



電磁超音波を用いた配管ヘルスマニタリングセンサの研究

田川, 明広

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2011-03-25

(Date of Publication)

2011-10-19

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5240

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005240>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



氏 名 田川 明広
博士の専攻分野の名称 博士（学術）
学 位 記 番 号 博い第 5240 号
学位授与の要件 学位規則第 5 条第 1 項該当
学位授与の日付 平成 23 年 3 月 25 日

【 学位論文題目 】

電磁超音波を用いた配管ヘルスマニタリングセンサの研究

審 査 委 員

主 査 教 授 小島 史男
教 授 的場 修
教 授 阪上 隆英

氏名	田川 明広		
論文題目	電磁超音波を用いた配管ヘルスマニタリングセンサの研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	小島 史男
	副査	教授	的場 修
	副査	教授	阪上 隆英
	副査		

印

要 旨

本論文は第1章を緒論、第6章を結論として全6章で構成されており、これまで従事してきた各研究内容について論じている。

第1章は全体の緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、これまでの検査・計測技術について本研究の対象である「電磁超音波探触子 (EMAT) によるハイブリッドセンシング」を用いた配管減肉、水温、欠陥の各測定原理などについて、従来の計測原理と新たに提案する計測原理を述べている。2.1は従来手法として、EMATの超音波発生原理、垂直EMATの原理、斜角EMATの原理、減肉を測定するパルスエコー (PE) 法と電磁超音波共鳴 (EMAR) 法について述べている。2.2では、新たに提案する手法としてPE法で測定したデータを用いてEMAR法と同程度の精度で測定可能なパルスエコー共振 (PER) 法、1つのセンサで複数の物理量を測定するハイブリッドセンシングの概念、乱反射の多い体系でも受信波を評価できる相互相関法を用いた水温測定法、反射波の周波数ピークを用いて欠陥位置を同定する欠陥モニタリング用位置同定法を提案している。

第3章では、配管減肉モニタリング用センサについて考察している。3.2では配管減肉を高温でも高精度に測定することができるEMATの設計・試作について考察している。3.3では3.2で試作したEMATを用いて、配管減肉を測定する試験体系と高温時に発生する磁石からの反射波特有の周波数成分を除去するノイズ除去法について考察している。3.4では3.3で示した試験体系により常温試験、高温試験、耐久性試験を行っている。測定では2.2で示したPE法と新たに提案するPE法で取得した受信波形の共振周波数で減肉量を評価するPER法を比較することにより高温環境下で高精度の測定が可能であることを考察している。加えて、実際に原子力発電所に設置する方法についても考察している。

第4章では、1つのセンサで複数の物理量を測定するハイブリッドセンシングについてEMATを用いて実現する研究について考察している。4.1の緒言に続いて、4.2においては、ハイブリッドセンシング可能なEMATの設計・試作について考察している。4.3では4.2で試作したEMATを用いて、配管の減肉量、配管表面温度、配管内水温を測定する試験体系や測定フローについて考察している。4.4は、4.3で示した試験体系により配管表面温度の測定となるコイルの直流抵抗の測定、減肉測定、水温測定試験を行っている。測定においては、2.2で示したハイブリッドセンシング概念を用い、EMAT構成材料であるコイルの直流抵抗の温度依存性を利用した、配管表面温度の測定、高温でも磁石ノイズのないEMATによる減肉測定、既知の温度による受信波形を基準とし、相互相関係数により水温測定が可能であることを示している。

第5章では、EMATを用いて欠陥モニタリングを行うことができるダブルコイル型EMATを提案し、その欠陥検出精度について考察している。5.2では、高温でも高い磁性を有する磁石の選定と高磁場を実現するHalbach磁石構造、機械的公差を行わなくとも欠陥検出可能なダブルコイル構造の設計を行い、欠陥モニタリング可能なEMATの設計・試作について考察している。5.3では5.2で試作したEMATを用いて、欠陥測定する試験条件や試験体系について考察している。5.4では5.3で示した試験体系により欠陥モニタリングに必要な性能を確認する周波数依存性の確認、距離振幅特性試験、欠陥検出特性試験を行っている。周波数依存性の確認では、EMATコイルを励磁する交流電流の周波数により欠陥検出感度に及ぼす影響を考察し、最適な励磁周波数の選定を行っている。距離振幅特性試験では、モニタリング時に配置するEMATと欠陥との最適な設置位置を決定するために、設置距離と欠陥信号である受信波形の振幅との最適な距離を選定している。最適化した周波数と設置距離を用いて、2.2で示した反射波の周波数ピークを用いて欠陥位置を同定する新しい手法により欠陥位置を同定し、測定限界となる欠陥の大きさを考察している。加えて、従来用いられてきた手法との性能比較を考察している。

