不可欠である。

本研究では、光ファイバセンシング技術である FBG 方式のセンサを用いて CFRP 板に荷重を加えたときのひずみの計測を行い、機械学習であるニューラルネットワークを用いて荷重位置の評価を行った。

## 2. 原理

### 2.1 Fiber Bragg Grating (FBG)

FBG は、Fig.1 に示すように光ファイバのコアに屈折率変調(回折格子)を設けたものである。この回折格子の周期 $\Lambda$ に合致した波長(ブラッグ波長: $\lambda_B$ )の光のみが反射し、それ以外の波長は反射せず通過する。FBG に応力等が加わると光ファイバを伸縮すると共に、回折格子の間隔も変化するので、反射するブラッグ波長も比例するようにシフトする。よってブラッグ波長を計測することでひずみ等を算出することが可能である。長所として従来のひずみゲージと比較すると、電磁気の影響を受けないことや、一つの光ファイバに多数の FBG センサを設置することが可能であり計測装置の単純化、光ファイバを使用するため光信号がほとんど減衰しないので長距離からでも計測できることがあげられる。

### 2.2 ニューラルネットワーク

機械学習の代表的な技法であるニューラルネットワークは、人間の神経回路網を数理モデル化した人工ニューロンであり主に入力層と中間層と出力層から構成され、層と層の間はつながりの強さを示す重み( $w$ )がある。本研究では、Fig.2 で示す様に順伝播型ニューラルネットワークを使って評価した。順伝播型ニューラルネットワークは、入力層→中間層→出力層へというように単一方向へしか信号が伝播しない構造である。

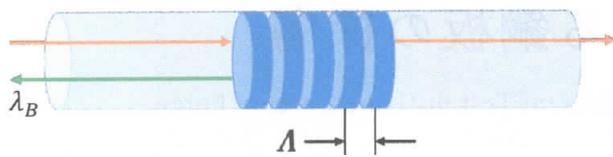


Fig.1 FBG

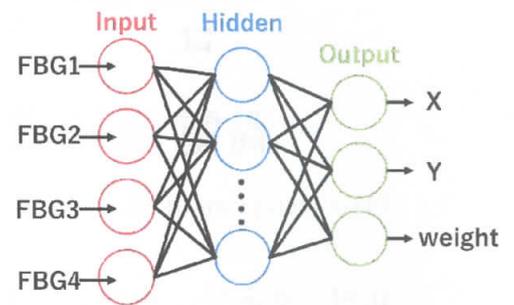


Fig.2 Feedforward neural network

### 3. 実験方法

Fig.3は直交積層CFRP板(160mm×160mm×1.9mm)にFBGが設けられた光ファイバを格子状になるように設置した。荷重を4000gまでY軸方向に加えた。また、FBGセンサで計測したひずみを順伝播型ニューラルネットワークに学習させて、荷重位置と荷重量の評価を行う。

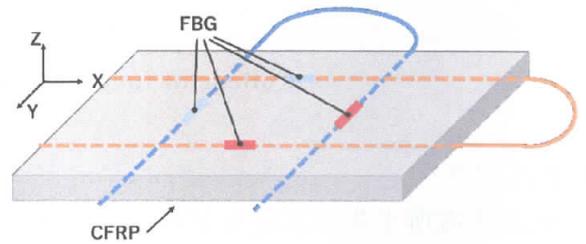


Fig.3 Sensor installation location

### 4. 実験結果及び考察

Fig.4は、順伝播型ニューラルネットワークによる荷重とその位置の評価結果で、四つのFBGセンサ内を示した散布図であり、右のカラーバーは4000gで正規化した数値である。荷重が大きいほど荷重位置である赤点(正方形)に近づいていることがわかる。これは荷重が大きくなるほど、各FBGセンサの変化量が大きく変動するため、ニューラルネットワークで識別するのが容易であるためであると考えている。

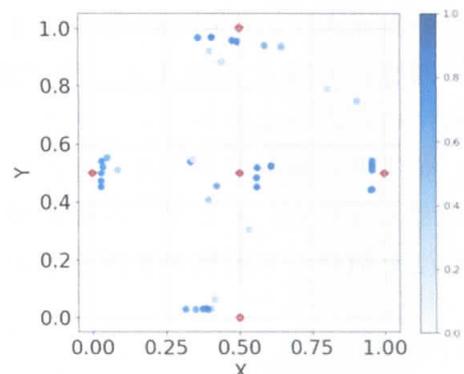


Fig.4 Output value

### 5. まとめ

本研究では、CFRPにFBGセンサを設置して、荷重試験を行い、その計測データからニューラルネットワークを使った荷重とその位置を推定した。この結果、順伝播型ニューラルネットワークで荷重と位置を推定することがわかった。

今後の課題としては、ニューラルネットワークにおける推定精度を高めていくと共に、衝撃を加えた場合である動的試験でのFBGセンサを適用できるか検討していく。

### 参考文献

- (1) Cristina Barbosa、林垣内知：構造ヘルスマモニタリングにおけるFBG型光ファイバセンシング技術の利用

# ローレンツ力を利用した 渦電流試験による鋼板の探傷

Flaw Detection of Steel Plate by Eddy Current Test utilizing Lorentz Force

○田村 寛治\*<sup>1</sup> 小井戸 純司\*<sup>2</sup> 日比野 俊\*<sup>3</sup> 加藤 修平\*<sup>2</sup>  
Kanji Tamura Junji Koido Takashi Hibino Shuhei Kato

\*<sup>1</sup> 日本大学大学院生産工学研究科

\*<sup>2</sup> 日本大学生産工学部電気電子工学科

\*<sup>3</sup> 日本大学生産工学部研究員

College of Industrial Technology, Nihon University

## 1. まえがき

火力発電所や化学工業などのプラントでは保全活動の一環として、構造物や設備に対する非破壊試験が行われる。非破壊試験は短時間に実施したいために、前処理や後処理が簡単で試験が容易な ECT（渦電流試験）を用いたいという要望が多くある。しかし、一般に構造物には鋼材が広く用いられているので、非破壊試験の対象物は鋼材が多い。鋼材は強磁性材料であるので、これに ECT を適用すると表皮効果が強く働き、ECT による深いきずや裏面きずの探傷は困難である。

一方、鋼材に ECT を適用すると局所的な磁気特性の差異により磁気ノイズが発生するため、鋼材に直流磁化をかけることにより磁気ノイズを抑制することが行われている。ところが、導体中の渦電流に外部磁界が与えられるとローレンツ力が働き、渦電流分布が変化すると考えられる。そこで、本研究ではローレンツ力が渦電流試験に与える影響を検討し、渦電流を制御して鋼板の裏面きずの探傷を探傷することを試みた。

## 2 原理

Fig.1 にローレンツ力の原理と本研究に用いたタンジェンシャルコイルを示す。荷電粒子が磁束密度中を運動すると力を受ける。これをローレンツ力という。式(1)に示すように、ローレンツ力による力  $f$  は渦電流  $J$  と磁束密度  $B$  の積で求まる<sup>1)</sup>。そして、その大きさは式(2)に示すとおりである。

$$f = J \times B \quad (1)$$

$$|f| = |J \times B| = JB \sin \theta \quad (2)$$

ここで  $\theta$  は磁束密度  $B$  と渦電流  $J$  のなす角度である。式(2)より、渦電流に作用するローレンツ力は角度  $\theta$  が  $\pi/2$  rad のときに最も影響が強いと考えられる。

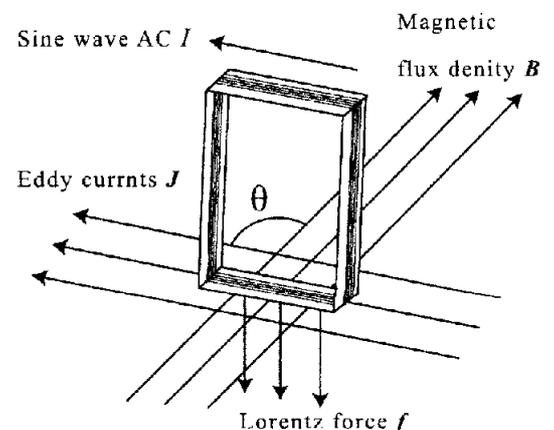


Fig.1 Lorentz force acting on eddy current

### 3. ECTに対するローレンツ力の影響の検討

#### 3.1 実験方法

試験体として200mm×200mm×6mmの鋼板(鋼板:SS400)を用いた。試験コイルのタンジェンシャルコイルは、巻線径0.2mm、巻数92回のもを使用した。Fig.2に実験装置を示す。

試験体にタンジェンシャルコイルと直流磁化器を上置した。まず、磁化のない状態で渦電流と磁束密度の角度を0~ $\pi$  radの範囲で $\pi/12$ ずつ変化させながら、試験周波数を4 kHz、10 kHz、40 kHzと変化させた。そして、インピーダンスメーターによってタンジェンシャルコイルのインピーダンスを測定した。次に、直流磁化器の磁化電流 $I_{DC}$ を0.5 Aずつ2.0 Aまで変化させて同様の角度、周波数でインピーダンスを測定した<sup>2)</sup>。

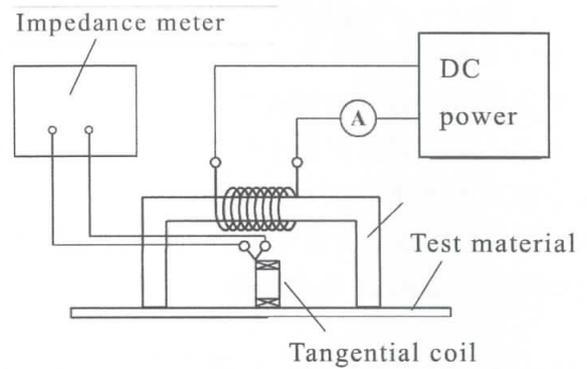


Fig.2 Experimental equipment

#### 3.2 実験結果および検討

Fig.3は、試験体を磁化していないときと2Aで磁化したときの角度変化に対する正規化インピーダンスの変化を、試験周波数4kHzから40kHzまでをグラフにしたものである。この図より、試験周波数を高くするとリアクタンスが低下することが確認できた。これは、試験コイルには、交流電流を流しているの周波数を高くすると渦電流の発生が活発になり、反発磁界が大きくなりインダクタンスが減少するためである。

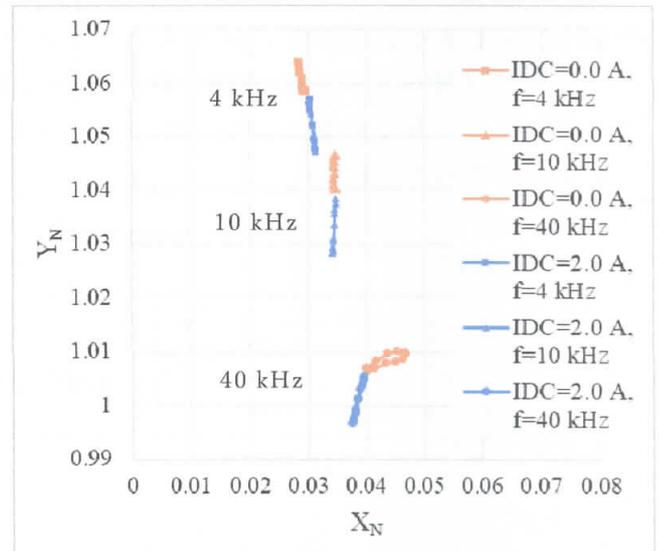


Fig.3 Changes of impedance with angle change

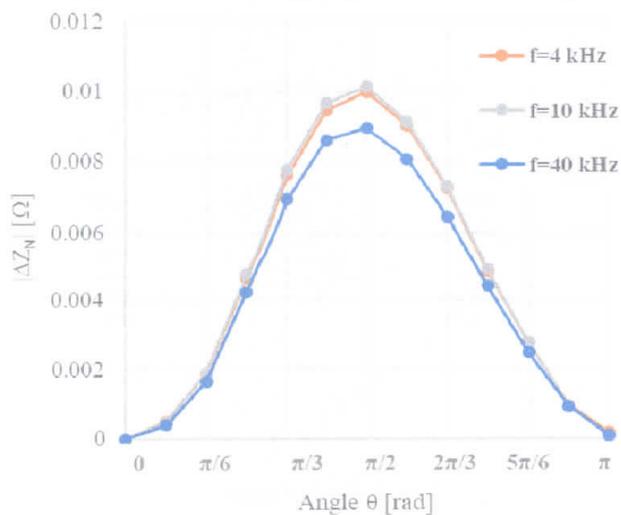


Fig.5 Changes of impedance deviation with angle change ( $I_{DC} = 2.0$  A)

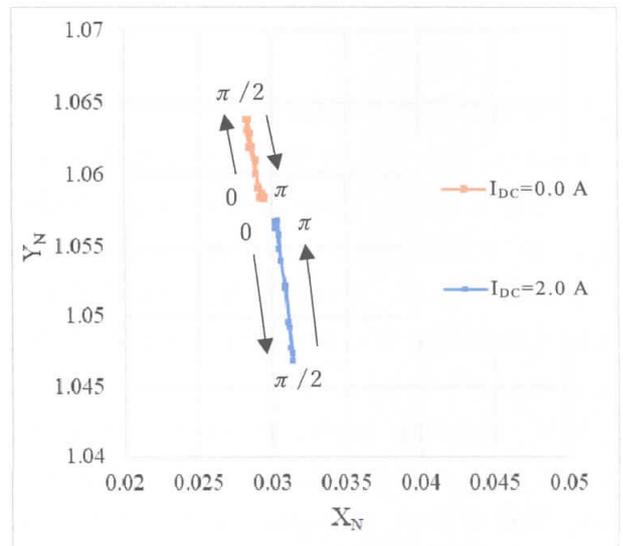


Fig.4 Changes of impedance with angle change ( $f = 4$  kHz)

次に、Fig.4に、Fig.3の $f=40\text{kHz}$ の正規化インピーダンスを拡大したものを示す。磁化していないときも角度を変えるとリアクタンス成分が変化しているが、これは鋼板が圧延によって、その透磁率に異方性を持つためである。一方、磁化しているときに角度を変えるとリアクタンス成分が減少するのはローレンツ力の影響と考えられる。Fig.5は、試験体を磁化したときの正規化インピーダンスの変化量 $|Z_N|$ と角度のグラフである。このグラフは、 $\theta=0\text{ rad}$ のときの $Z_N$ を基準とし、 $\theta$ が変化したときの $Z_N$ の値との差 $|\Delta Z_N|$ を示している。 $\theta$ の変化に対し、 $|\Delta Z_N|$ はsin関数状に変化することが確認できた。

#### 4. ローレンツ力を利用した鋼板裏面きずの探傷

##### 4.1 実験方法

試験体として $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ の鋼板(鋼板:SS400)を用いた。試験体の裏面には深さ $1\sim 5\text{ mm}$ の平底孔の人工きずを加工している。試験プローブのタンジェンシャルコイルは、巻線径 $0.2\text{ mm}$ 、巻数90回として作製した。Fig.6に実験装置を示す。試験体上部にタンジェンシャルコイルを設置し、下部に直流磁化器を設置した。

まず、磁化のない状態で磁束と渦電流の角度 $\theta = \pi/2\text{ rad}$ 、試験周波数を $4\text{ kHz}$ 、 $10\text{ kHz}$ 、 $40\text{ kHz}$ と変化させ、鋼板を試験プローブで走査した。次に、磁化電流 $I_{DC} = 2.0\text{ A}$ で直流磁化器によって試験体を磁化し同様の角度、周波数で走査した。鋼板の走査は、Fig.7に示す方向で、スキンの本数は9本で行った。

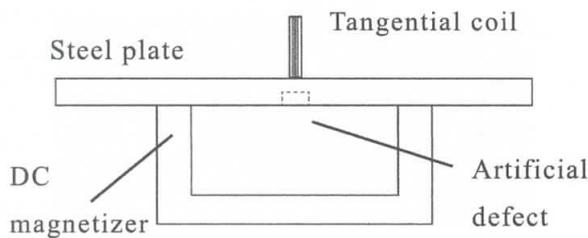


Fig.6 Cross sectional view of experimental equipment

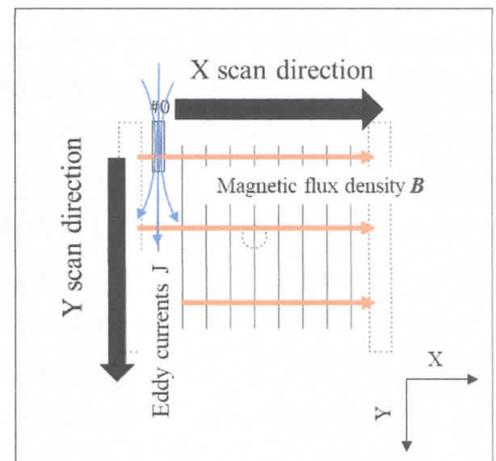


Fig.7 Cross sectional view

##### 4.2 実験結果および検討

Fig.8は、ローレンツ力が最小となるようにし、磁化電流 $I_{DC} = 2\text{ A}$ 、角度 $\theta = 0\text{ rad}$ 、試験周波数 $f = 4\text{ kHz}$ のときのきず深さ $5\text{ mm}$ のスキニング結果である。この場合は、きずと思われる信号を確認できたが、信号は小さいものとなった。

次に、Fig.9(a)、(b)は、ローレンツ力が最大となるように磁化電流 $I_{DC} = 2\text{ A}$ 、角度 $\theta = \pi/2\text{ rad}$ 、試験周波数 $f = 4\text{ kHz}$ としたときのスキ

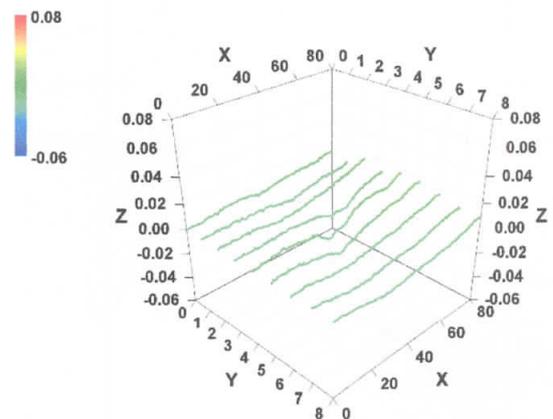


Fig.8 Scan signal  
(Defect depth  $5\text{ mm}$ ,  $I_{DC} = 2\text{ A}$ ,  $\theta = 0\text{ rad}$ )

