

平成 21 年 3 月 27 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760276
 研究課題名（和文）
 燃料電池用水素燃料タンクの早期欠陥検出システム
 研究課題名（英文）
 Defect Detection System for Hydrogen Fuel Tank for Fuel Cell
 研究代表者
 廿日出 好（HATSUKADE YOSHIMI）
 豊橋技術科学大学・工学部・助教
 研究者番号：90339713

研究成果の概要：本研究では、従来の検査技術の適用が困難な、燃料電池用水素燃料タンクの欠陥検出実現のため、現在最も高感度な SQUID 磁気センサを用いたタンク欠陥早期検出装置の開発を行った。本装置は、磁気シールドのない環境でも動作する、高磁場耐性・高感度特性をもつ SQUID 磁気センサを開発・使用しており、本センサをロボットアームに搭載して、タンクを低周波数励磁しながらスキャンすることにより、タンク内亀裂検出が可能なことを示した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム・非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

現在、クリーンエネルギーとして燃料電池が注目されており、燃料電池の使用例の一つとして水素燃料を搭載した燃料電池自動車がある。この自動車の実用化・普及のためには、インフラ整備、低コスト化などに加えて、安全性の保証が必須とされている。これはタンクに欠陥が発生したときに漏洩する水素燃料が爆発の危険性を有するためであり、十分な安全性を確保するため、貯蔵タンクとして高圧（35MPa）での繰り返し長期使用に耐えるアルミ合金・カーボン FRP（以下 CFRP）複合タンクが開発・供試されている。この複

合タンクは、高圧で繰り返し使用されることを考慮して、十分な厚さ・強度をもつアルミタンクを複合材料 CFRP で外側から補強したものであり、タンク製造時における安全は確保されている。しかし、使用中のタンクの安全検査は、タンクの肉厚・積層構造のため渦電流や超音波を用いた従来の技術では困難であり、タンク内の繰り返し負荷によって亀裂欠陥などが進展する以前の微小な段階で早期検出できる検査方法があれば、燃料電池自動車の安全性を向上させ、その普及に大きく貢献できると考えられる。

2. 研究の目的

SQUID 磁気センサは、金属の内部深くまで到達可能な低周波数の帯域において、現在最も高い磁気感度を有するセンサであり、研究代表者はこの SQUID 磁気センサを用いた電磁的非破壊検査技術の研究・開発に携わってきた。そこで、本研究では、SQUID 磁気センサと低周波数励磁を組み合わせた実用的非破壊検査システムを開発し、燃料電池用アルミ・CFRP 複合水素燃料タンクの早期欠陥検出の実現を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、アルミ・CFRP 複合水素燃料タンクの早期欠陥検出技術の確立を最終目的とした。この実現のため、以下の課題に関して研究を行った。

- (1) SQUID 磁気センサと低周波数励磁による積層型タンク検査手法の確立
- (2) センサ移動のための環境磁気雑音キャンセル技術の開発
- (3) 励磁磁場に曝されても安定動作する高性能 SQUID 磁気センサの開発
- (4) 実用的検査システムプロトタイプの開発とデモ

(1)に関しては、肉厚なタンクの深部まで励磁して、可能な限り大きな欠陥磁気応答信号を検出するため、タンクの厚さに対応した最適な励磁周波数を明らかにし、アルミ・CFRP 複合水素燃料タンクに適した励磁・検査方法を開発する。

(2)に関しては、自動車などに搭載される水素燃料タンクの検査は、磁気雑音の大きな通常環境中にて、SQUID 磁気センサを移動させて三次元的走査を行う必要がある。そこでセンサ周辺の環境磁気雑音を低減するノイズキャンセル技術の開発を行い、センサ移動・三次元走査技術を開発する。

(3)に関しては、より深部の微小欠陥を検出するには、励磁磁場を強化する必要があるが、タンクだけでなく、センサも励磁磁場に曝される。そこで、地磁気 (50 μT) 程度の磁場にさらされても安定動作する高性能 SQUID の開発が必要となる。

(4)に関しては、上記三つの要素技術を組み合わせ、タンク外表面から内部までの厚さ 5mm を越える肉厚タンクの深部欠陥を検出可能な、センサ移動型の実用的検査システムの開発・デモによる評価を行う。

4. 研究成果

研究の方法にて挙げた課題 (1) と (2)

