

高温超伝導コイルを用いた 鋼材非破壊検査

九州大学
大学院システム情報科学研究所
笹山 瑛由

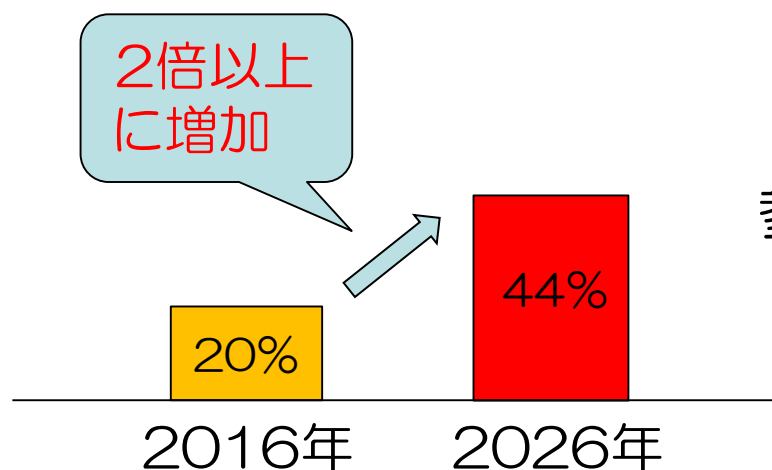


インフラにおける非破壊検査の必要性

高度成長期以降に整備された道路橋、トンネル、河川、下水道

建設後50年以上経過する割合が加速度的に増加

例) 建設後50年を経過した橋梁の割合*

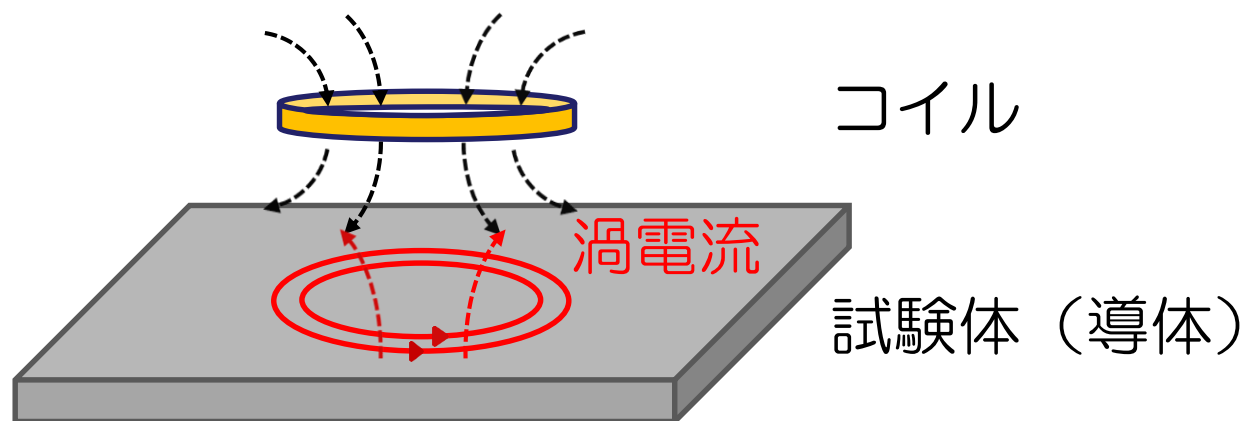


参考) 全国の橋梁数
約73万橋

高速にかつ簡便に検査できる必要がある

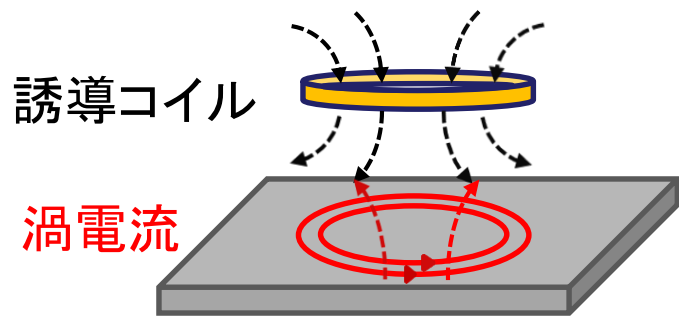
従来の非破壊検査技術