キャン結果である。Fig.9(a)は、きずの深さが5 mm、Fig.9(b)はきずの深さが1 mmである。グラフのX軸はスキャンする線上の位置、Y軸はスキャンする線の番号、Z軸はスキャン信号の電圧を表している。Fig.9 (a)、(b)を見るとY軸の4番目の波形において電圧が大きく変化している。これは、人工きずがY軸の4番目に位置しているためであり、この信号はきずによるものと考えられる。

次にFig.10は、深さ1～5 mmのきずについて人工きずの中心をとる4番目のスキャン波形をまとめたものである。Fig.10では、人工きずの深さ1～5 mmそれぞれの場合においてきずを検出できることが確認できた。Fig.11は、各人工きずの信号の強さを周波数ごとにグラフにしたものである。このグラフを見ると、いずれの周波数においてもきずが深くなるにしたがってきず信号が大きくなることが確認できた。

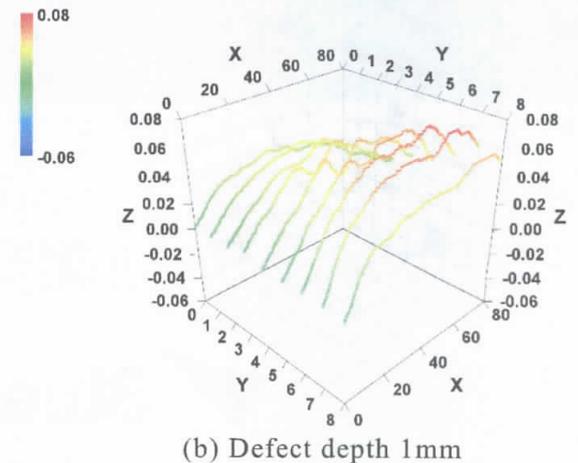
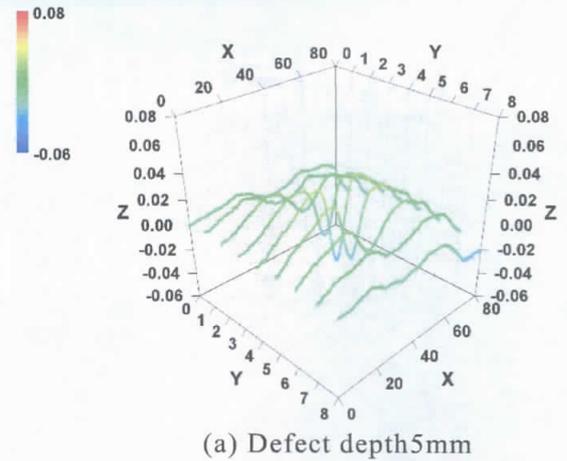
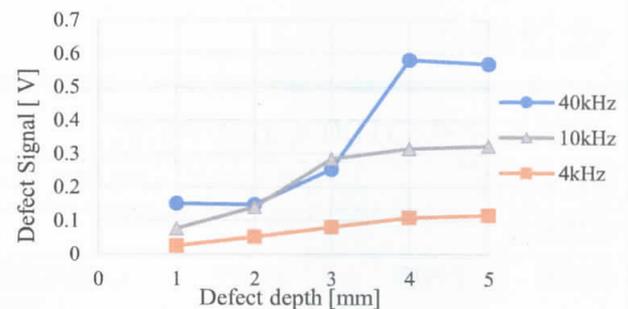
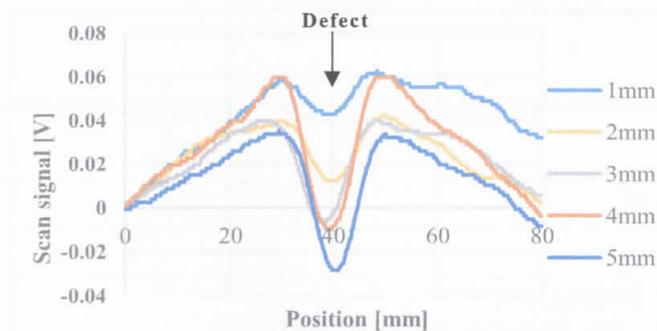


Fig.9 Scan signal ( $I_{DC}=2\text{ A}$ ,  $\theta = \pi/2\text{ rad}$ )



## 5. まとめ

磁束密度と渦電流の角度を変化させたときの試験コイルのインピーダンス変化を観測したところ、ローレンツ力によって渦電流分布が変化している可能性が確認できた。次に、鋼板の裏面きずをタンジェンシャルプローブによって探傷したところ、通常のECTではきずが検出できない条件において、きずを検出することができた。このことは、ローレンツ力によって渦電流分布が深くなったことの1つの根拠となり得るものと考えられる。

今後、更にローレンツ力の影響について検討を加える予定である。

## 参考文献

- 1) 宮島：ファイマン物理学III電磁気学，岩波書店(1986)，pp. 161-162
- 2) 田村,他:ローレンツ力を利用した渦電流試験による鋼板の厚さ測定，第22回表面探傷シンポジウム(2019)，pp. 43-46

# 屋内設備点検用

## 『特殊球体ドローンELIOS』 について



### 会社紹介

日鉄鉱業(株)の100%出資子会社

設立年月日	昭和36年(1961年)9月29日
従業員数	87名
所在地・事業内容	<p>本 社 : 福岡県飯塚市枝国666</p> <ul style="list-style-type: none"><li>①製鉄所、鉱山等への産業用機械・部品販売</li><li>②韓国・中国等との機械部品、化成品、原料等の輸出入</li><li>③不動産管理</li><li>④ゴルフ練習場</li></ul> <p>須崎支店 : 高知県須崎市下分新川乙1090番429号</p> <ul style="list-style-type: none"><li>①石灰石の沿岸荷役</li><li>②荷主代行業務</li></ul> <p>佐世保営業所 : 長崎県佐世保市矢峰町221番地の1</p> <ul style="list-style-type: none"><li>①海砂除塩</li><li>②不動産管理</li></ul> <p>君津営業所 : 千葉県木更津市築地1番地 君津製鉄所ビジネスセンター205号室</p> <ul style="list-style-type: none"><li>①製鉄所への産業用機械・部品販売</li></ul> <p>◇2018年から新規事業として、本社・君津営業所にて 特殊球体ドローンELIOSによる設備点検を開始</p>

# 球体ドローン「ELIOS」について

CONFIDENTIAL

## ■ FLYABILITY社 (スイス) 製「ELIOS」の特長



直径40cm  
コンパクトサイズ!

- ◆GPSで制御不能な屋内空間（非GPS空間）での点検用にフォーカスして、スイスのFLYABILITY社で開発
- ◆欧州、米国を中心に約5年で500機以上の納入実績
- ◆日本ではブルーイノベーション(株)が独占代理店となり、弊社は販売・点検の両分野でパートナー
- ◆人の立入りが困難な「高所・暗所・狭所」といった環境でこそ活躍

これまで多くの「人手・時間・費用」をかけていた危険箇所の点検に、「安全性・効率性・コスト削減」の向上を実現します。

Blue innovation

Shinwa Shoji

3

# 球体ドローン「ELIOS」について

CONFIDENTIAL

## ■ ストロングポイント

- ◆ **コンパスエラーが出ない**  
⇒屋内や、周囲に鉄がある環境でも飛行可能
- ◆ **遠隔調整可能なLED**  
⇒暗所でも飛ばせる
- ◆ **コンパクトかつ高品質なガード**  
⇒カーボン製のガードを装着し、壁面に衝突してもガードだけが回転し、安定飛行が可能
- ◆ **真上を撮影できる**  
⇒多くのドローンは、プロペラの下部にカメラが設置されており、真上を撮影することが難しい

機体名称	ELIOS仕様
プロペラ数	4
機体大きさ	40 cm
機体重量	700 g
耐風性能	5 m/s 以下
通信距離	500 m
屋内高度維持	○
自動飛行	—
LED	○(最大28W)
動画画質	1920×1080
赤外線カメラ	160×120

## <弊社点検・販売実績>

点検実績：大分製鉄所様、八幡製鉄所様、君津製鉄所様、日鉄鉱業（大分、高知）

販売実績：1台

Blue innovation

Shinwa Shoji

- 14 -

4

# 点検対象エリア（例）

CONFIDENTIAL

- 狭い、高い、暗い等、人が入ることが難しいエリア・設備を点検



貨物船の船倉内



立体駐車場の内部



配管・トンネルの中



大型ボイラーの内部



工場の天井部分



ビルの地下の免震装置

Blue innovation

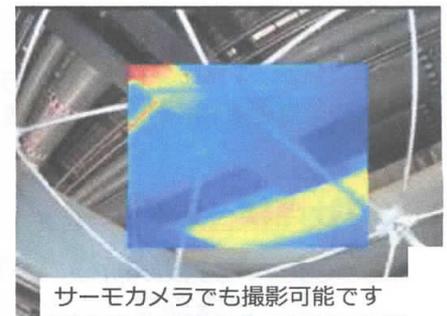
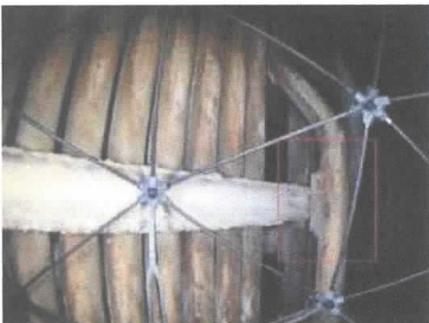
Shinwa Shoji

5

# 「ELIOS」のアウトプット

CONFIDENTIAL

- 点検したい箇所を撮影したフルHDの動画を納品いたします



サーモカメラでも撮影可能です

Blue innovation

Shinwa Shoji

- 15 -

6



作業員が危険な空間（高所、狭小、暗所）に入る必要がなく、点検作業が可能です。

**安全性の向上**



定修前の事前点検として使用し、本定修での作業効率向上が可能です。これにより、設備停止時間の減少も期待できます。

**作業効率の向上**



足場を組んだり、クレーンを使う必要がなく、低コストでの点検が可能です。

**コスト削減**

## プランのご紹介

点検施設数・点検回数が多いため、点検業務は自社の社員で行えるようにしたい

### Aプラン ELIOS購入プラン

■ ELIOS購入

■ 点検業務マニュアルの作成

■ 社員のドローンの操縦講習会

点検業務は委託したい

### Bプラン 点検サポートプラン

BI社及び新和社のパイロットが企業様の施設点検を実施するプラン

点検頻度が低い（年に2~3回程度）場合や、ドローンを自社で運営管理が困難な場合のプラン

### 運用テスト・検証

顧客の施設・設備について、ELIOSによる点検が効果的かどうか？を検証します（映像を納品）

## ■ ユーザー様購入価格

**ELIOSスタンダードパック：3,500,000円(税抜)**＜パック内容＞

- ELIOS機体：1台
- プロポ：1台
- バッテリー：5個
- 充電器：2台
- タブレット端末（プロポ用/Samsung製）：1台
- 専用キャリーケース：1個
- バッテリーバッグ：1個
- 予備プロペラ&整備用ツール：1セット
- マイクロSDカード：2枚
- 保護フレームの予備部品：5個

## 点検サポートプラン

**ELIOS点検サポートプラン****点検サポートプラン 50万円～(税抜)**

点検頻度が低い（年に2~3回程度）場合や、ドローンを自社で管理する必要のないプランです。操縦難易度によって変動します。

1. ご相談（ヒアリング：要求事項確認）／打ち合わせ
2. ご提案／点検業務計画書作成
3. 現場点検(1日\*)／ELIOS 1機、パイロット 2人（弊社及びBI社）
4. 報告書／点検した映像等をお客様へ納品します。

\*点検に1日以上必要な場合は、別途費用が発生いたします。

**交通費（宿泊費用含む）：別途費用（実費ご請求）**

# ドローンを用いた非破壊検査

## 【打音検査機能を搭載した飛行型点検ロボット】

新日本非破壊検査(株) 技術開発室  
和田 秀樹

令和 2年 2月21日

### 【研究機関】

新日本非破壊検査(株) 名古屋大学大学院 九州工業大学大学院  
福岡県工業技術センター 北九州工業高等専門学校  
(支援:北九州市)



戦略的イノベーション創造プログラム 内閣府

Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program Cabinet Office, Government of Japan

インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 ロボット技術の開発

【管理法人】NEDO:国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

## 1 研究開発の背景と目的

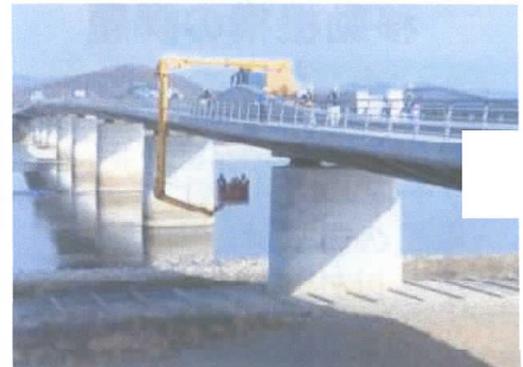
### 背景

これまでインフラ点検は特殊車輛や足場が用いられることが多く、コスト面や安全対策などが課題とされてきた。また、技術面において技術者の技術に依存するなどの指摘もある。

### 研究開発の目的

ドローン技術を活用した点検ロボットにより橋梁の裏側など、人が近づきにくい部位に接近・接触して点検を実施、解析技術による定量的な評価など、安全で低コスト、技術者に依存しないインフラ点検を実現する。

- 特殊車輛の使用を削減
- 道路規制の解消
- 従来点検法による点検
- 解析技術の活用
- 点検調書の支援



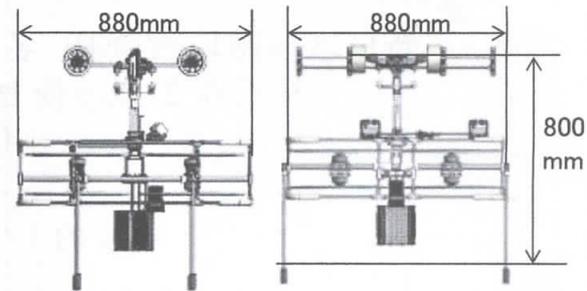
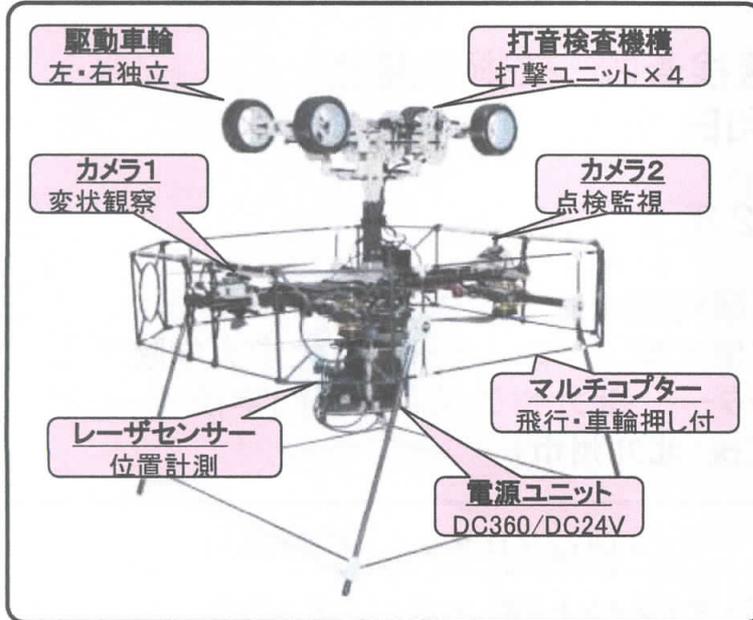
特殊車輛による点検



ロープアクセスによる打音検査

## 2 点検ロボットの概要

- ドローンの飛行と駆動車輪を融合、飛行機能で車輪を接触
- 走行状態で近接目視と打音検査を同時に実施
- 信号解析により異常部の自動検出
- 有線による電源供給で運転時間の制限を解消
- 飛行範囲の制限による安全性の確保



外形(mm) : 880 × 880 × 800 重量 : 8.5kg

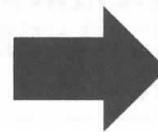
SHK

3

## 3 移動機構

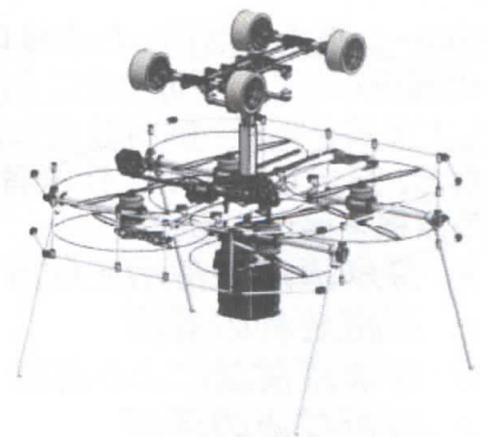
### 移動機構の課題

- ・点検部への接近は小型が有利
- ・搭載する機構が重い
- ・ケーブルの引き上げ力が必要
- ・車輪の押し付け力が必要
- ・車輪以外が接触する可能性
- ・走行面の傾斜・段差への対応
- ・もれなく点検するには舵が必要



### 【飛行機機構】

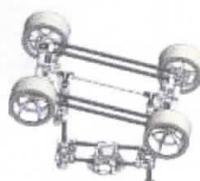
- ・二重反転式クワッド型  
小型で大きなパワー  
高い飛行性能  
安定した車輪押し付け
- ・保護ガード構造



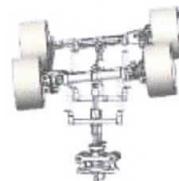
【点検ロボット全体】

### 【駆動車輪機構】

- ・揺動機構  
段差・傾斜・R面
- ・左右独立駆動制御  
前進／後退  
方向転換



(Pitch: ±20°)



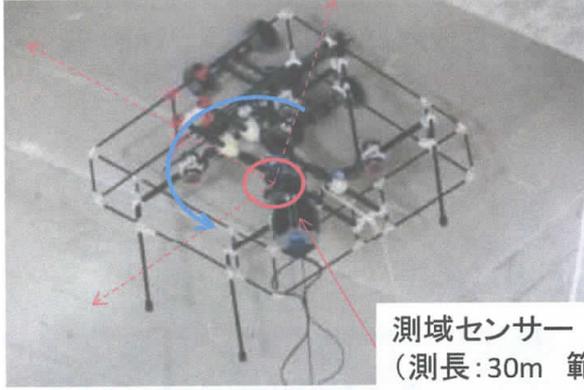
(Roll: ±20°)