については平成 19 年度に、(3) と (4) については平成 20 年度に研究を行った。

(1) の積層型タンク検査手法については、励磁の際に SQUID 磁気センサへの漏れ磁束が少なく、かつ大きな磁場をタンクに印加できるダブル D 型励磁コイルを用いた。また、アルミタンク深部への磁場の侵入深さを考慮して、励磁周波数は 100Hz (アルミへの侵入深さ約 10mm) から 10kHz (同数 mm) を用いればよいことが分かった。

(2) の環境磁気雑音キャンセル技術として、図 1 に示すような、SQUID 磁気センサの近傍に、感度は SQUID 磁気センサよりも劣るが磁場中での安定性が高く、約 50 μT の磁場まで計測できるフラックスゲート磁気センサを参照センサとして配置した。このセンサを用いて環境磁気をモニタし、SQUID およびフラックスゲート磁気センサ周辺に設置した補償コイルにセンサ出力をフィードバックして、環境磁気雑音を補償するアクティブ磁気シールド技術を開発した。このノイズキャンセル技術を、ロボットアームに搭載した SQUID 磁気センサへ適用したところ、図 2 に示すように、ロボットにより SQUID 磁気センサを環境磁気中で 10mm/s の速度で移動させたときにも、感度劣化がほとんどないセンサ移動が実現した。さらに、図 3 に示すような、ロボットベースの SQUID 磁気センサ移動が可能な非破壊検査装置の開発を行った。SQUID 磁気センサはコンパクトなパルス管冷凍機を用いて約 77K に冷却しており、実用性の高い装置構成とした。本装置に、(1) で述べたダブル D 型コイルを二つ用いた励磁方法を適用して、水素燃料タンクの肉厚・積層構造を模擬した、CFRP・アルミ積層板材サンプルのアルミ中亀裂欠陥検出実験を試みた (図 4)。ここでは、励磁磁場として 1Hz、70 μT の交流磁場をサンプルに印加しながら、サンプル上の磁場応答の二次元分布を計測した。この結果、図 5 に示すように亀裂の周辺に 4 極子的な欠陥信号を検出することができ、本手法が肉厚・積層構造材内部の亀裂検出に有効であることが示された。