第6章は結論であり、本論文内容を総括している。

氏名	田川 明広
<p>本論文の大きな特長は「ハイブリッドセンシング」をキーワードに提案した計測法による計測精度の向上に関する「机上のみでの研究」ではなく、さらに「机上検討で提案した各計測法を適用したセンサを製作し実環境下での性能試験、耐久試験を経て、そのデータを考察することにより提案した手法の有用性の実証をおこない、その結果として高精度な測定が可能だけでなく経済的にも合理的なセンシング技術を生み出していく研究内容である」ことであり、企業における研究として社会に貢献する価値のある研究内容である。</p>	
<p>本研究で得られた主な結果と成果を示す。本研究は、原子力発電所の動脈とも言える静的機器の冷却系配管を対象とした局所モニタリング手法の研究を行ったものである。モニタリング対象は軽水炉でも高速炉でも同じ環境である水・蒸気系配管を選び、配管減肉、配管温度、配管内流体温度、き裂欠陥の4種類をモニタリング対象としている。</p>	
<p>「配管減肉モニタリング用センサの研究」では、提案したパルスエコー共振 (PER) 法により200℃の高温環境下でも高精度な測定を行うことを確認している。従来EMATによるパルスエコー (PE) 法の測定精度は4±0.3mmであったが、PER法を用いた場合、炭素鋼、ステンレス鋼ともに2±0.1mm以下の測定精度で減肉測定可能であることを確認している。実環境である200℃の高温特性試験と最大使用期間である18ヶ月に余裕を持たせた高温耐久性試験を行った結果、温度150℃以上では磁石によるノイズが大きくなることがわかり、磁石ノイズの除去フィルタが必要であることがわかったが、15000時間 (21ヶ月) 以上の高温耐久性が確認されている。これらの結果から、実環境下で高精度な減肉モニタリング可能な手法と手段を提案している。</p>	
<p>「ハイブリッドセンシング用センサの研究」では、配管表面温度、配管減肉量および内部流体温度を測定対象とするハイブリッドセンシング用EMATの開発に関してまとめている。この3つの物理量を1組のEMATで測定するが、縦波と横波を同時に受信するためにセンサ構造の見直しを行い、各物理量測定を試験により確認している。配管表面温度計は、EMATコイルに流れる直流抵抗値の変化を測定しており、試験の結果、実際の配管表面温度とEMATコイルの直流抵抗値の間に決定係数として0.99以上の一致を確認している。次に配管減肉では、高温でも磁石ノイズを発生しないコイル構造に変更することで、磁石ノイズフィルタがなくとも200℃で2±0.03mmの減肉測定精度が得られる改良を行っている。最後に内部流体として90℃までの水温の測定試験を行っている。水中の超音波受信波は配管内で乱反射した合成波形であるため、温度既知の基準波形と受信波形の相互相関係数を求めることで受信位置を把握し、音速変化を温度に変換することで水温測定が可能であることを確認している。ハイブリッドセンシングのメリットは、同一箇所でも測定できることである。通常、他の場所に別途温度計を設置するか補償銅線が必要であるが、ハイブリッドセンシングEMATの場合、場所に依存する精度誤差はない。また、自ら温度を測定するため、温度補正を1つのセンサで行うことが可能である。これは多くのデータをマルチモーダルに検出したいプラント診断には重要である。また、各EMAT部品は安価であり、1プラントあたり数千から数万の設置を必要とする実プラント適用を考慮した場合経済的にも優位であり、スケールメリットにより一つのセンサは、約10ドル以下で製造できると推算している。本研究の結果から、経済的で合理的に高精度な測定ができる手法と手段を提案できたと認められる。</p>	
<p>「欠陥モニタリング用センサの研究」では、欠陥モニタリング用EMATについて、モニタリング可能なダブルコイルEMATを提案している。従来研究されてきた、欠陥検出用EMATは機械的スキャンが必要であったが、EMAT設置に大きなコストが発生し、装置自体も大きくなるためモニタリングを行うには機械的スキャンはできない。そこで、従来研究されていたシングルコイル型EMATではなく送信を分割したダブルコイル型EMATを研究している。磁石構造は従来の磁石構造であるPPM構造より1.4倍の磁束密度となるHalbach構造を採用している。また、欠陥同定法に用いる超音波の屈折角においては、受信波を周波数分析したピーク周波数を用いて算出する手法を用いることで同定精度が向上することが確認している。その結果、压力容器板厚に相当する50mmと配管に相当する14.3mmの板厚に対し、幅12.5mm、深さ20%に相当する欠陥を信号対ノイズ比2以上で検出できることを確認している。以上の結果から、機械的スキャンなく定点で欠陥モニタリングを高精度で測定できる手法と手段を提案していると認められる。</p>	
<p>本研究は、状態監視技術についてセンサ融合の見地からシステム構成を行う新手法の研究を行ったものであり、原子力発電所の運転中モニタリングの課題である、「放射性廃棄物を出さない手法の選定」、「高温環境下での高精度測定」、「原子炉運転中温度への耐性」、「より多くの情報が1つのセンサで得ることでプラント診断を行う際に経済的に合理的かつ高精度に測定できるということ」という4つの解決すべき課題を実使用環境下での試験を行うことで解決した点に優れた特徴を有している。このように、本論文ではセンサ融合による状態変化の把握を可能とするセンサ技術の研究を実施し、モニタリングに適用可能なセンサと測定手法を提案し、実験的に実用化条件を満たすことを検証したことに重要な知見を得たものとして、価値ある集積であると認める。よって、学位申請者の田川明広は、博士 (学術) の学位を得る資格があると認める。</p>	