SHK

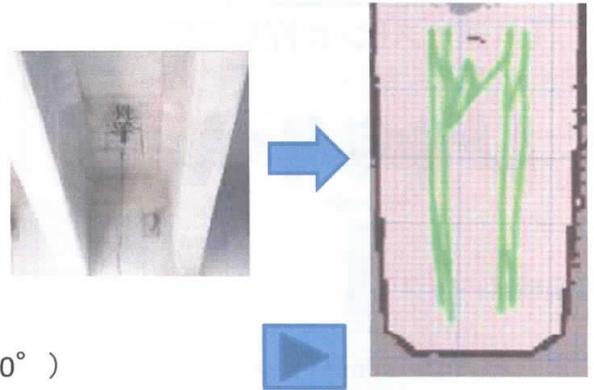
4

## 4 位置情報取得機構

2次元距離測定( 270° )



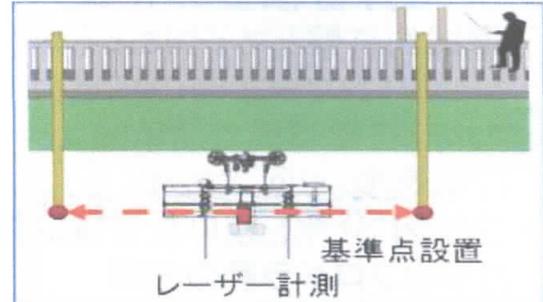
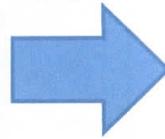
走行軌跡作成(SLAM)



### 位置情報の必要性と課題

- ・点検位置と範囲の把握
- ・異常検出部の位置
- ・GPS不可
- ・計測対象が必要

対策



SHK

5

## 5 近接目視機構

【近接目視】 触診が可能な距離まで近づき、損傷状態や変状を調べること

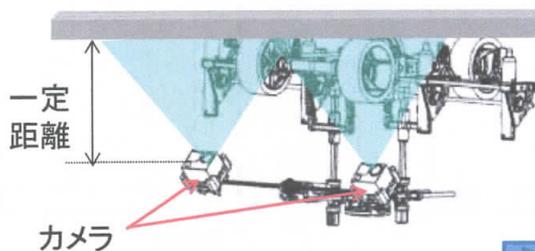
### 近接目視の特徴

#### 目視機構の特徴

- ・接近した距離から撮影  
(固定距離:30cm程度)

#### 解析技術

- ・ひびわれ自動検出  
(0.1mm幅ひびわれ)
- ・形状測定(幅・長さ)
- ・画像合成(広域画像)



近距離から動画撮影



### 解析結果

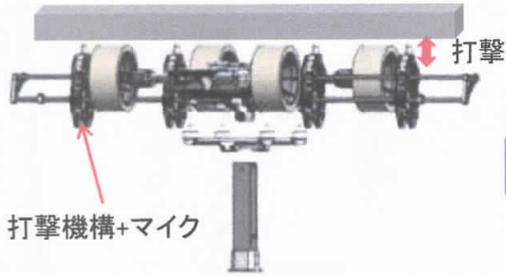


SHK

# 6 打音検査

【打音検査】ハンマーなどで叩いて、その音の違いで異常を検知する方法

## 【4連ピストン式打撃機構】

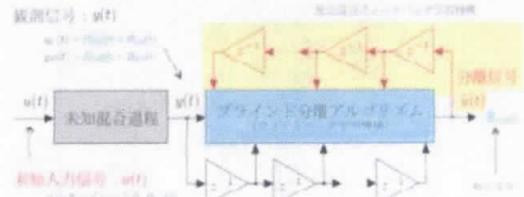


打撃機構+マイク  
打検間隔120mm~200mm可変

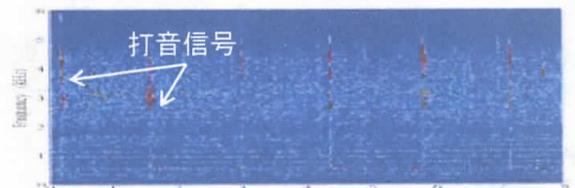
## 打音検査の特徴

- ・ 機械的打撃とマイクによる集音  
1/4lbハンマー相当の打撃力
- ・ マルチ打撃機構で効率的な点検  
打撃速度 2回/毎秒(各)
- ・ ブランド分離を用いた音響解析  
打音とプロペラ音の分離

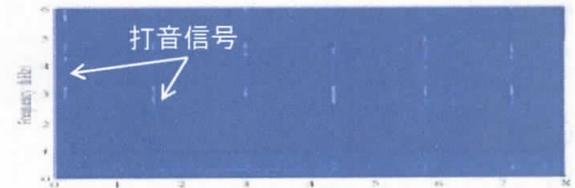
## ブラインド分離によるプロペラ音除去



## ブラインド分離アルゴリズム



(a) ブランド分離前



(b) ブランド分離後

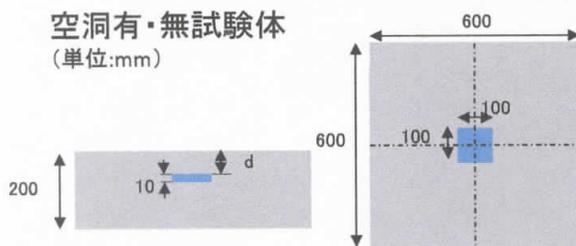
時間周波数解析結果



# 5-1 打音信号の特性

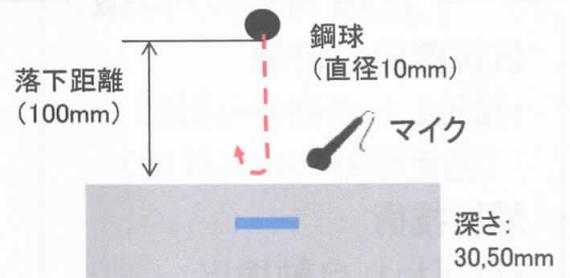
## 鋼球落下試験

コンクリート供試体

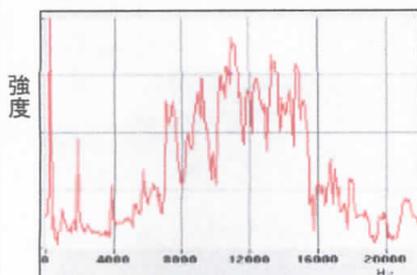


空洞有・無試験体  
(単位:mm)

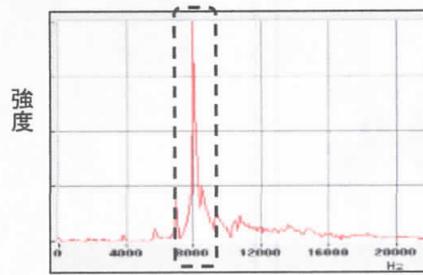
## 鋼球落下試験



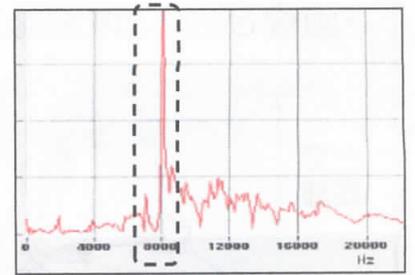
## 打音信号



周波数  
空洞無し



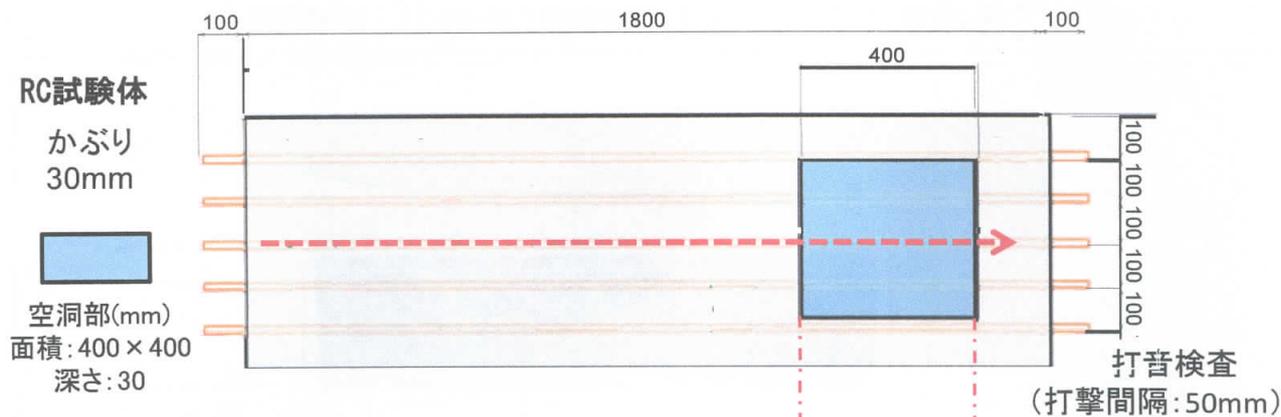
周波数  
深さ30mm



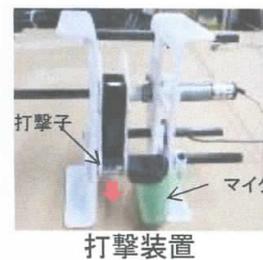
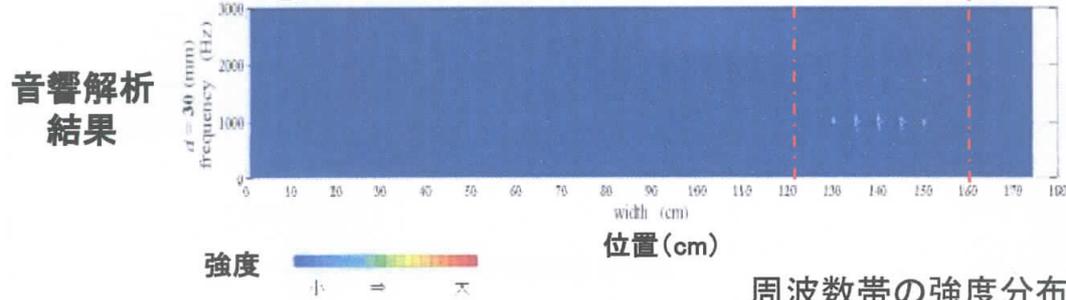
周波数  
深さ50mm



## 5-2 打音信号の可視化



【周波数・強度分布表示】

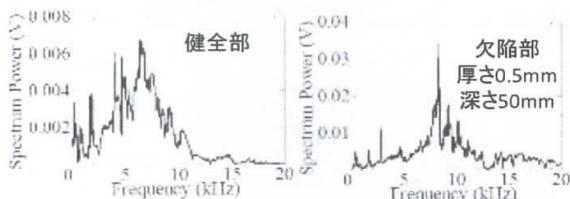


音信号を視化することで、打音の変化を容易に識別可能である



## 5-3 打音信号数値化

健全部評価指数とは  
打音信号の特徴

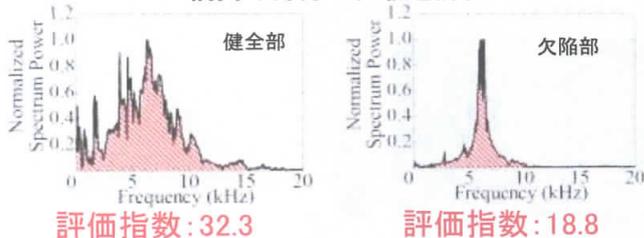


- 【健全部の特徴】  
 ✓ ブロードな分布  
 ✓ スペクトル強度が小さい
- 【欠陥部の特徴】  
 ✓ シャープな分布  
 ✓ スペクトル強度が大きい

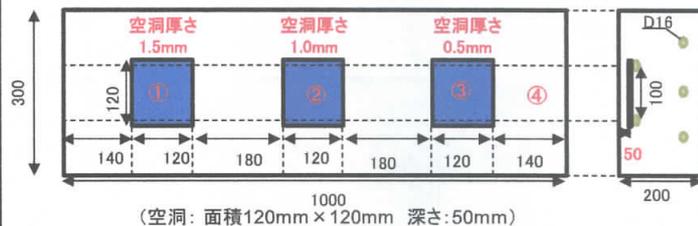
処理

健全部判定技術: RMS(二乗平均平方根)処理

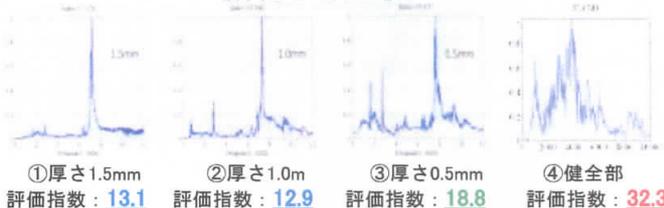
網掛け部分の面積を評価



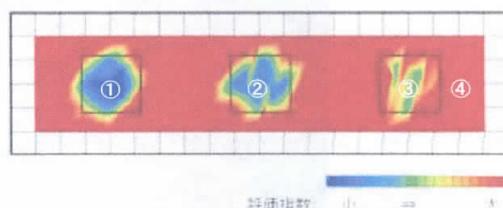
健全度評価指数による空洞検出検証  
【検証試験体】



【打音スペクトル】



【評価指数分布】

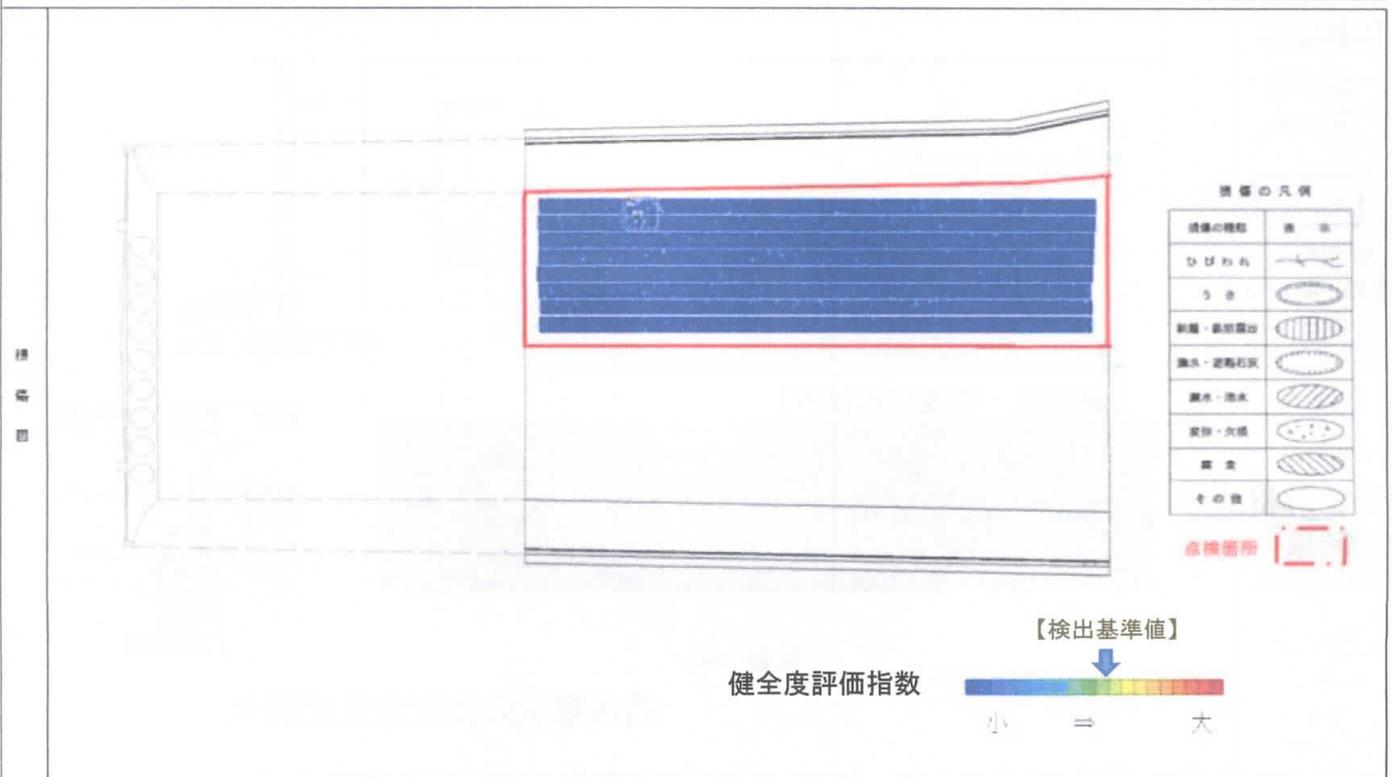


深さ50mmまでの大きさ100mm × 100mm程度の空洞が検出が可能



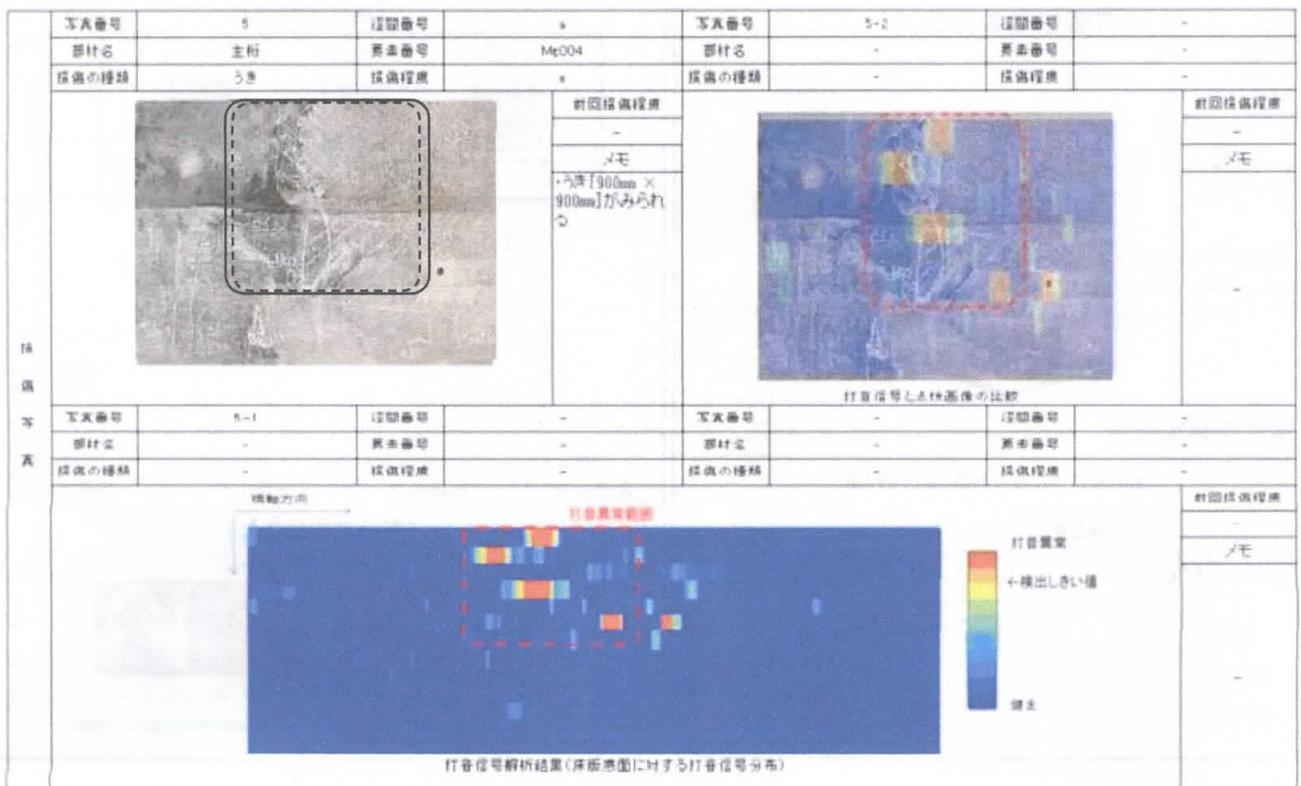
# 5-4点検報告書(1)