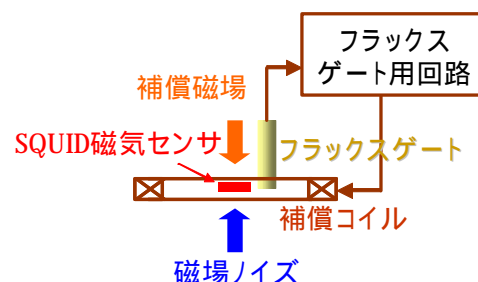


図 1 環境磁気雑音キャンセル技術

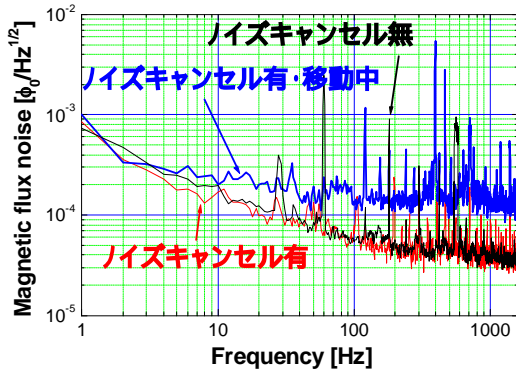


図2 ノイズキャンセル技術を用いたときの SQUID 磁気センサの磁束感度

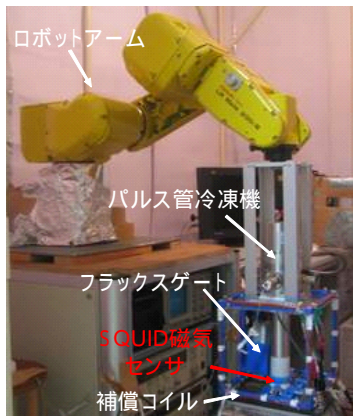


図3 ロボットアームを用いた SQUID 磁気センサ移動型非破壊検査装置

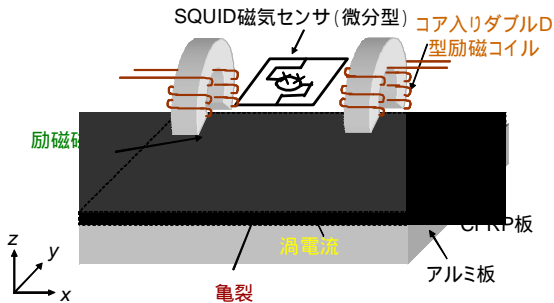


図4 CFRP・アルミ積層板材の深部欠陥検出手法の原理

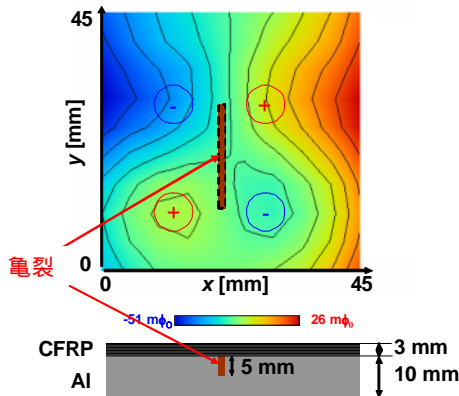


図5 積層構造の深部亀裂欠陥検出結果

(3)(4)の研究では、磁気シールドのない環境でも安定動作する、ランプエッジジョセフソン接合をもつ新しい SQUID 磁気センサを導入した。この SQUID 磁気センサを移動に適した小型クライオスタットにマウントし、平成19年度の研究で開発したロボットベースの非破壊検査技術に導入した。これにより、SQUID 磁気センサに励磁磁場として約400nTの交流磁場を印加しながら、環境磁気中をセンサが三次元移動可能なタンク検査装置を構築した(図6)。ここでは、タンク表面に沿ってセンサを移動させ、低周波数交流励磁によりアルミタンク深部まで励磁しながら、アルミタンク内の欠陥に由来する磁場応答分布を測定するロボット移動・測定プログラムを作成した。本装置を用いて、油圧による繰り返し負荷により発生させた長さ10mmの亀裂欠陥をもつ厚さ6mmの水素燃料タンクの非破壊検査のデモを行った。ここでは、400Hzから10kHzで、 $7\mu\text{T}$ の低周波数励磁磁場を用いて、亀裂周辺のタンクを走査して磁場分布を測定した。この結果、図7に示すような、アルミタンク内亀裂欠陥に由来する微小な4極子の磁場応答変動を検出することができた。また、亀裂信号強度と励磁周波数の関係は図8のようになり、厚さ6mmのタンクの場合、周波数は1kHzを用いると最も大きな信号強度が得られることが分かった。

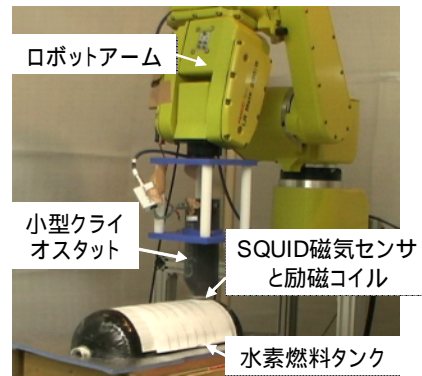


図6 水素燃料タンク非破壊検査装置

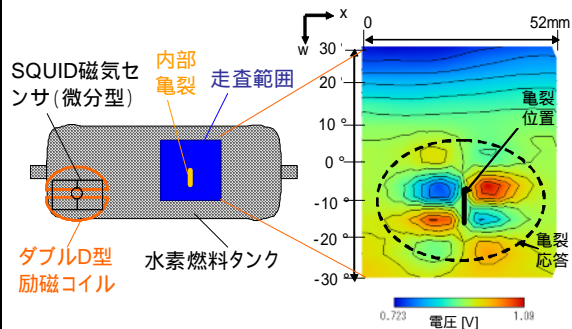


図7 タンク内深部亀裂の検出結果(1kHz)