導体に対し簡便に非破壊検査できる方法に
渦電流探傷法がある



きずがあれば渦電流が変化
⇒渦電流により生ずる鎖交磁束も変化

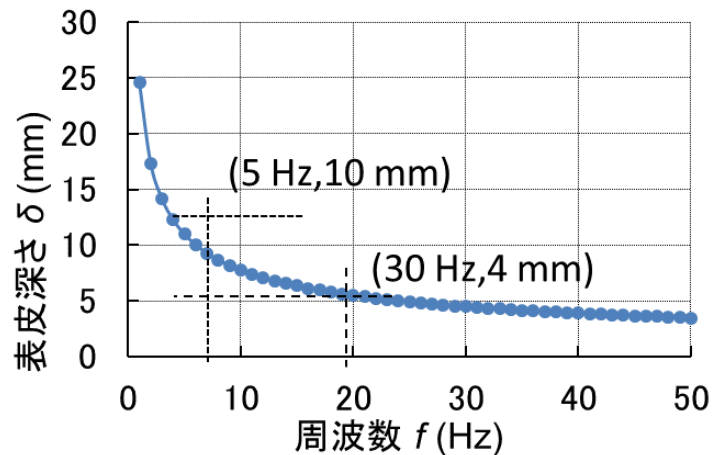
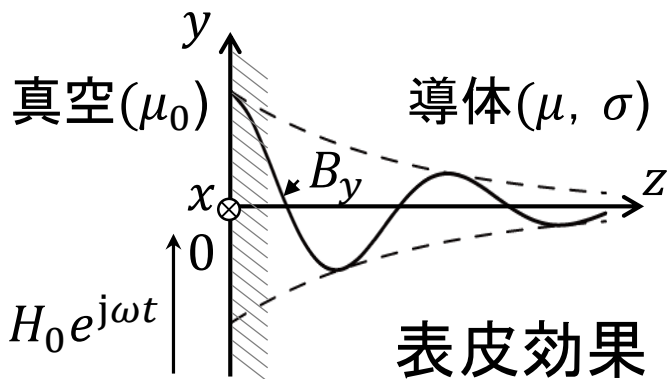
渦電流探傷法の問題点



表皮深さ

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_s \sigma}}$$

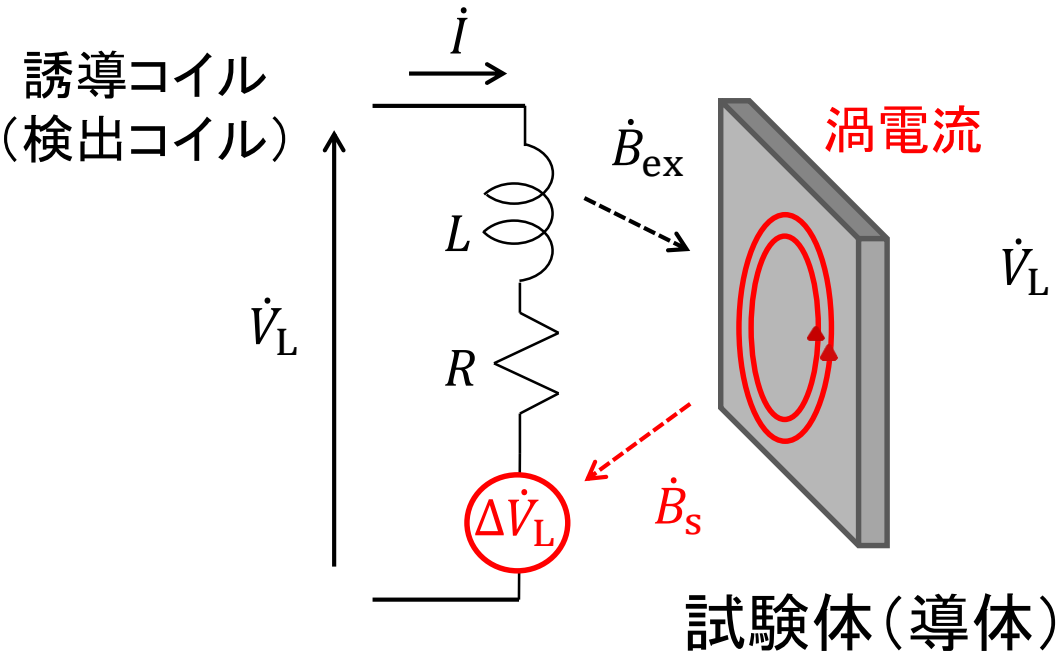
- f : 周波数
- μ_0 : 真空の透磁率
- μ_s : 比透磁率
- σ : 導電率