## 【点検調書】 データ記録様式(その9) 損傷図



# 5-5 点検報告書(2)

## 【点検調書】 データ記録様式(その10) 損傷写真



## 6 ポール型ドローン(開発中)

ドローンをポールで操作、接触も可能  
(目視・打音点検、超音波・渦流探傷など)



“ポール操作で容易に点検”



(搭載カメラの画像)



ポール長さ: 10m

SHK

13

# ご静聴ありがとうございました

新日本非破壊検査㈱

技術開発室：和田

TEL: 093-581-1256

E-mail: h-wada@shk-k.co.jp





## 2. 特別講演



# プラスチックの劣化と非破壊検査による評価

日本大学 生産工学部  
マネジメント工学科  
酒井 哲也

## 腐食環境への有機材料(プラスチック)の適用

### ・プラスチックの特色

易加工性・成形性

軽量 → 比強度・比弾性 (FRP)

耐腐食性 (海水, 酸・アルカリ)



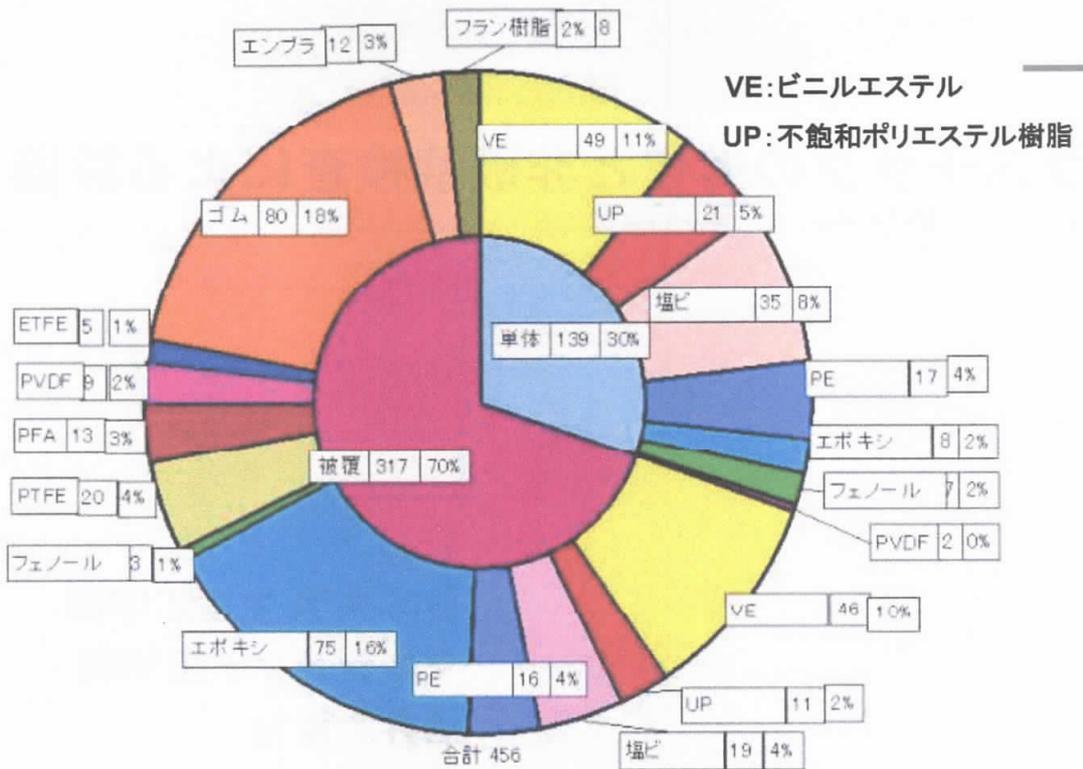
### ・有機材料の適用

被覆材料 → ライニング・コーティング

単体材料 → FRP, PVC, etc.

### ・有機材料の多様性





耐食用途として用いられる高分子材料の使用形態

## プラスチックが劣化/腐食する環境

過酷な使用環境下において劣化

- 酸
  - 強酸、弱酸、有機酸
- アルカリ
- 耐候性
- 紫外線

長期に利用すると

- 酸・アルカリ溶液など貯蔵薬液による劣化
- 内面の亀裂、薬液漏えい
- 作業員転落などの事故



FRPタンク



劣化による天板崩落事故

# 溶液環境下における樹脂の劣化

## 溶液環境下における樹脂の劣化

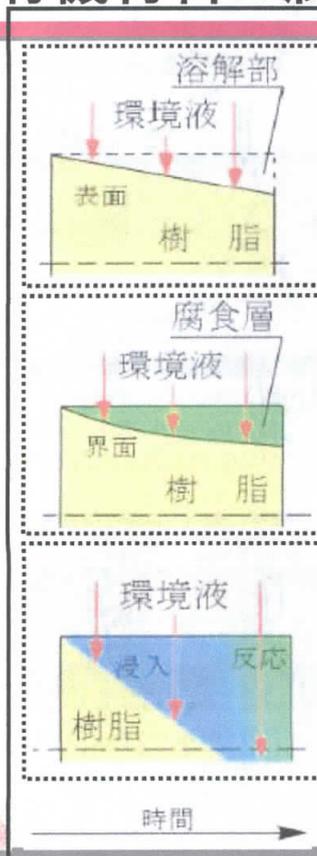
### 物理的劣化

- 拡散による浸入
- 一時的な強度低下
- 乾燥後の強度回復

### 化学的劣化

- 化学反応による劣化
- 分子差の切断
- 強度回復がない

## 有機材料の腐食形態



### • 表面反応型

表面から分解反応生成物が溶出し、  
一様な減肉のような腐食形態

### • 腐食層形成型

腐食生成物が不溶のまま樹脂表面に残り、  
通常は色や質感の異なる変色層として認められるような腐食形態

### • 全面浸入型

はじめのうちは環境液の浸入は認められるものの、  
物理的劣化のみで、ある程度時間が経過した後に強度の低下を示す

# プラスチックの劣化と非破壊検査による評価

## ・プラスチックの腐食/劣化に対して

様々なプラスチック/有機材料製 製品に対して非破壊検査を適用し、劣化程度を把握しながら利用することが必要

## ・非破壊検査として<sup>1, 2)</sup>

目視検査、超音波探傷検査、放射線透過検査、磁気探傷検査、渦電流探傷検査、浸透探傷検査、etc.

## ・超音波検査の長所

- 片面からのアクセスで評価可
- プラスチック中も伝搬する
- 材料内部まで伝搬する

# 超音波測定

## ・超音波送受信器

- ・ Model500PR (オリンパスNDT株式会社製)

⇒ Spike波

- ・ Model5077PR (オリンパスNDT株式会社製)

⇒ Square波

- ・ 工業用探触子( $\alpha$ シリーズ, オリンパスNDT株式会社製)

主に周波数5 MHz

- ・ 接触媒体(エコー/ゲル N-100,

日興ファインズ工業株式会社製)

試験片平面部に塗布し探触子を密着させる

ペタX



Model500PR  
PULSER/RECEIVER

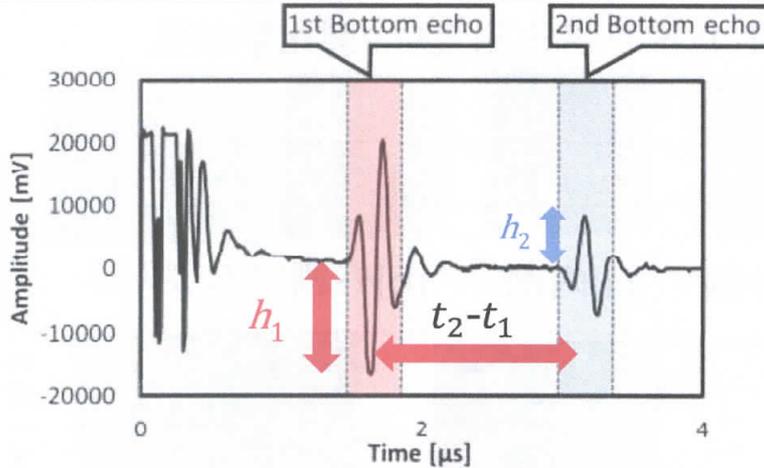


Model5077PR SQUARE  
WAVE PULSER/RECEIVER



超音波端触子  
(周波数: 5MHz)

# 超音波 音速と減衰率



試験片内を伝播した超音波の音速C

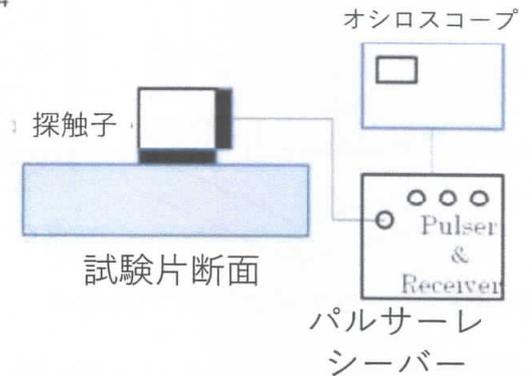
$$C = \frac{2d_0}{t_2 - t_1}$$

$d_0$ : 照射前の試験片厚さ  
 $t_1$ : 第1底面エコー時間  
 $t_2$ : 第2底面エコー時間

底面エコー高さ  
 dB (デシベル値)

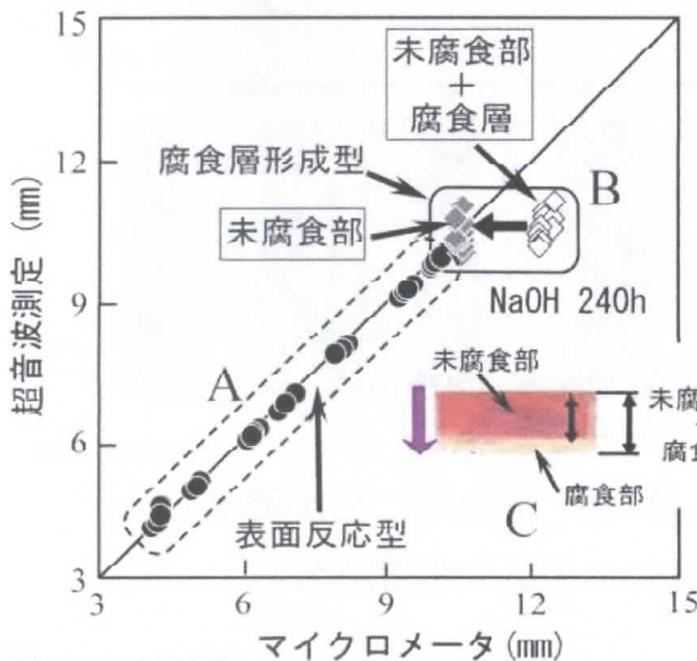
減衰率

$$dB = 20 \log \frac{|h_1|}{|h_2|} \quad \alpha = \frac{dB}{2d_0}$$



# 表面反応型と腐食層形成型

超音波による不飽和ポリエステル  
 未腐食部 (健全部) 厚さ測定



未腐食部 (健全部) の音速  
 が変化しないことが前提

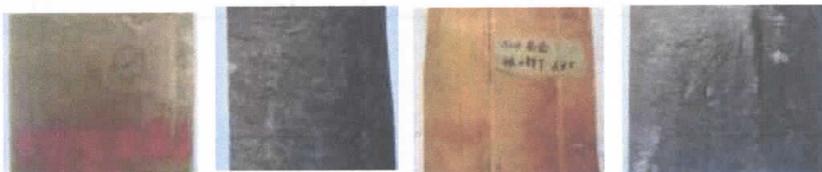
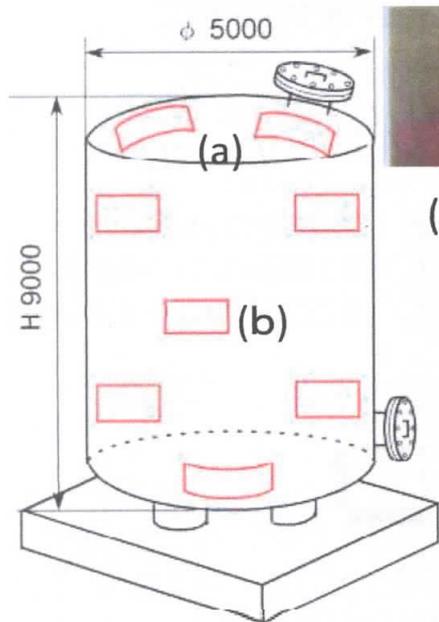
A: 表面反応型

B: 腐食層形成型  
 (10mass% NaOH 250時間)

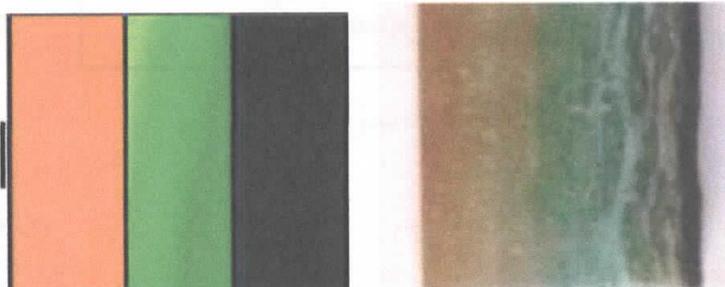
未腐食部と腐食部に明確な  
 界面が存在し、そこからの  
 反射が検知できる場合

# 実際の塩酸タンクの測定<sup>3, 4)</sup>

塩酸環境下で用いられた廃棄済み耐食FRP製化学装置



(a)外側 (a)内側 (b)外側 (b)内側



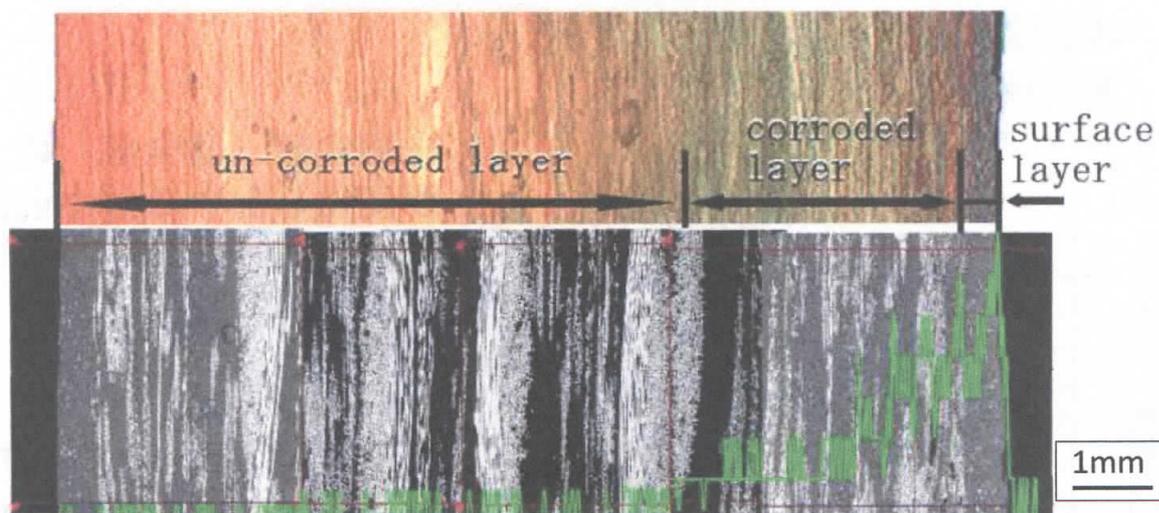
内側  
(接液面)