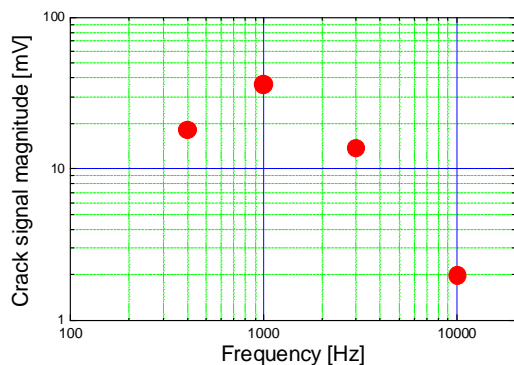


図8 亀裂信号強度と励磁周波数の関係

以上に示したように、超高感度な SQUID 磁気センサをロボットにより環境磁気中で移動させて構造物の非破壊検査を行った例は過去にほとんどなく、従来技術の適用が困難な水素燃料タンクのような先進構造物の品質・完全管理を実現する非破壊検査技術の実用化の可能性が示された。したがって、本研究により検査技術の新規開発・実用化における重要な研究成果が得られたといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

甘日出好, 代継浩平, 金井翔, 林啓太, 田中三郎, 「冷凍冷却 HTS-SQUID グラジオメータを用いたロボットアーム式モバイル非破壊検査装置の開発」, 低温工学, 44 巻, 2009 年, pp.54-60, 査読有.

Y. Hatsukade, K. Yotsugi and S. Tanaka, "Mobile HTS-SQUID NDE system with robot arm and active shielding using fluxgate", Physica C, Vol. 468, 2008, pp. 1932-1935, 査読有.

K. Yotsugi, Y. Hatsukade and S. Tanaka, "Robot-arm-based Mobile HTS SQUID System for NDE of Structures", Journal of Physics: Conference Series (EUCAS 2007), Vol. 97, 2008, p. 012134, 査読有.

Y. Hatsukade, T. Takahashi, T. Yasui, M. Tsubaki, M. Fukumoto and S. Tanaka, "Study on nondestructive inspection using HTS-SQUID for friction stir welding between dissimilar metals", Physica C, Vol. 463-464, 2007, pp.1038-1042, 査読有.

Y. Hatsukade, K. Yotsugi, Y. Sakaguchi and S. Tanaka, "Nondestructive

inspection using HTS-SQUID on aluminum liner covered by CFRP", Physica C, Vol. 463-464, 2007, pp.1043-1047, 査読有.

Y. Hatsukade, S. Okuno, K. Mori and S. Tanaka, "Eddy-Current-Based SQUID-NDE for Detection of Surface Flaws on Copper Tubes", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, 2007, pp. 780-783, 査読有.

〔学会発表〕(計 4 件)

Y. Hatsukade, K. Yotsugi, H. Wakana, Y. Tarutani, K. Tanabe, and S. Tanaka, "Robot-based NDE System using 3-D-Mobile HTS-SQUID", 2008 Applied Superconductivity Conference, Aug. 19, 2008, Chicago, USA.

甘日出好, 金井翔, 林啓太, 田中三郎, 田辺圭一, 「磁場耐性の高い HTS-SQUID を用いたロボット式モバイル非破壊検査装置」, 第 79 回 2008 年度秋季 低温工学・超電導学会, 2008 年 11 月 12 日, 日本, 高知市文化プラザ.

K. Yotsugi, Y. Hatsukade and S. Tanaka, "Robot-arm-based Mobile HTS SQUID System for NDE of Structures", 8th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2007), Sep. 16, 2007, Brussels, Belgium.

Y. Hatsukade, K. Yotsugi and S. Tanaka, "Mobile HTS-SQUID NDE system with robot arm and active shielding using fluxgate", 20th International Symposium on Superconductivity (ISS2007), Nov. 7, 2007, Tsukuba, Japan.

〔図書〕(計 1 件)

藤江幸一編著, 立花潤三, 甘日出好 他 21 名共著, 「生態恒常性工学 持続可能な未来社会のために」, コロナ社, 2008 年, pp.184-187.

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: SQUID 磁気センサを用いる非破壊検査装置

発明者: 田中三郎, 甘日出好

権利者: 豊橋技術科学大学

種類: 特願

番号: 2008-54360

出願年月日: 2008 年 3 月 5 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.eco.tut.ac.jp/tanakaslab/>

6．研究組織

(1)研究代表者

廿日出 好 (HATSUKADE YOSHIMI)

豊橋技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：90339713

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

代継 浩平 (YOTSUGI KOHE)

豊橋技術科学大学・工学部・学生

研究者番号：なし

金井 翔 (KANAI SHO)

豊橋技術科学大学・工学部・学生

研究者番号：なし

林 啓太 (HAYASHI KEITA)

豊橋技術科学大学・工学部・学生

研究者番号：なし