1 はじめに

液体水素を推進剤にするロケット燃焼器の 断面図を図1に示す。ロケット燃焼器は、液体 水素冷却剤用溝(以下、冷却溝)を有する銅合 金製内筒と、インコネル製補強外筒で構成され ている。冷却用溝は、内筒外周側の周囲方向に、 1mmの溝が1.5mm間隔で形成されている。

ロケット発射時、内筒スカート部は 3000K もの超高温燃焼ガスに曝される。内筒スカート 部分の融解を防ぐため 20Kの液体水素冷却剤 を流す必要がある。この温度差により冷却溝内 部には、大きな温度勾配と過大な熱ひずみが発 生する。内筒部は、熱膨張しようとするが、屈 強なインコネル製外筒により拘束されるため、 内筒の燃焼ガス側表面に大きな応力が生じる。 そのため、応力により溝方向に亀裂が入ること があり、それをクラックと言う。ロケット燃焼 器の健全性を評価する上で、冷却溝のクラック 検出は重要である。燃焼試験毎にクラックの発 生数を確認できれば、液体ロケット燃焼器の寿 命予測を確立する重要な情報となる。

現段階では、超音波探傷による非破壊検査が 行われている<sup>1)</sup>。本研究では、高速で非接触探 傷が可能な渦電流探傷試験を応用したクラッ ク検出を検討した。 日大生産工(院) 〇佐藤 悠理 日大生産工 小山 潔、星川 洋



図1 ロケット燃焼器の断面図

従来の渦電流探傷プローブである上置コイ ルには、試験体の表面状態の変化によって試験 体とコイルとの相対距離(リフトオフ)の変化 が、試験結果に雑音(リフトオフ雑音)として 出る問題がある。また、冷却溝にあるキズを検 出する前に、冷却溝を雑音として検出しまうの が原因で、肝心なキズの検出が困難である

本研究では、リフトオフの影響がない渦電流 探傷のプローブを利用した<sup>2)</sup>。試験体の裏面に 冷却溝を模した溝を加工し、溝方向に模擬クラ ックを施した。冷却溝方向に渦電流探傷のプロ ーブを裏面走査し、キズ検出が可能か検討を行 った。

## Study on Eddy Current Testing of Liquid Rocket Combustion Chamber by Oprobe

Yuri SATO, Kiyoshi KOYAMA and Hiroshi HOSHIKAWA

2 溝部クラックの検出原理

Θプローブは、円形横置きの励磁コイルに矩 形縦置きの検出コイルを入れた図2の構造で ある。
のプローブの
励磁コイルに
交流電流を
流 すと、右ネジの法則によりコイルの中心を抜け るように磁束が発生する。Θプローブが金属試 験体の上にある場合、試験体には励磁コイルに 流れる電流と逆向きに渦電流が誘導される。検 出コイルは巻線方向と平行の渦電流によって 発生する巻線方向と垂直の磁束を、起電力とし て検出する。そのため、試験体にキズがない場 合、渦電流が発生する磁束は左右均等なので、 検出コイルの巻線方向に垂直な磁束は打ち消 し合い起電力は発生しない。この検出原理によ りのプローブはリフトオフの影響を受けない。 試験体にキズがある場合、渦電流はキズを避け て通る。その為、キズ側の渦電流によって発生 する磁束は強くなり、検出コイルを通過するこ とで起電力を生じる。

次に、Θプローブの「巻線方向と平行の渦電 流成分しか検出しない」原理を応用した溝部ク ラック検出原理を説明する。

Θプローブを内筒側に置く。励磁コイルに誘 導される渦電流は図3に示すように冷却溝部 とその間部で渦電流強度が異なる。図 3.4 では、 濃い色の矢印が強く淡い色の矢印が弱い渦電 流を示している。検出コイルを溝と垂直に設置 することで、検出コイルの巻線方向を軸(図 3,4 中の一点鎖線)として左右対称に渦電流が 分布する。したがって検出コイルと冷却溝が垂 直状態を保っている時は、左右対称に磁束が発 生し総和は零なので起電力は発生せず、さらに 冷却溝による雑音は発生しない。図4に溝方向 にキズがある時の渦電流の流れを示す。渦電流 はキズを避けて流れるので渦電流の対称性が 崩れる。その為、検出コイルは巻線方向に平行 な渦電流によって発生する磁束を起電力とし て検出する。



図 2 **0**プローブの構造図







## 3 実験方法及び実験条件

図5に、試験体に施した溝とキズの断面図を 示す。試験体は縦160mm,横160mm,厚さ 4mmのアルミニウム板で、機械加工により 1.5mm間隔で幅1mm,深さ3mmの溝を本施 した。その内の3本の溝に、放電加工により矩 形のキズ(模擬クラック)を施した。 キズは3種類あり、溝底厚1mmに対して深さ 25%,50%,75%,長さ10mmである。



4 実験結果

図 7 に、Θプローブを用いて検出コイルに対 し垂直なキズ(深さ 75%、長さ 10mm)を 2 次元走査し、得られた信号を 3 次元表示した。



0.2mm

図5 試験体の溝とキズの断面図

Θプローブの寸法は励磁コイルが直径 9mm、
 巻線断面積 1mm<sup>2</sup>である。検出コイルが長さ
 7mm、巻線断面積 1mm<sup>2</sup>である。図 6 に、プローブの配置と走査方向、探傷範囲を示す。

試験体とΘプローブの間に OHP シート(リ フトオフ 0.2mm)を敷きリフトオフを一定に 保った。励磁コイルに 6V を印加し、探傷周波 数は 25 k Hz とした。この時、渦電流の浸透深 さ 1.01mm となる。探傷範囲は、キズを中心 に X-12~12mm,Y-12~12mm とした。Θプロ ーブを X 方向に裏面探傷を行った。



図7 キズ深さ75%、長さ10mmのキズ信号

信号の山と谷が細長いキズの末端を示して おり、溝部による雑音は小さく、大きな信号が 得られていることが分かる。

図 8、9、10、には、Θプローブがキズの真上を通過したときの信号パターンを示す。図 8
は深さ 25%、図 9 は 50%、図 10 は 75%であり、いずれもキズ長さ 10mm である。
図 8、9、10、を見比べるとキズ深さが浅くな

図 8、9、10、を見比へるとキス保さか残くな るにつれ信号が小さくなっていくのが見て取 れる。パターン信号の捻じれは、励磁コイルの 直径よりキズ長さが長いと渦電流が複雑な流 れをするためである。



図 11 は、キズ深さに対する位相と振幅を示す。 キズ深さが深くなるにつれ、位相も振幅も変化 しているのがわかる。



5 まとめ

Θプローブを利用した液体ロケット燃焼器の冷却溝クラックの検出の検討を行った。

その結果、裏面側であっても溝にあるキズの 検出が可能であることが分かった。キズ深さが 深くなるにつれて信号が大きくなることが分 かる。また、キズが深くなるにつれ位相が進ん でいるのが分かる。この位相によりキズ深さ評 価の可能性を期待している。溝部探傷にΘプロ ーブを利用することで、今後の液体ロケット燃 焼器のキズ検出に期待できる。

## 参考文献

[1]森谷信一,升岡正,山脇寿,高坪純治 A3-1 "液体ロケット燃焼器の超音波による非破壊 検査"安全・安心な社会を築く先進材料・非破 壊計測技術シンポジウム 2010 年 3 月 [2]星川洋,小山潔,柄澤英之,"リフトオフ雑音が 発生しない渦電流探傷用上置プローブに関す る研究"非破壊検査 第 50 巻 11 号 2001 年 p737