・タンク内側から黒，緑，茶の順に色が異なる

測定箇所によって劣化程度が異なる



# 実際の塩酸タンクの測定 (EDS分析)



断面観察&EDS分析

Cl : green line

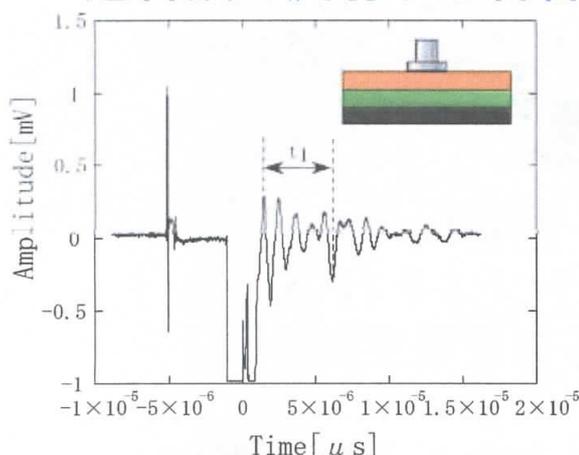


- ・タンク内側から黒，緑，茶の順に色が異なる
- ・黒と緑色の層はClの浸入が観察される

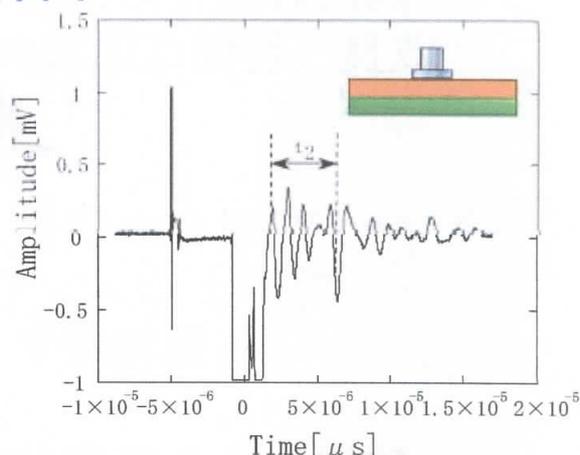


# 実際に使用された塩酸タンクの測定（超音波）

## 超音波が反射する音響界面



表面層を含む超音波波形



表面層を除いた超音波波形

- 接液面側（黒色）層の有無に関わらず，底面エコー時間が等しい ( $t_1=t_2$ )
- 超音波検査によって接液面側（黒色）層を除いた厚さを測定している

## エタノール環境における有機材料の劣化および乾燥回復挙動と超音波による検知<sup>5~7)</sup>

### バイオマス燃料と有機材料製機器への懸念

バイオマス燃料（バイオエタノール）

二酸化炭素削減の有効手段

国内においてE3ガソリン（バイオエタノール3%混合），  
E10ガソリンの本格的な普及と商業化が進められている

有機材料が使用されている自動車部品と懸念される影響

	樹脂	懸念される影響
フューエルキャップ	PA6 POM	強度低下による破損
燃料タンク	PA6 HDPE	燃料浸透性増加
燃料フィルタ	POM PA12	運転性不良、燃料漏れ
燃料ポンプ	POM PPS	強度低下、運転性不良

## エタノール環境における有機材料の劣化および 乾燥回復挙動と超音波による検知<sup>5~7)</sup> 目的

国内の既存の設備，機器全てに対する  
改良・整備は環境およびコスト面で困難



既存の設備，機器に対し  
効率よく **メンテナンス** を行い，  
有効利用する事が現実的

### 乾燥による回復挙動，劣化程度の把握

エタノール環境における有機材料の劣化および乾燥回復挙動  
非破壊検査の分野で多用されている超音波測定による検知

## 実験方法（試験片と試験環境）

環境液：95mass%エタノール

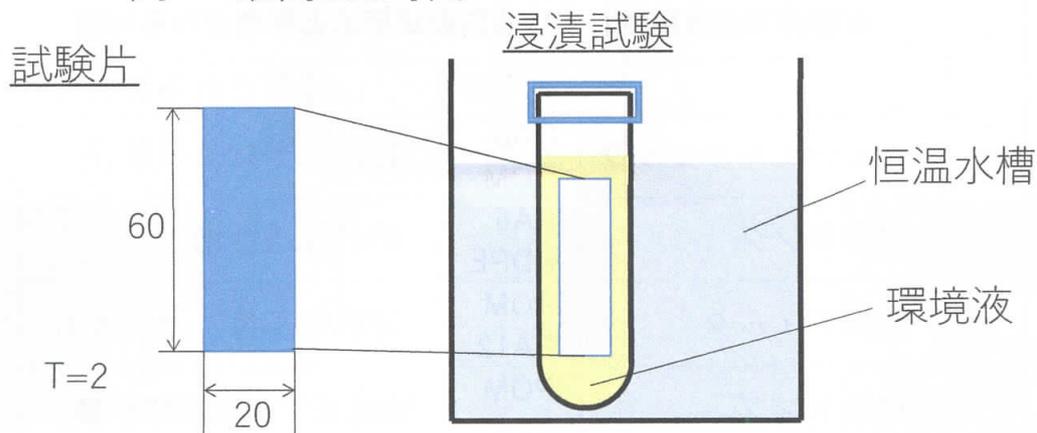
環境温度：60°C

試験材料：ポリアセタール（以下POM）

ポリエチレンテレフタレート（以下PET）

形状：60×20×2mm（JIS K 7171に準拠）

時間：最高600時間

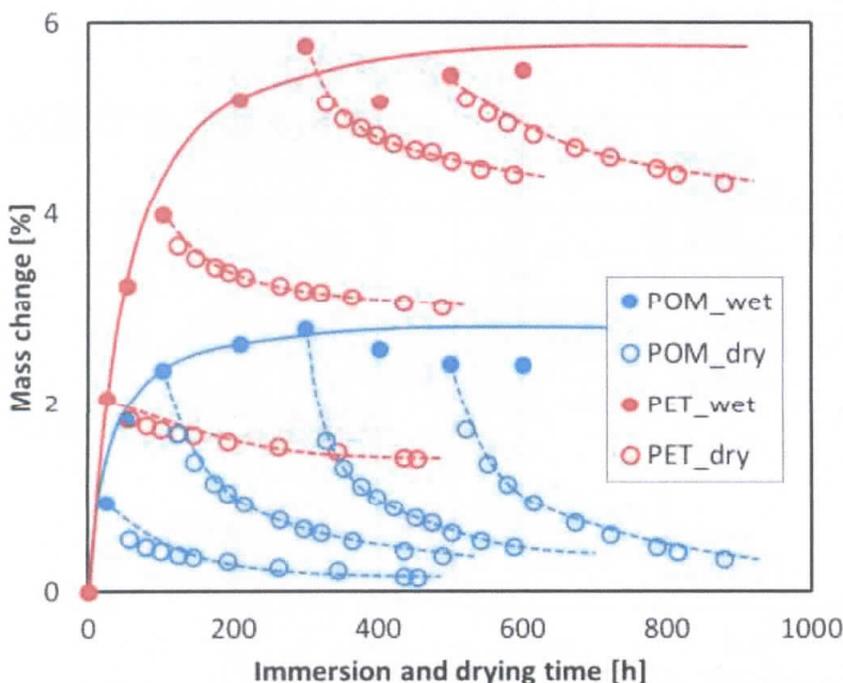


## 実験方法（評価方法）

湿潤状態・・・所定時間浸漬後、直ちに測定  
乾燥状態・・・所定時間浸漬後、50°Cの乾燥器中で乾燥させたものを測定  
(質量、音速は乾燥過程も計測)

エタノール浸入量	→	質量測定
機械的性質の変化	→	3点曲げ試験
化学構造の変化	→	FT-IR（ATR法）

## 質量の経時変化



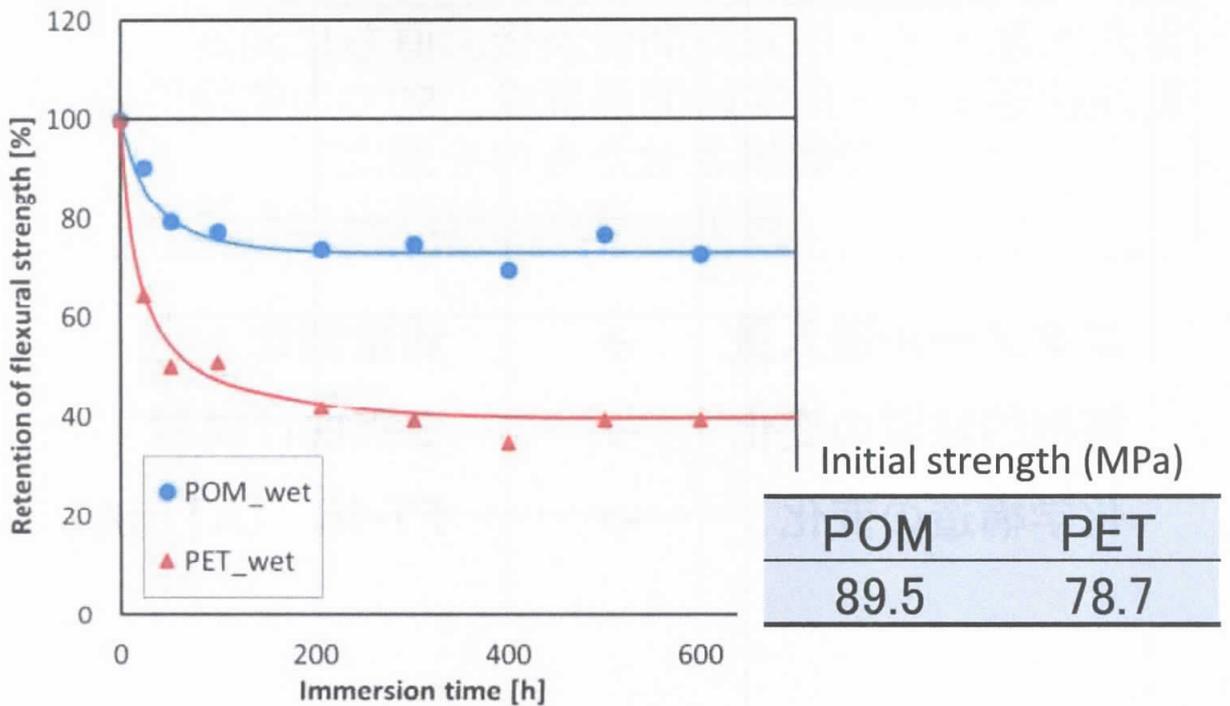
湿潤状態  
両試験片時間とともに  
質量の増加

乾燥状態  
POM→初期に戻る

PET→初期に戻らない  
PET内部にエタノール  
との化合物

60°Cエタノールに浸漬後、50°Cで乾燥させた場合  
の有機材料の質量の経時変化

## 曲げ強度の経時変化

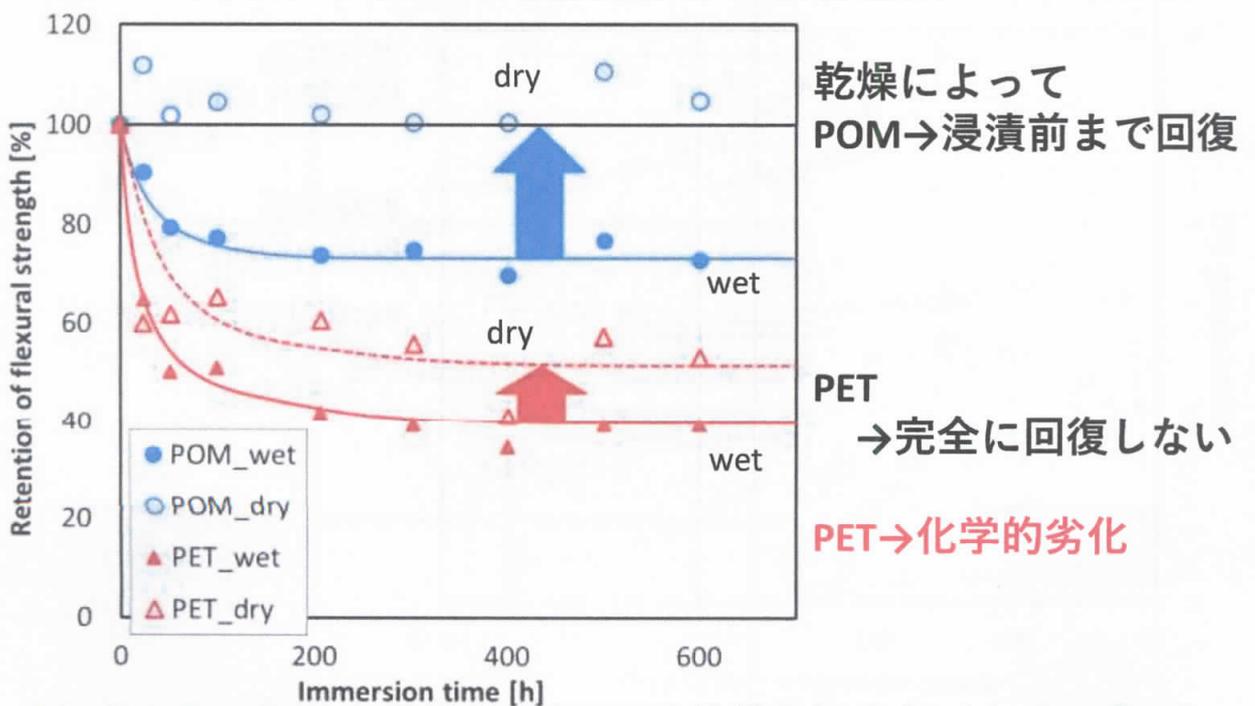


60°Cエタノールに浸漬した有機材料の強度保持率の経時変化



19

## 曲げ強度の経時変化

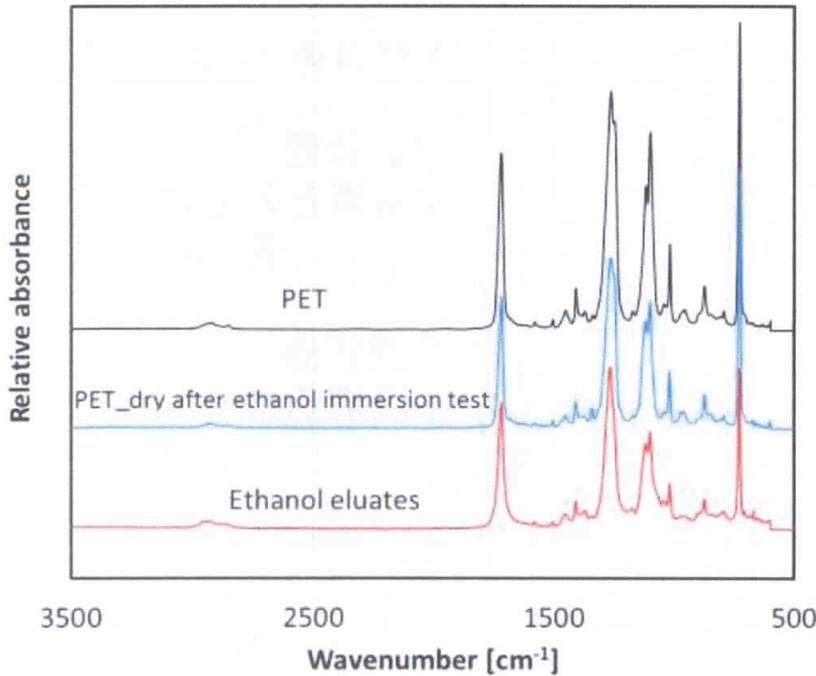


60°Cエタノールに浸漬後、50°Cで乾燥させた場合の有機材料の強度保持率経時変化



20

# PETの劣化機構の分析



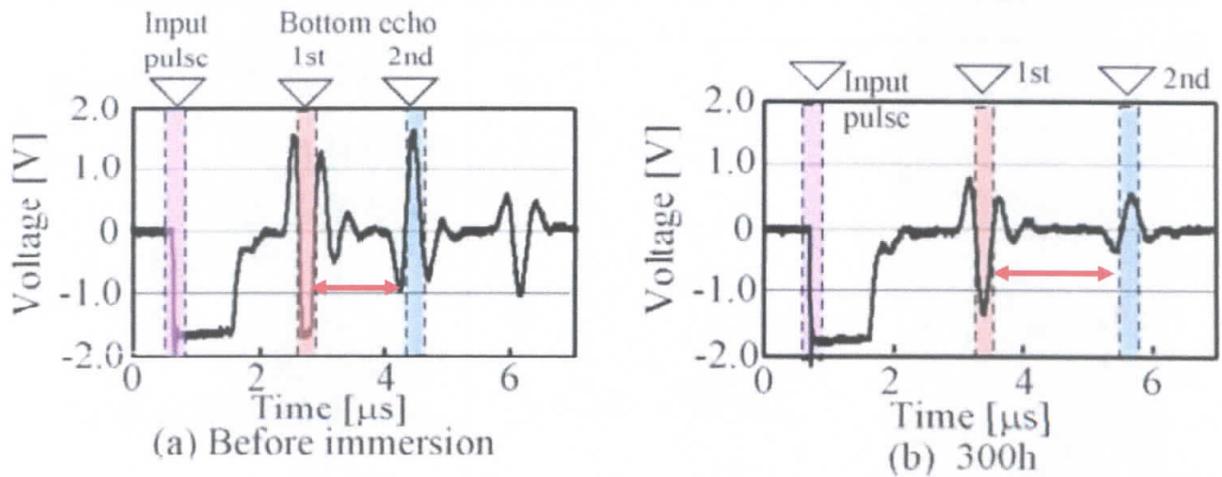
PET  
→浸漬によって  
化学構造は  
変化しない

溶出物  
→PETと同じ化学構造

PET中の  
エステル結合の切断

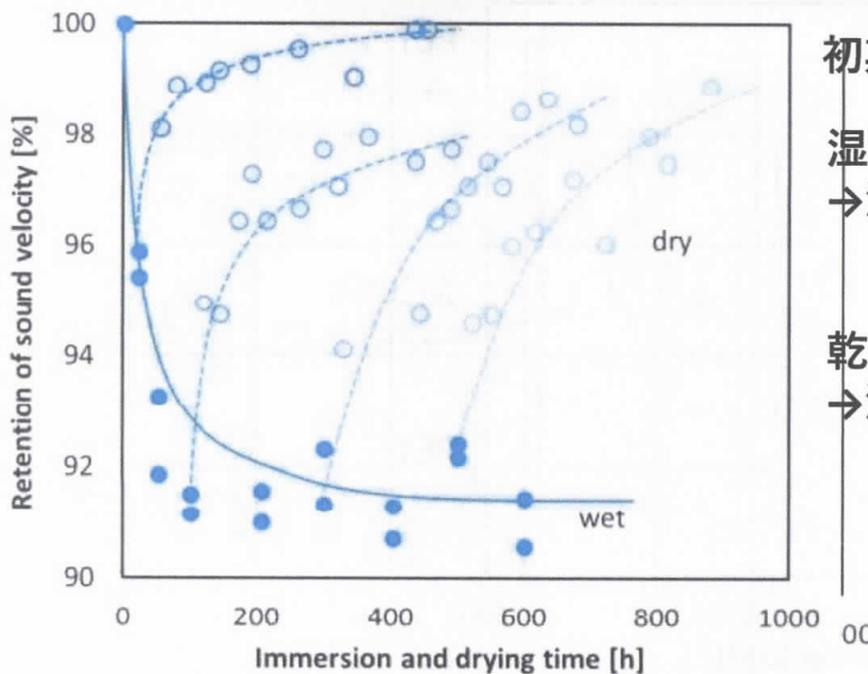
未浸漬, 600時間エタノール浸漬後乾燥状態の  
PETおよびエタノールの溶出物のIRスペクトル