$$\mu_s = 200, \sigma = 4.1 \times 10^6 \text{ S/m}$$

透磁率の高い鉄鋼などでは表皮効果が顕著に表れるため、表面の探傷しかできなかった

低周波による渦電流探傷法の課題



磁性体によって生じる項

$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= (R + j\omega L)\dot{I} + \Delta\dot{V}_L \\ &= (R + j\omega L)\dot{I} + (\Delta R + j\omega\Delta L)\dot{I} \\ &= (R + \Delta R)\dot{I} + (j\omega L + j\omega\Delta L)\dot{I} \end{aligned}$$

- ・導体によって生じる ΔL と ΔR を計測
- ・試験体が磁性体の場合、表皮効果により、板厚が分厚い場合(>10 mm)は低周波(1~10 Hz)での計測が必要
- ・ ΔR は周波数に対して f^2 で増加するため低周波では小さくなる

- ・Cuコイル
 $R \gg \Delta R$ となるため、 ΔR の正確な計測が困難

高リフトオフ下の渦電流探傷法の課題

高リフトオフでも、きずの検査ができるようにしたい

⇒ 高リフトオフでも検出信号を大きくする必要がある



$$\dot{V}_L + \Delta\dot{V}_L = \{(R + \Delta R) + j\omega(L + \Delta L)\} \dot{I}$$

$|i|$ が大きいほど $|\Delta\dot{V}_L|$ も大きい ⇒ $|i|$ を大きくすればよい

解決方法

- 高温超伝導コイルを採用
- 電源にPWMインバータを採用

高温超伝導の特徴

高温超伝導：

液体窒素（沸点：77K）で超伝導状態

（低温）超伝導：

液体ヘリウム（沸点：4K）で超伝導状態

高温超伝導を採用するメリット

- ① 抵抗が小さいため高精度にインピーダンス変化を捉えられる
- ② 大電流を通電できるため低周波の高磁場の生成が容易
- ③ 損失が小さいため高効率

①インピーダンス変化を捉えやすい理由

- ・ 抵抗およびその変化が小さいため

超伝導コイル

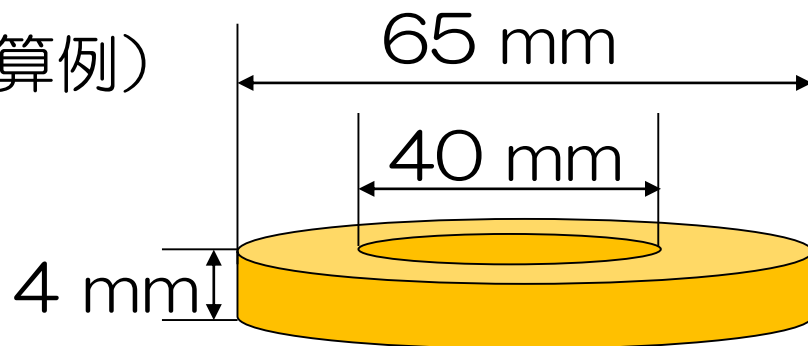
0 $\mu\Omega$ (-196°C)

銅コイル

約20,000 $\mu\Omega$ (20°C)

温度が 1°C 変化すると100 $\mu\Omega$ 変化

計算例)



30巻

超伝導コイルならば数 $\mu\Omega$ の変化を計測することが可能

②高磁場の生成が容易な理由

- ・ 許容電流密度が高いため

超伝導コイル

約200 A/mm²

銅コイル

約2 A/mm²

サイズを約1/100にできる

③高効率となる理由

- ・ コイル抵抗が非常に小さいため

計算例) 先ほどのコイルに100 Aを通電した場合

超伝導コイル

約0 W

銅コイル

約200 W (20 mΩ × (100 A)²)

↑ ターン数が増えるほど大きくなる

インバータとは

- 直流から交流に変換する装置
- 周波数や振幅を変更することが容易
- さまざまな変換方法があるが、
PWM (Pulse Width Modulation)
インバータが主流