論文内容の要旨

氏 名 田川 明広

専 攻 工学研究科 情報知能学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

電磁超音波を用いた配管ヘルスマニタリングセンサの研究

本論文は第 1 章を緒論、第 6 章を結論として全 6 章で構成されており、これまで従事してきた各研究内容について論じる。以下に各章の概要を示す。

第 1 章は、緒論であり本研究の背景と目的について述べる。1.1 では、運転中モニタリングの必要性について述べる。1.2 では、本論文内で研究対象とする電磁超音波探触子 (EMAT) の歴史について述べる。1.3 では、研究目的を述べる。

第 2 章は、これまでの検査・計測技術について本研究の対象である「電磁超音波探触子によるハイブリッドセンシング」を用いた配管減肉、水温、欠陥の各測定原理などについて、従来の計測原理と新たに提案する計測原理を述べる。2.1 は従来手法として、EMAT の超音波発生原理、垂直 EMAT の原理、斜角 EMAT の原理、減肉を測定するパルスエコー (PE) 法と電磁超音波共鳴 (EMAR) 法、熱膨張について述べる。2.2 では、新たに提案する手法として PE 法で測定したデータを用いて EMAR 法と同程度の精度で測定可能なパルスエコー共振 (PER) 法、1 つのセンサで複数の物理量を測定するハイブリッドセンシングの概念、乱反射の多い体系でも受信波を評価できる相互相関法を用いた水温測定法、反射波の周波数ピークを用いて欠陥位置を同定する欠陥モニタリング用位置同定法を提案する。

第 3 章は、配管減肉モニタリング用センサについて考察する。3.1 は緒言である。3.2 では配管減肉を高温でも高精度に測定することができる EMAT の設計・試作について考察する。3.3 は 3.2 で試作した EMAT を用いて、配管減肉を測定する試験体系と高温時に発生する磁石からの反射波特有の周波数成分を除去するノイズ除去法について考察する。3.4 では 3.3 で示した試験体系により常温試験、高温試験、耐久性試験を行う。測定は 2.2 で示した PE 法と新たに提案する PE 法で取得した受信波形の共振周波数で減肉量を評価する PER 法を比較することにより高温環境下で高精度の測定が可能であることを考察する。加えて、実

際に原子力発電所に設置する方法について考察する。3.5 は結言である。

第 4 章は、1 つのセンサで複数の物理量を測定するハイブリッドセンシングについて EMAT を用いて実現する研究について考察する。4.1 は緒言である。4.2 はハイブリッドセンシング可能な EMAT の設計・試作について考察する。4.3 は 4.2 で試作した EMAT を用いて、配管の減肉量、配管表面温度、配管内水温を測定する試験体系や測定フローについて考察する。4.4 は、4.3 で示した試験体系により配管表面温度の測定となるコイルの直流抵抗の測定、減肉測定、水温測定試験を行う。測定は 2.2 で示したハイブリッドセンシングの概念を用い、EMAT 構成材料であるコイルの直流抵抗の温度依存性を利用した、配管表面温度の測定、高温でも磁石ノイズのない EMAT による減肉測定、既知の温度による受信波形を基準とし、相互相関係数により水温測定が可能であることを考察する。4.5 は結言である。

第 5 章は、EMAT を用いて欠陥モニタリングを行うことができるダブルコイル型 EMAT を提案し、その欠陥検出精度について考察する。5.1 は緒言である。5.2 は高温でも高い磁性を有する磁石の選定と高磁場を実現する Halbach 磁石構造、機械的走査を行わなくとも欠陥検出可能なダブルコイル構造の設計を行い、欠陥モニタリング可能な EMAT の設計・試作について考察する。5.3 は 5.2 で試作した EMAT を用いて、欠陥測定する試験条件や試験体系について考察する。5.4 は 5.3 で示した試験体系により欠陥モニタリングに必要な性能を確認する周波数依存性の確認、距離振幅特性試験、欠陥検出性試験を行う。周波数依存性の確認では、EMAT コイルを励磁する交流電流の周波数により欠陥検出感度に及ぼす影響を考察し、最適な励磁周波数の選定を行う。距離振幅特性試験では、モニタリング時に配置する EMAT と欠陥との最適な設置位置を決定するために、設置距離と欠陥信号である受信波形の振幅との最適な距離を選定する。最適化した周波数と設置距離を用いて、2.2 で示した反射波の周波数ピークを用いて欠陥位置を同定する新しい手法により欠陥位置を同定し、測定限界となる欠陥の大きさを考察する。加えて、従来用いられてきた手法との性能比較を考察する。5.5 は結言である。

第 6 章は結論であり、本論文内容を総括する。

以上

指導教員 小島 史男

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。