# 浸漬による超音波波形の変化



未浸漬およびエタノール浸漬後の  
有機材料から得られる超音波波形

## POM（物理的劣化支配）の音速の経時変化



初期音速：2310(m/s)

湿潤状態

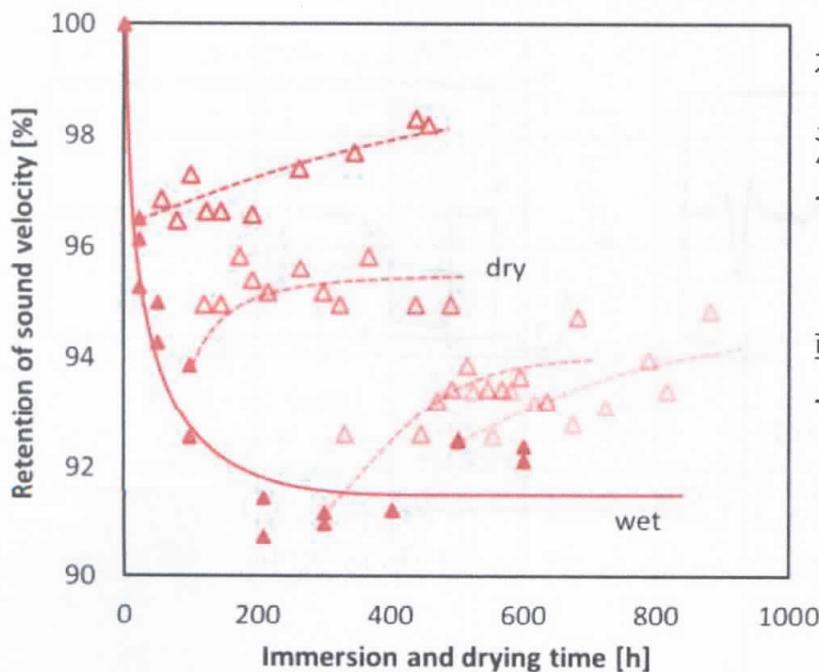
→浸漬とともに  
音速は低下

乾燥状態

→浸漬前まで回復

60°Cエタノールに浸漬後、50°Cで乾燥させた場合の  
POMの音速保持率の経時変化

## PET（化学的劣化支配）の音速の経時変化



初期音速：2290(m/s)

湿潤状態

→浸漬とともに  
音速は低下

乾燥状態

→浸漬前に戻らない

化学的劣化を検知

60°Cエタノールに浸漬後、50°Cで乾燥させた場合の  
PETの音速保持率の経時変化

# 物理・化学的劣化形態と超音波による評価

## プラスチック（熱可塑性樹脂） をエタノールに浸漬した結果

- ポリアセタール（POM）は物理的劣化，  
PET樹脂は化学的劣化を生じた。
- 超音波測定（音速の変化）によって，これらの劣化および乾燥回復挙動を検知することができる

## アミン硬化エポキシ樹脂内への硫酸水溶液の浸入挙動と 超音波による評価

### コンクリートライニング（アミン硬化エポキシ樹脂）

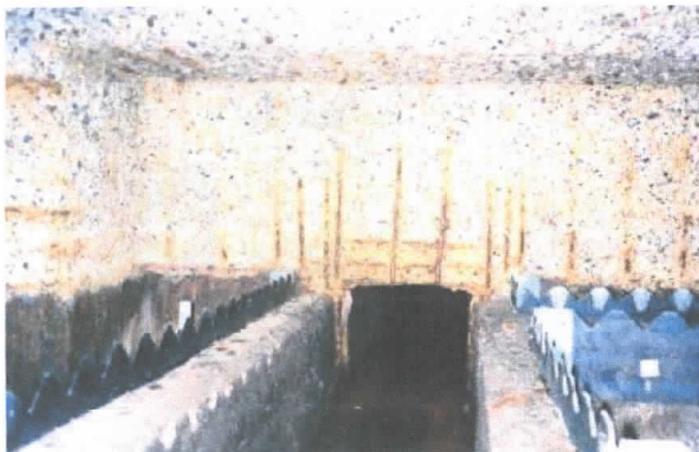
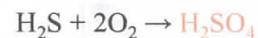
コンクリートの中性化

- ・ 空気中の二酸化炭素
- ・ 酸性雨
- ・ バクテリア（硫黄バクテリア，硫酸塩還元バクテリア）

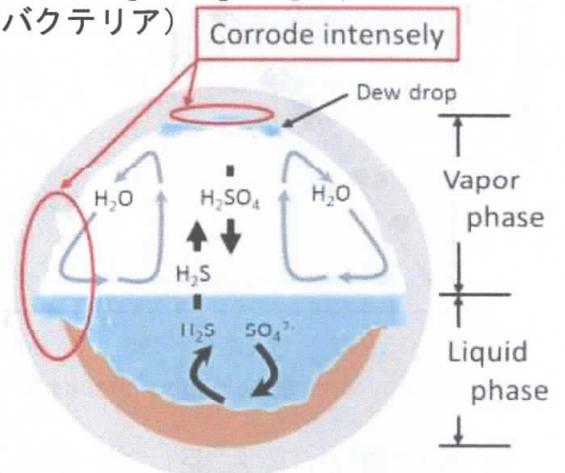
□硫酸塩還元細菌



□硫黄酸化細菌



下水道施設（最初沈殿池）



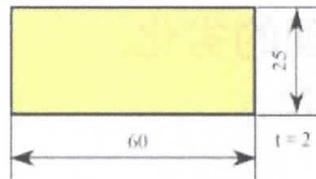
Mechanism of microbial corrosion of concrete

# 実験方法

材料：アミン硬化エポキシ樹脂  
 (日新レジン株式会社製)

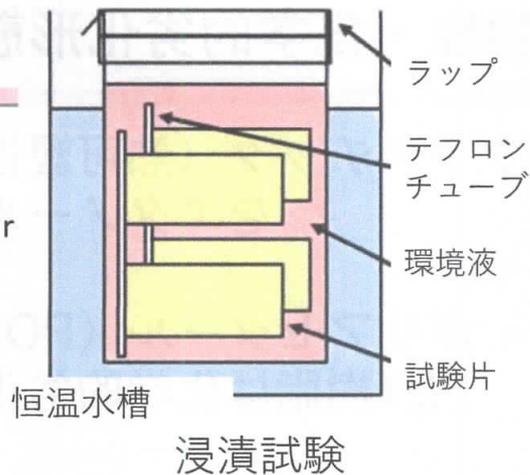
配合比：主剤+硬化剤20phr+消泡剤0.5phr

硬化条件：室温24h+80°C3h



試験片寸法  
 試験環境

環境液	硫酸水溶液
濃度	10mass%
温度	60°C
時間	0 to 3000h



## 評価方法

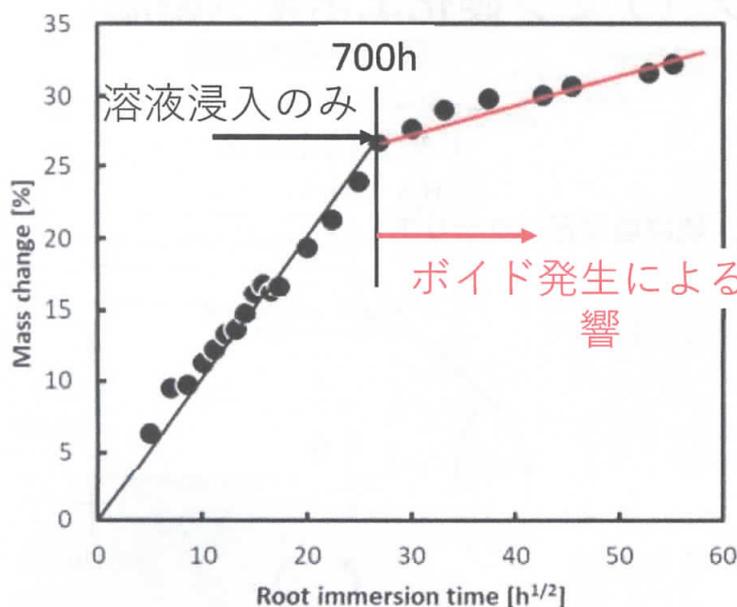
➤ 質量変化率

$$M_c[\%] = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100$$

➤ 断面分析 (EDS分析)

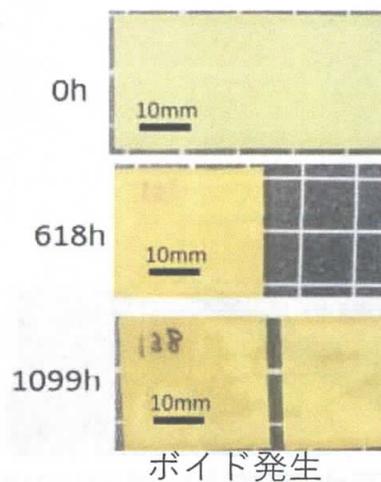
➤ 超音波音速

# 質量変化



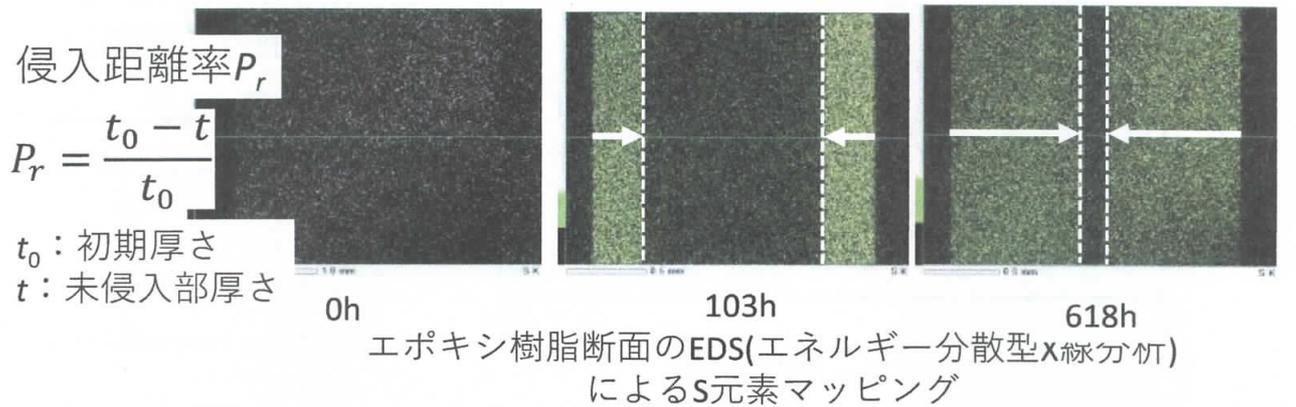
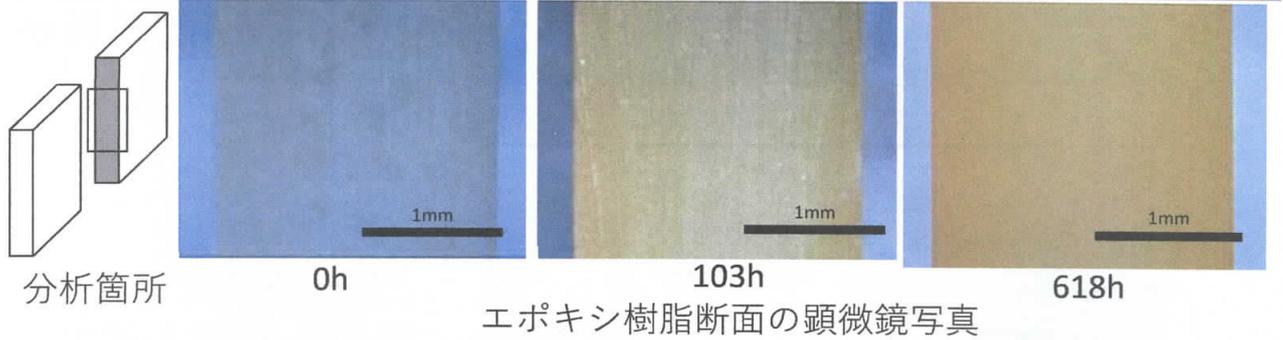
時間経過とともに