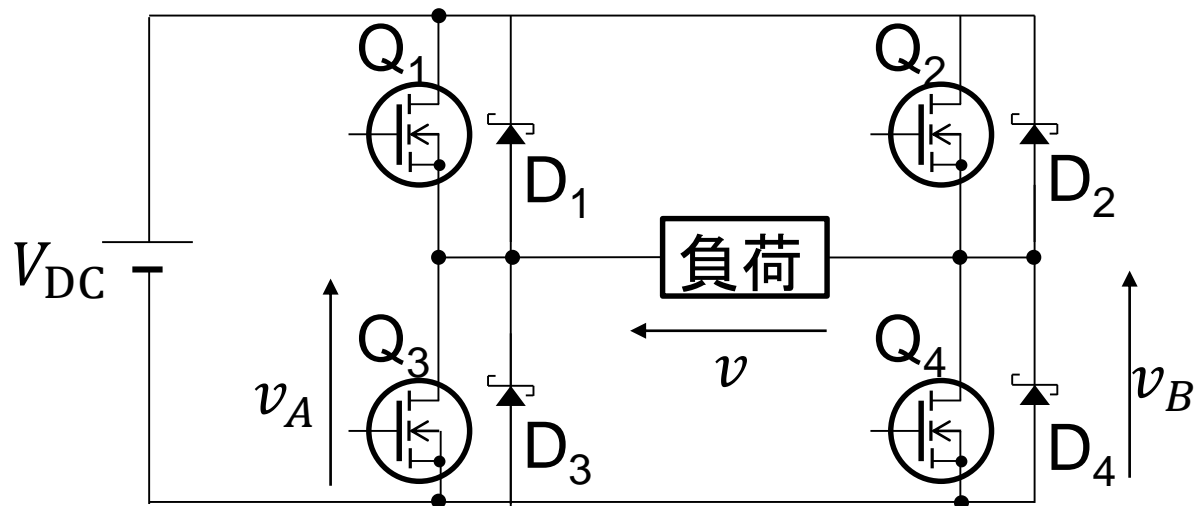
単相フルブリッジインバータ, PWMインバータ

回路構成

Q_1, Q_4 をON
 Q_2, Q_3 をON

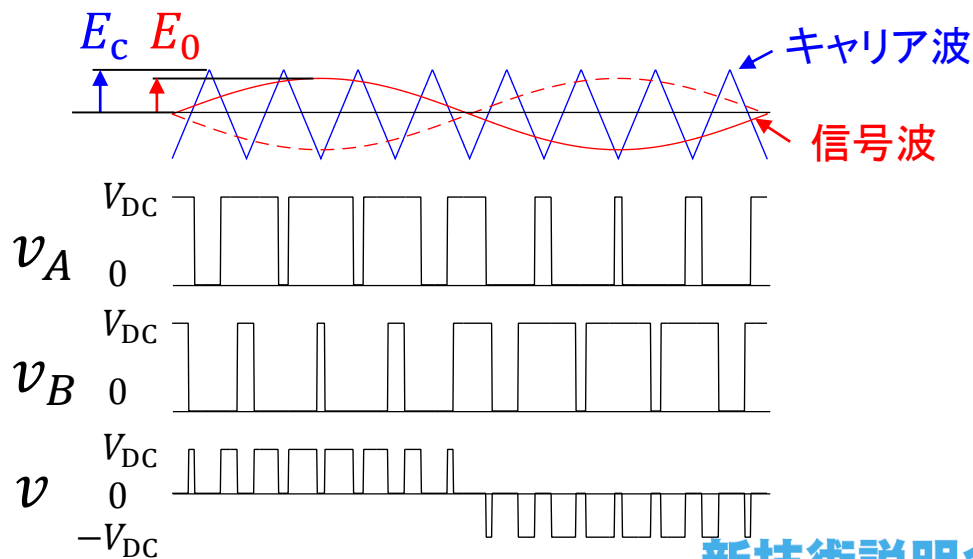


負荷に $E, -E$ の電圧を印加可能