- 700h以前は溶液が樹脂内部へ浸入し、樹脂の質量は直線的に増加
- 700h以降も一定とならず、わずかに増加

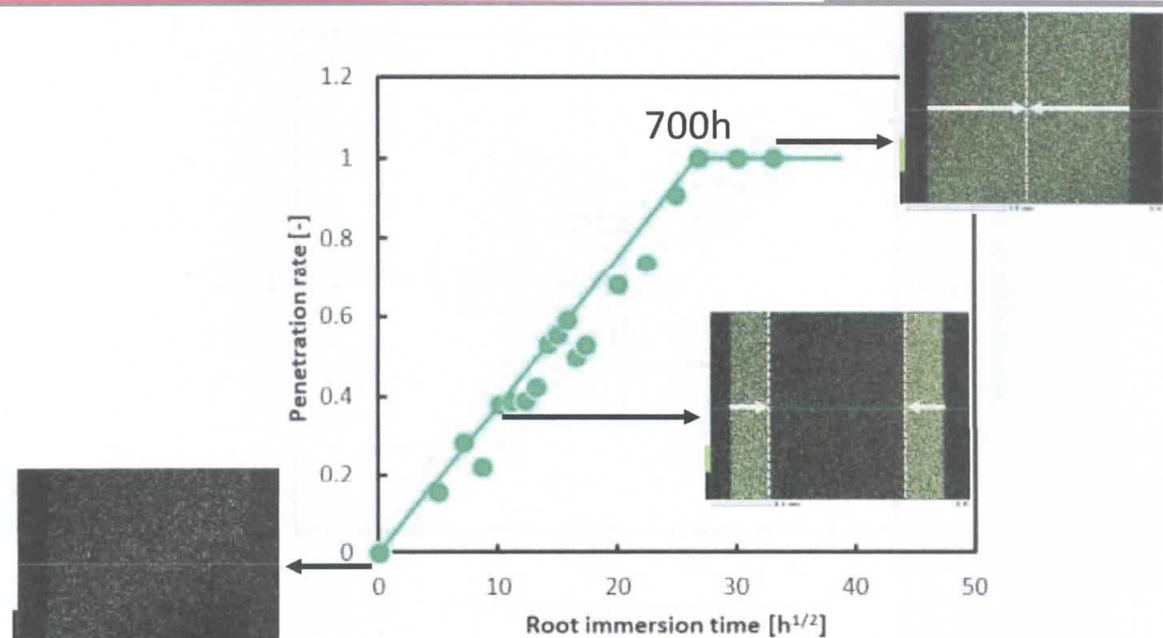


浸漬時間の平方根に対する質量変化率

# 断面分析（顕微鏡写真とEDS分析）

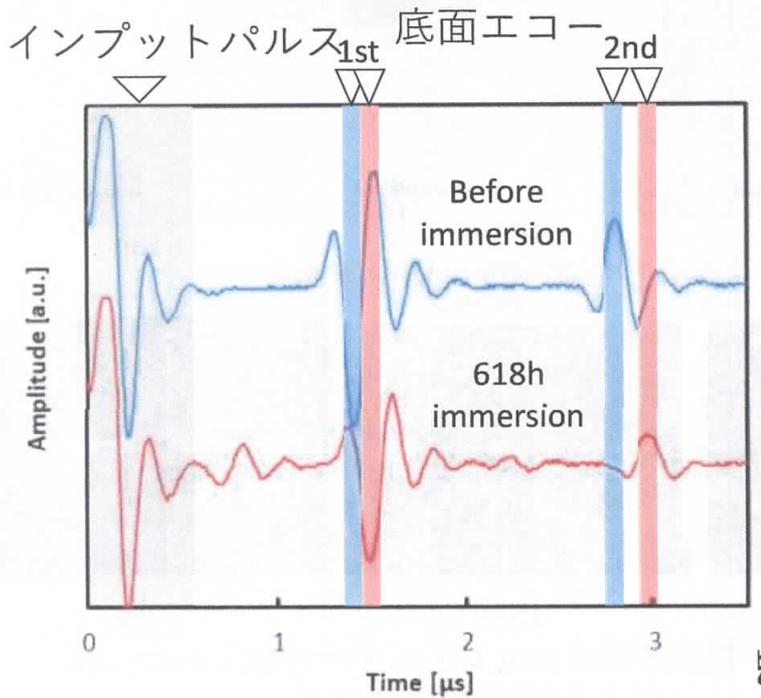


# 断面分析（侵入距離の変化）



浸漬時間平方根に対する硫酸侵入距離率

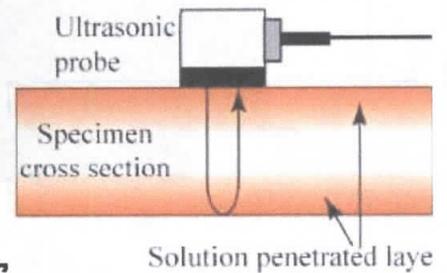
# 超音波波形



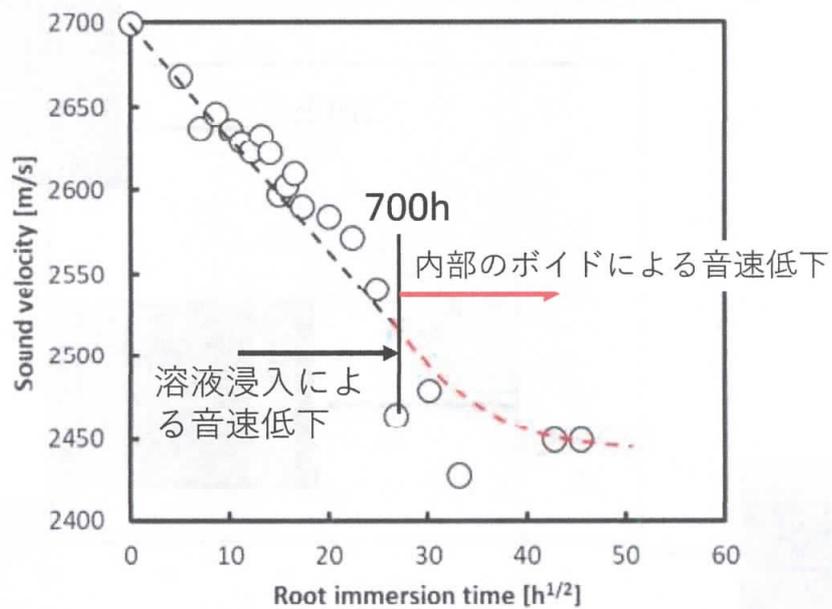
EDSにおいては明確な侵入部/未侵入部界面が確認できた



超音波波形では侵入部/未侵入部の明確な反射界面がない

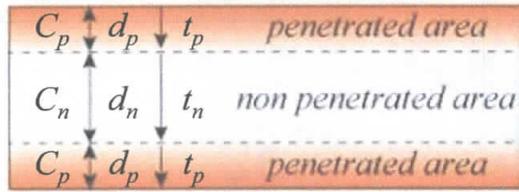


# 超音波音速の変化



浸漬時間の平方根に対する超音波音速

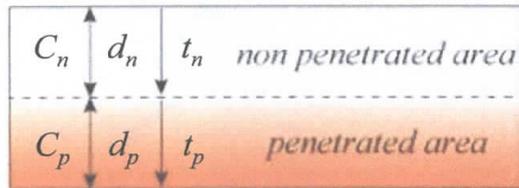
# 超音波による浸入量の評価モデル



添え字  $p$ : 浸入部  $n$ : 未浸入部

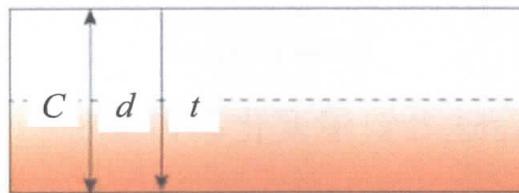
$C$ : 超音波音速

$d$ : 厚さ  $t$ : 超音波伝搬時間



超音波伝搬時間合計  $t = t_p + t_n$

厚さと音速の関係  $\frac{d}{C} = \frac{d_p}{C_p} + \frac{d_n}{C_n}$



浸入距離率  $\frac{d_p}{d} = \frac{C_p(C_n - C)}{C(C_n - C_p)}$

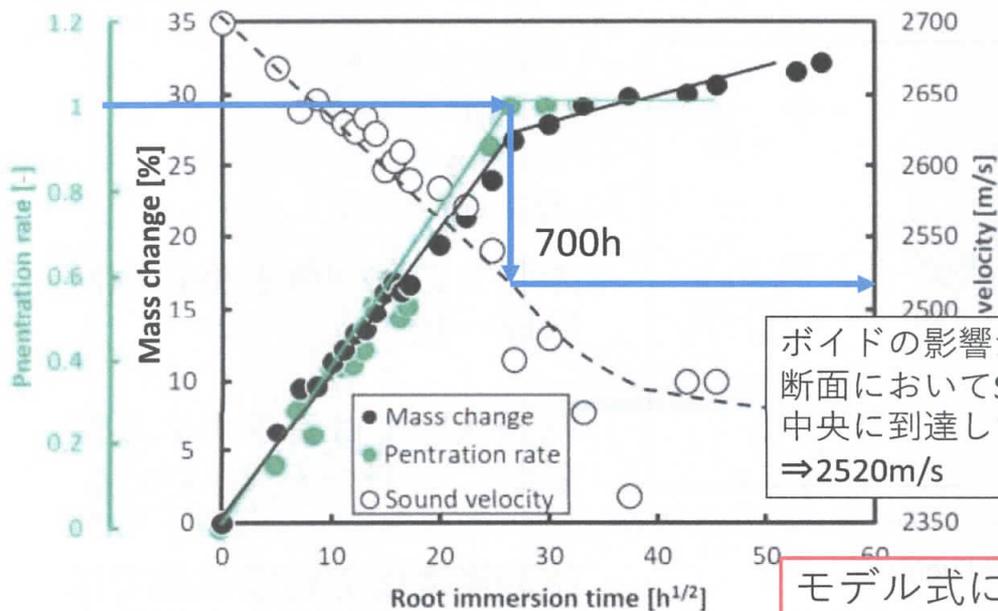
質量変化率  $M_c = \frac{d_p}{d} \times M_{sat}$

$M_{sat}$ : 飽和した時の質量変化率

複合則を応用した  
音速による浸入量評価モデル



# 超音波による浸入量の評価モデル



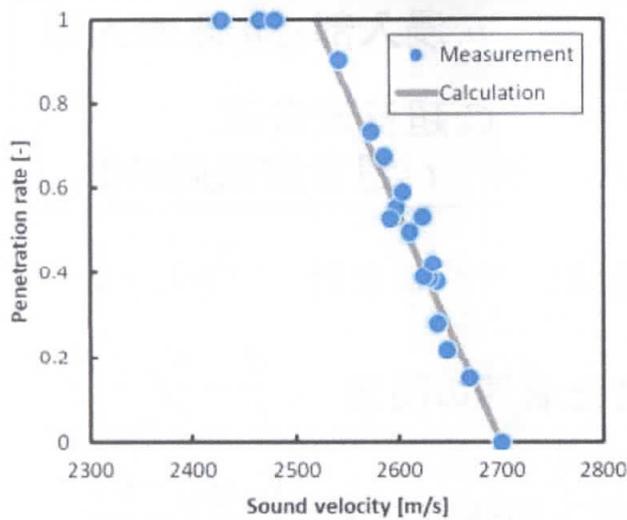
ボイドの影響が少なく、断面においてS元素が中央に到達した時の音速  $\Rightarrow 2520\text{m/s}$

浸漬時間の平方根に対する  
質量変化率、浸入距離率、超音波音速

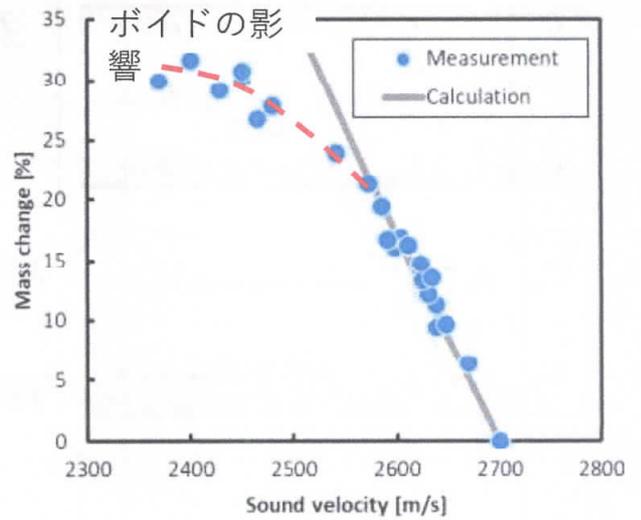
モデル式に代入した音速  
初期音速  $C_n$ :  $2700\text{m/s}$   
飽和時音速  $C_p$ :  $2520\text{m/s}$



# 超音波による浸入量の評価モデル

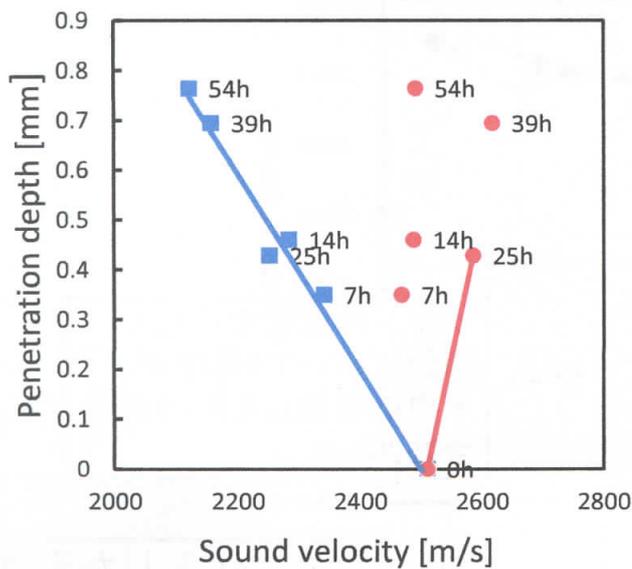


音速と侵入距離率の関係



音速と質量変化率の関係

# アミン硬化エポキシ樹脂 vs. 硫酸 乾燥状態



音速に対する硫酸浸入深さ

- 音速dry-実測値
- 音速wet-実測値
- 音速dry-推測値
- 音速wet-推測値

湿潤での実測値と推定値はほぼ一致

乾燥状態では音速の大小関係が  $C_p > C > C_n$  となった

硫酸浸漬後の乾燥状態ではアミン硬化エポキシ樹脂は硬くなる

## アミン硬化エポキシ樹脂内への硫酸水溶液の浸入挙動と超音波による評価（まとめ）

硫酸水溶液環境におけるアミン硬化エポキシ樹脂を取り上げ、樹脂内部に浸入した溶液の浸入量を超音波によって非破壊評価を実施した結果

- 樹脂内部を伝搬する超音波の音速、特に初期音速と飽和時の音速が分かれば、複合則を応用したモデル式によって、硫酸のような薬液の浸入程度を評価することができる。
- ただし、ボイドの発生が飽和時の音速を決定する際の障害となるので注意する必要がある。

## 紫外線劣化を生じたプラスチックの劣化形態と超音波による評価

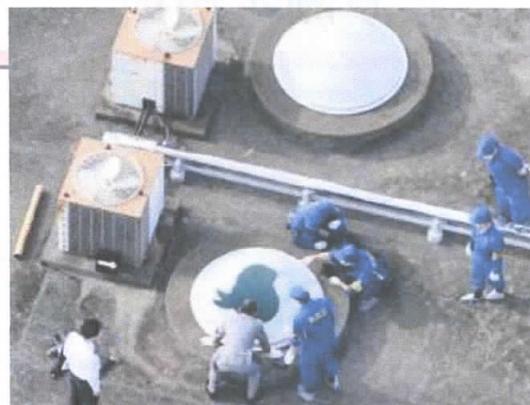
### □プラスチック材料

#### ■メリット

- ・耐食性に優れている
- ・軽量・比強度高い

#### ■デメリット

- ・熱に弱い
- ・種類によっては紫外線により劣化を生じる



採光ドームの事故\*

出典:\*共同通信 2008年6月18日

### □プラスチック材料の紫外線劣化への対策

- ①適切な材料の選定と使用
- ②使用中の適切な検査



これまでの検査は外観の変化程度  
⇒材料内部の損傷の検知に効果的な  
超音波検査の適用

# 実験方法 (試験材料、試験片、紫外線照射器)

## □試験材料

ポリプロピレン(PP)

(ディアライトPP-PX-2, 共栄樹脂株式会社製)

ポリエチレン(PE)

(PE H720A HDPEプレート/ナチュラル, タキロン株式会社製) **照射試験器**

ポリカーボネート(PC)

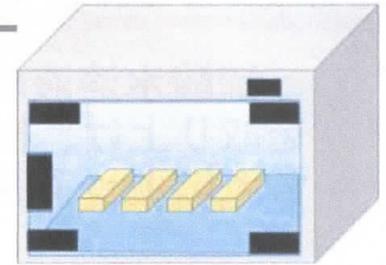
(PC1600, タキロン株式会社製)

ポリエチレンテレフタレート(PET)

(PET1600, タキロン株式会社製)

ポリアセタール(POM)

(POM1600, タキロン株式会社製)



## □試験片サイズ

20mm × 60mm × 2mm

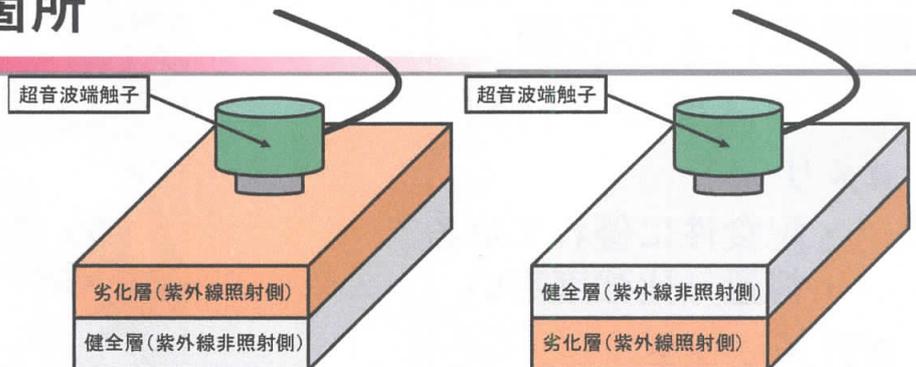
• 紫外線照射器 **照射試験概略図**  
殺菌燈式電気消毒器(UV-180日販工業社製)

電力6W 波長253.7nm



39

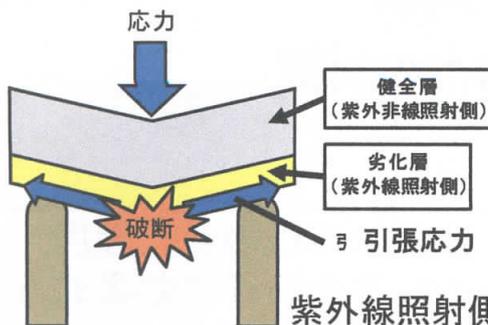
## 超音波測定箇所



## 評価方法

外観観察、質量変化、強度試験

□ 紫外線照射側から測定 □ 紫外線非照射側から測定



紫外線照射側を下部に設置し実施

3点曲げ試験 詳細

■ 支点間距離 : 36mm

■ 試験速度 : 2mm/min

■ 曲げ強さ

■ 曲げ弾性率

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

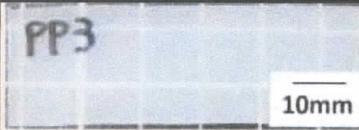
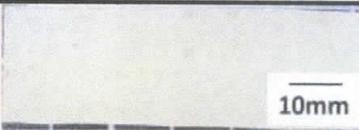
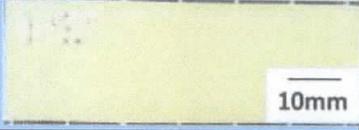
$$E = \frac{\sigma f_2 - \sigma f_1}{\epsilon f_2 - \epsilon f_1}$$

$\epsilon f_1 = 0.0005, \epsilon f_2 = 0.0025$

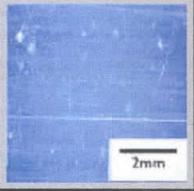
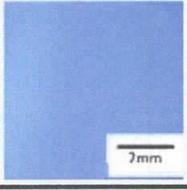
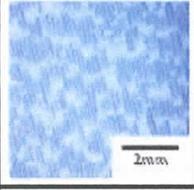
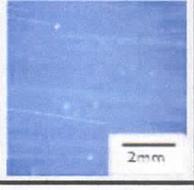
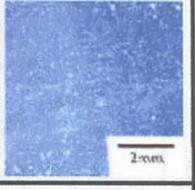
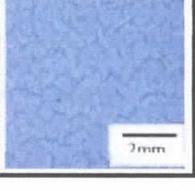


40

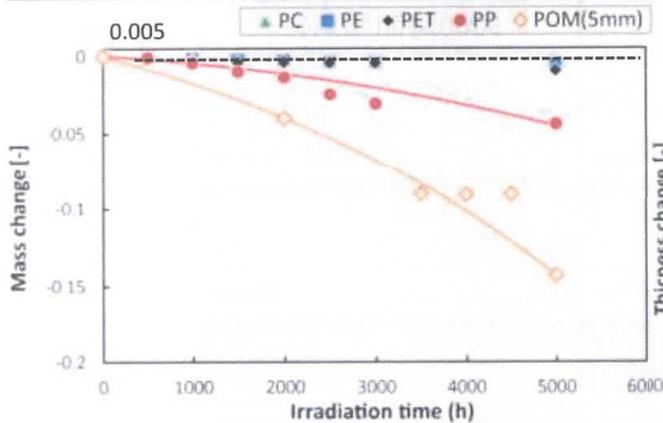
# 外觀觀察

	照射前	5000時間照射後
PP		
PE		
PC		
PET		
POM		

# 顕微鏡観察

	照射前	5000h 照射後			
			PC		
PP			PET		
PE			POM		

# 質量変化と厚さ変化

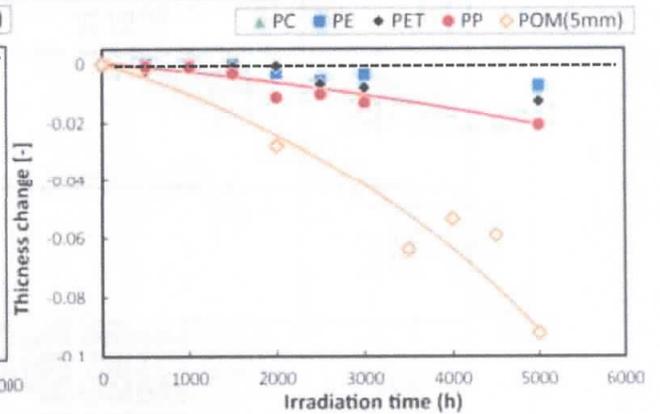


□ 質量変化

□ 変化率(-)