出力電圧波形

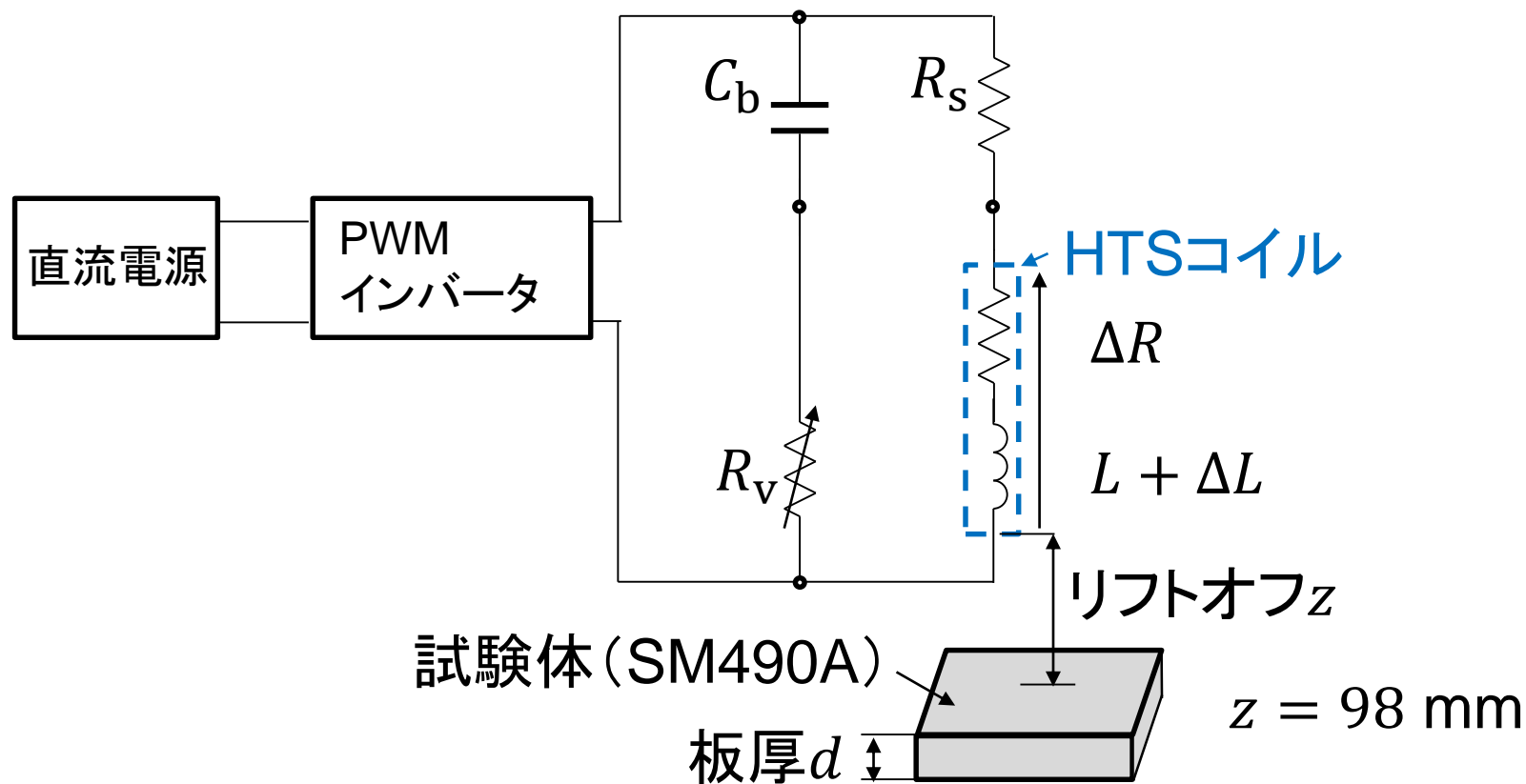
信号波の周波数成分を含む交流を出力



PWMインバータを採用するメリット

- ① 高効率
スイッチング素子のロスが無ければ
変換効率は100%
- ② 電源部分が軽量・小型化
大型のトランスを使用しなくて良い

検証例 (簡略図)



d を変更して測定

測定条件

コイル諸元

内径: 40 mm

外径: 65 mm

高さ: 3 mm

巻数: 30 turn

線材: ビスマス系超電導線DI-BSCCO Type ACT

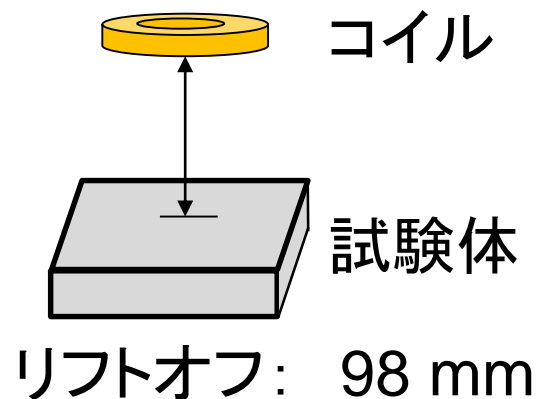
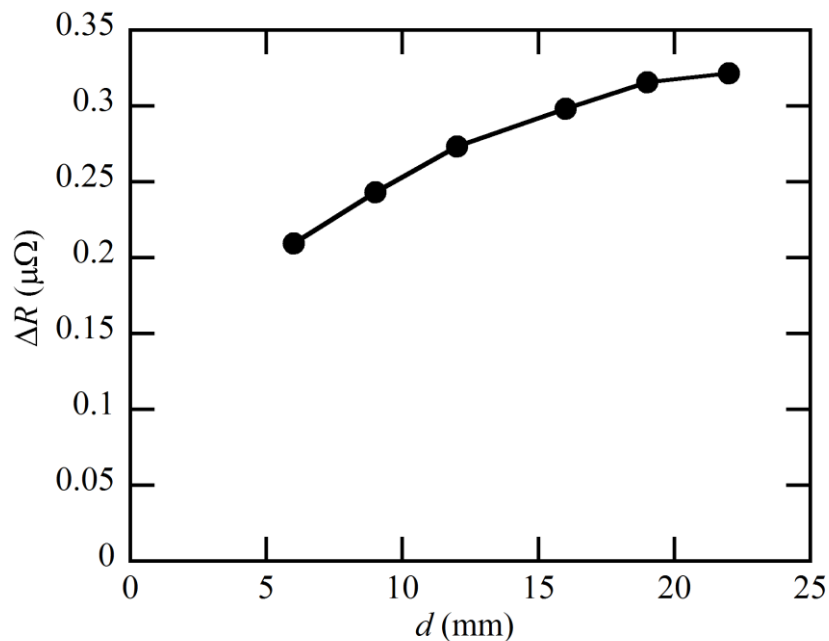


励磁条件

励磁基本波周波数: 4 Hz

キャリア周波数: 1 kHz

結果



ΔR が単調増加であることを確認



ΔR から板厚 d を推定可能

新技術の特徴・従来技術との比較

- 従来の渦電流探傷法は数kHz～数MHzでの高周波計測だが、新技術では1～100 Hzの低周波でも計測可
- ヨークを使用せず高磁場が生成可能
⇒高リフトオフ計測に向く
- 交流生成部分の重量やコストは1/10程度に削減できる可能性有

想定される用途（きず検知）

- コンクリートやアスファルト下の鋼床版のきず検知
- 地中に埋もれた鋼管のきず検知
- 保護材で包まれた鋼管のきず検知

想定される用途（その他）

- 金属やカーボンファイバなどの導電性の材料および部品メーカーにおける品質評価（導電率・透磁率の評価）
- 金属異物探査
- その他，高磁場・高感度磁気センサを必要とする分野

実用化に向けた課題

- 励磁電流や周波数、キャリア周波数、コイル寸法等の条件を変更した場合の影響を調査。
- 高温超伝導コイルを実環境で容易に計測できるようにする。

企業への期待

- システム全体のさらなる小型化
（ポータブル化）
- 冷却容器の小型化等、液体窒素の可搬技術を持つ企業との共同研究を希望

本技術に関する知的財産権

発明の名称：渦電流探傷装置

出願番号：特願2017-092788

発明の名称：板厚測定装置及び板厚測定方法

出願番号：特願2017-008977

出願人：九州大学

発明者：笹山 瑛由、圓福 敬二

産学連携の経歴

2014年- 内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」の
「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」
（管理法人：科学技術振興機構（JST））
の研究開発に採択（分担）

お問い合わせ先

九州大学学術研究・産学官連携本部
知的財産グループ

T E L 092-832-2128

F A X 092-832-2147

e-mail transfer@airimaq.kyushu-u.ac.jp