$$= \frac{\text{照射後の質量} - \text{照射前の質量}}{\text{照射前の質量}}$$

■ PP、POMにおいて質量の減少



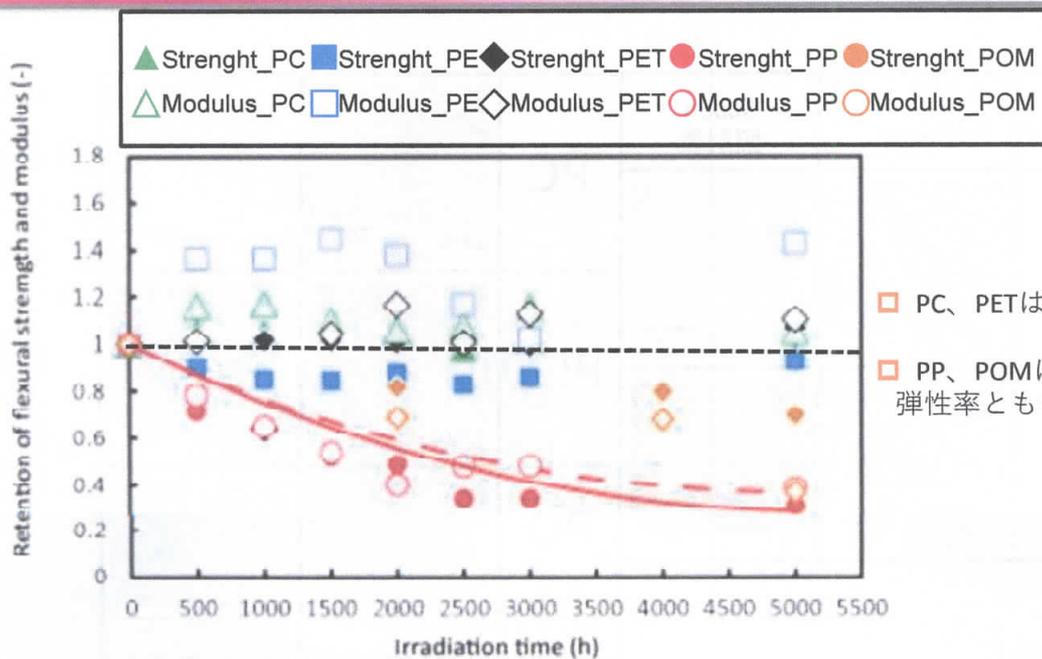
□ 試験片厚さ変化

□ 変化率(-)

$$= \frac{\text{照射後の試験片厚さ} - \text{照射前の試験片厚さ}}{\text{照射前の試験片厚さ}}$$

- PP、POMにおいて厚さの減少を確認
- 最も減少したPOMは最大約10%の減少

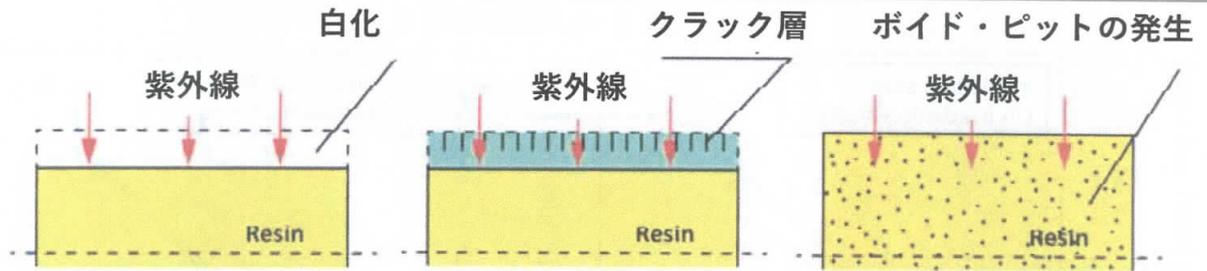
# 機械的特性



□ 曲げ強さ、弾性率の変化

- PC、PETは変化なし
- PP、POMは曲げ強度  
弾性率ともに減少傾向

# 紫外線劣化の三形態



□ 表面反応型

■ POM

- ・ 白化
- ・ 質量及び厚さの減少
- ・ 機械的な特性の低下

□ 劣化層形成型

■ PE

- ・ 黄色化

■ PP

- ・ 微細なクラックが発生
- ・ 質量及び厚さの減少
- ・ 機械的な特性の低下
- ・ 超音波特性の変化

□ ボイド・ピット発生型

■ PC

- ・ ボイド・ピットの発生
- ・ 機械的特性変化なし

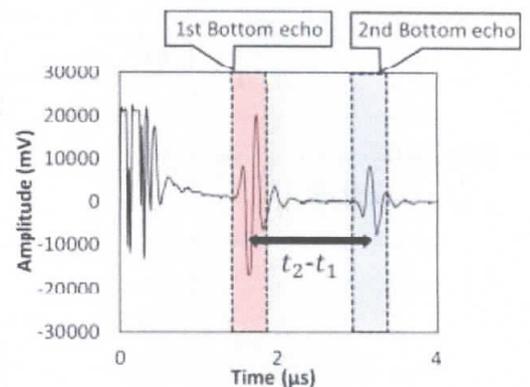
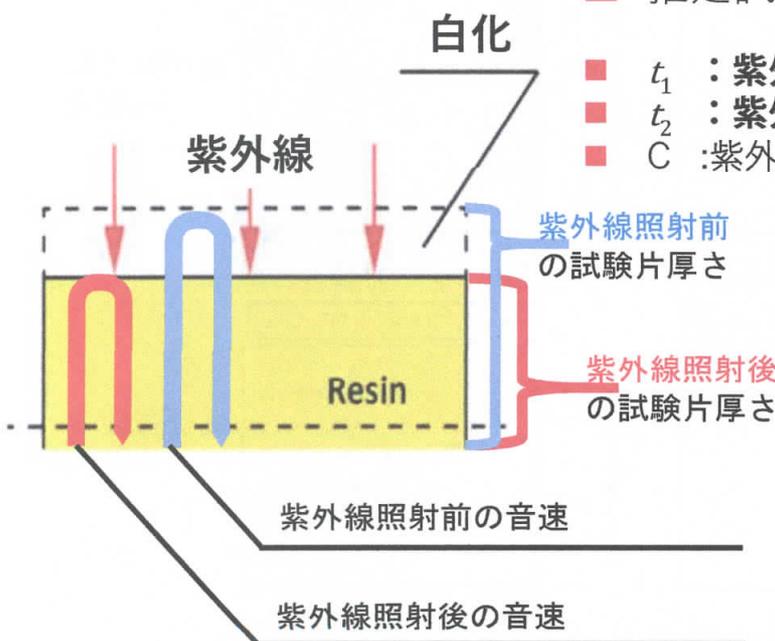
■ PET

- ・ ボイド・ピットの発生
- ・ 機械的特性変化なし

## 表面反応型：POMの推定厚さ

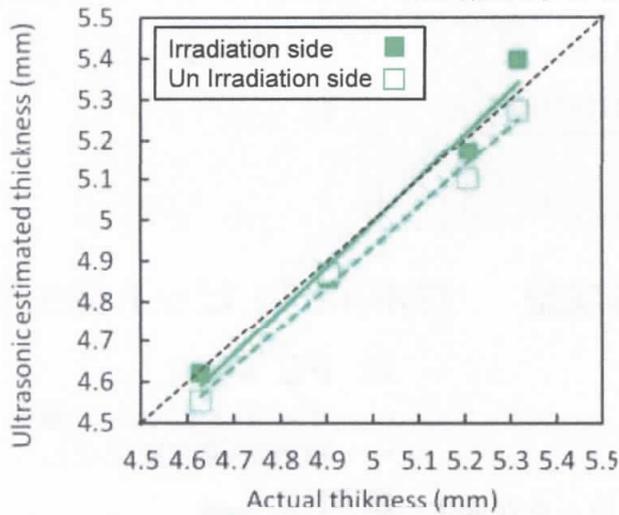
□ 推定試験片厚さ =  $\frac{(t_2 - t_1) \times C}{2 \times 10^3}$

- $t_1$  : 紫外線照射後の第一エコー時間
- $t_2$  : 紫外線照射後の第二エコー時間
- C : 紫外線照射前の音速

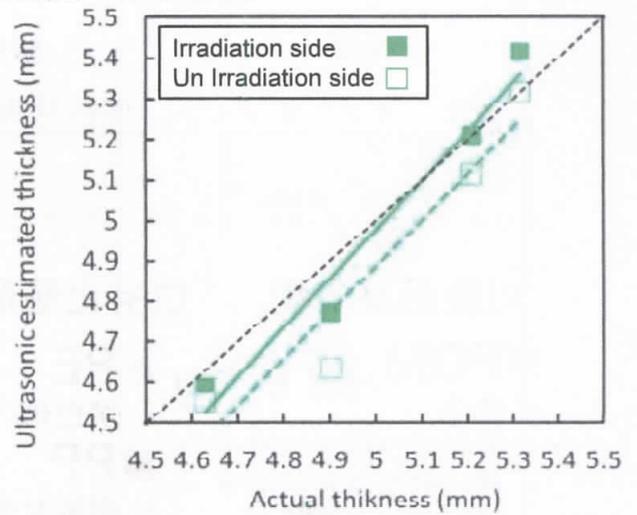


# 表面反応型：POMの推定厚さ

□ 推定厚さ vs. 実際の厚さ



□ スクエア波

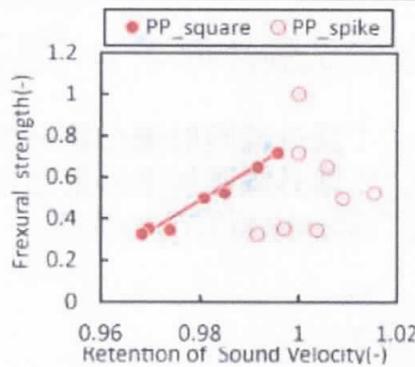


□ スパイク波

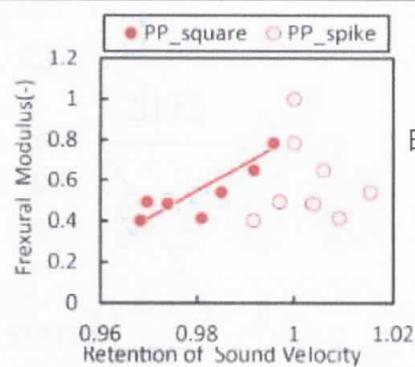
■ 非照射側から測定した場合、厚さが小さく見積もられる

# 劣化層形成型(PP) 照射側から測定

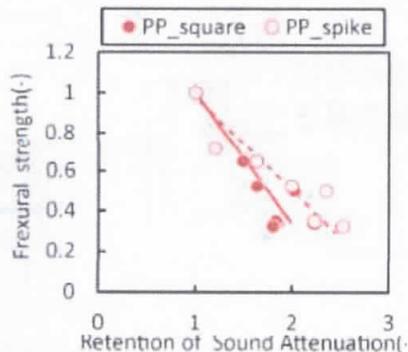
曲げ強度  
vs. 音速



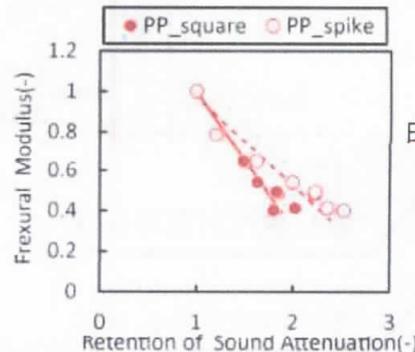
曲げ弾性率  
vs. 音速



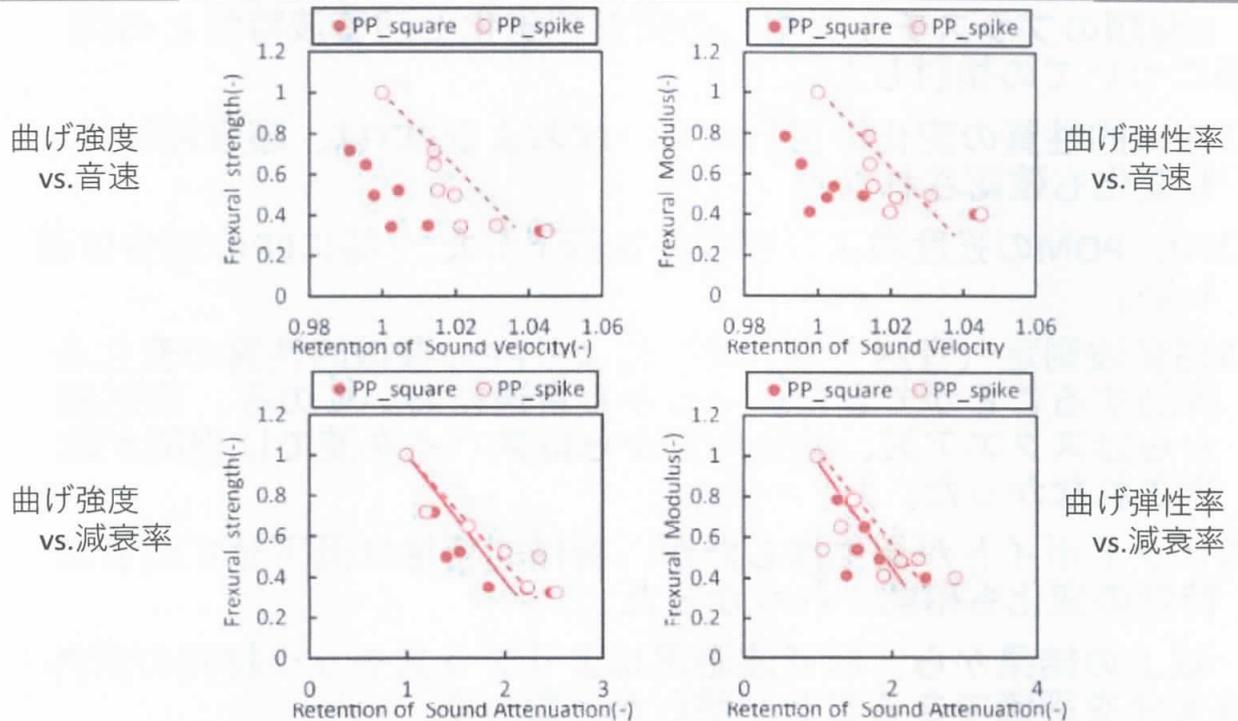
曲げ強度  
vs. 減衰率



曲げ弾性率  
vs. 減衰率



# 劣化層形成型(PP) 非照射側から測定



## 劣化層形成型(PP)の紫外線による劣化のまとめ

			PP			
質量変化			減少			
曲げ応力			低下			
弾性率			低下			
			照射側		非照射側	
外観の変化			光沢のある白色→白化		-	
顕微鏡観察			微細なクラックの発生			
音速 [m/s]	曲げ応力	スクエア波	○	0.950	△	-0.556
		スパイク波	×	0.116	○	-0.859
	弾性率	スクエア波	○	0.877	△	-0.496
		スパイク波	×	-0.063	○	-0.797
減衰率 [dB/m]	曲げ応力	スクエア波	○	-0.901	○	-0.838
		スパイク波	○	-0.934	○	-0.807
	弾性率	スクエア波	○	-0.970	○	-0.753
		スパイク波	○	-0.976	○	-0.718

劣化層形成型は超音波音速・減衰率によって評価可能出る。

\*0.7以上が○、0.4~0.7未満が△、0.4未満が×

## 紫外線劣化を生じたプラスチックの劣化形態と超音波による評価 まとめ

5種類のプラスチック材料の紫外線劣化と超音波特性との関係についての検討した結果

- 機械的性質の変化の見られないPCおよびPETは、超音波特性も変化も確認されなかった。
- PP、POMの強度および弾性率は低下した。特にPPの減少は著しい。
- 超音波測定（音速・減衰率）によりPPの機械的性質の変化を評価することができた。（しかし音速においてのみ、照射側からはスクエア波、非照射側からはスパイク波では相関が確認されなかった。）
- ピットボイドが発生はしたが、機械的特性は低下せず超音波特性の変化も確認されなかった。

以上の結果から、超音波測定によりプラスチック材料の紫外線劣化を評価できることが明らかとなった。

## 反発式硬度計による材料の評価

- 動的試験 ⇔ 静的試験
  - 負荷をインパクト(動的)として与えることにより、圧子(ハンマー)が失ったエネルギーに基づいて硬さを算出

- リバウンド法

- リーブ硬さ(Hardness Leeb, HL)

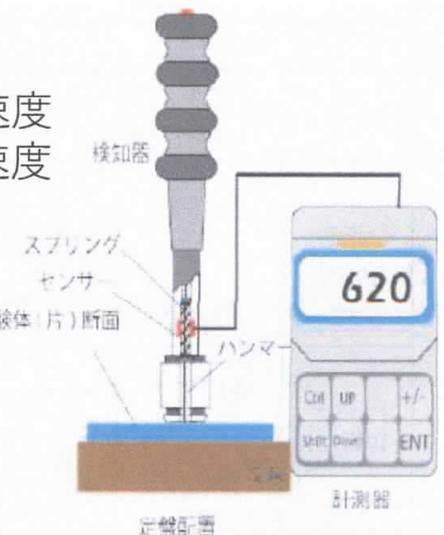
$$HL = \frac{V_R}{V_0} \times 1000 \quad \begin{array}{l} V_0 : \text{インパクトの速度} \\ V_R : \text{リバウンドの速度} \end{array}$$

- エネルギー損失率

$$\text{運動エネルギー } E = \frac{1}{2} m V_0^2, \quad E' = \frac{1}{2} m V_R^2$$

$$LE = 1 - HL^2 \times 10^{-6} \times 100$$

エネルギー損失率(%)



反発式硬度計の構成

# プラスチックの劣化と非破壊検査による評価

プラスチック(有機材料)が劣化するいくつかのケースについて報告した。劣化には様々な形態があり、その形態に即した非破壊検査が必要である。

また、完全に非破壊検査によって劣化を検知できないケースもあるため、今後、さらなる検討が必要である。

## 参考資料

- 1) 酒井ら；“FRP製化学プラント用貯蔵タンクの経年劣化検査技術”，検査技術，Vol.17，[11] (2012) pp.10-15 (解説)
- 2) 石原監修；“最新 腐食事例解析と腐食診断法”，(株)テクノシステム，分担 (2007) 久保内ら「第2編1章4節 有機材料の腐食・劣化診断」(2010)pp.361-369
- 3) M. KUSANO et al.;" Degradation Analysis of the FRP Storage Tank for Sodium Hypochlorite and Comparison with the Immersion Test in Laboratory", Journal of the Materials Science Society of Japan, Vol.52, No.6, (2015) pp.220-224
- 4) M. Kusano, et al., Simultaneous sound velocity and thickness measurement by the ultrasonic pitch-catch method for corrosion-layer-forming polymeric materials., Ultrasonics, Vol.82, pp.178-187 (2018)
- 5) 酒井;"エタノール環境におけるポリアミド6の劣化と超音波による評価”，材料の科学と工学，Vol.47, No.3, (2010) pp.136-140
- 6) 草野ら;"エタノール環境における熱可塑性樹脂の劣化と超音波による非破壊評価”，材料の科学と工学，Vol.47, No.3, (2015) pp.136-140
- 7) 滝澤ら、エタノール環境におけるプラスチックの劣化および乾燥回復挙動と超音波による評価、材料の科学と工学、Vol.54、No.6、pp.217-222 (2017)

