

渦電流探傷  $\Theta$  プローブを用いた液体ロケット燃焼器内部のクラック検出について

日大生産工(院) ○佐藤 悠理

日大生産工 小山 潔、星川 洋

## 1. はじめに

液体酸素と液体水素を推進剤にする液体ロケット燃焼器の断面図を図1に示す。液体ロケット燃焼器は、液体水素冷却剤用溝(以下、冷却溝)を有する銅合金内筒と、インコネル製補強外筒で構成されている。冷却溝は、1mmの溝が1.5mm間隔で、内筒外周側の周方向に多数配列されている。ロケット燃焼器は、信頼性向上及び寿命評価のために、繰り返し燃焼試験を行う。ロケット燃焼時、銅合金内筒は3000Kもの超高温燃焼ガスに曝される。銅合金内筒の融解を防ぐため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。銅合金内筒は、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、銅合金内筒の燃焼ガス側表面に大きな応力が生じる。燃焼試験と冷却を繰り返すことで溝底部に、溝に対して平行なクラックの発生が確認されている。クラックの位置や深さを燃焼試験毎に評価出来れば、信頼性向上及び寿命評価を確立する重要な情報となる。

現段階では、レーザ超音波探傷<sup>1)</sup>や異方性磁気抵抗効果(AMR)を利用した渦電流探傷<sup>2)</sup>の適用が報告されている。レーザ超音波探傷やAMRを利用した渦電流探傷ではレーザ光や小さいプローブで2次元走査して探傷している。本研究では、渦電流探傷でコストと検査

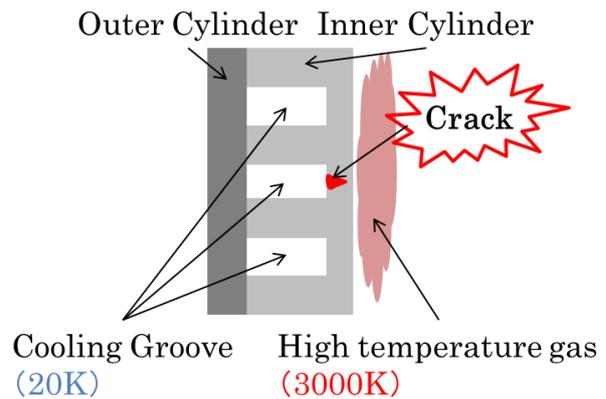


図1 ロケット燃焼器の断面図

時間を抑え1次元走査で、ある程度の範囲のきずを検出するためのマルチプローブによる探傷を検討している。

研究の前段階として $\Theta$ プローブによる基礎的なきず検出の検討を行っており、前回の報告<sup>3)</sup>では検出コイルの巻線方向に対して冷却溝が垂直に位置するように走査(以下、垂直走査とする)を行ったが、ロケット燃焼器はスカートになっており噴射口から上に向かうにつれて窄まっていく、そのためスカートの円周角は変化し垂直走査ではプローブの接する面積が変化する問題がある。そこで今回は、検出コイルの巻線方向に対して冷却溝が平行に位置するように走査(以下、平行走査とする)を行った時の、きず検出について報告する。

### Crack Detection in Liquid Rocket Combustion Chamber using Eddy Current Testing $\Theta$ probe

Yuri SATO, Kiyoshi KOYAMA and Hiroshi HOSHIKAWA

## 2. 冷却溝底部クラックの検出原理

①プローブは、図2に示すように矩形縦置き  
の検出コイルを円形横置きの励磁コイルに  
入れた構造である。①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励磁コ  
イルの中心を抜けるように磁束が発生する。①  
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  
行の渦電流成分を検出し、巻線方向と垂直の渦  
電流成分は検出しない。」この検出原理により  
①プローブはリフトオフの影響を受けない。試  
験体にきずがない場合、検出コイルの巻線方  
向に対して渦電流が左右均等なので、起電力を生  
じない。試験体にきずがある場合、渦電流はき  
ずを避けて通りきず側の渦電流が強いため、起  
電力を生じる。

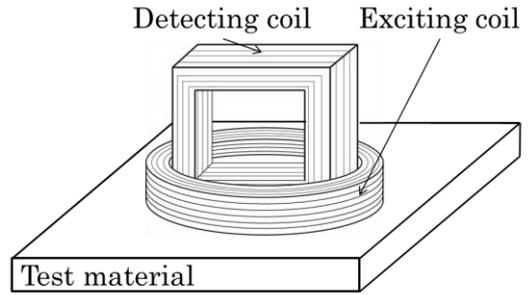


図2 ①プローブの構造図

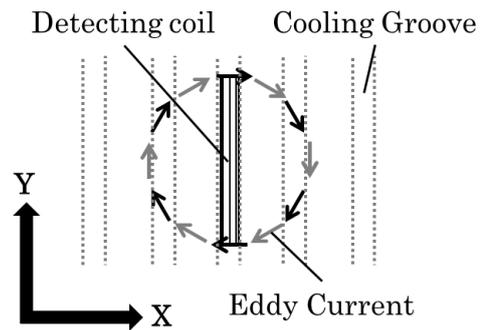


図3 冷却溝の検出原理  
(検出コイルが冷却溝の真上)

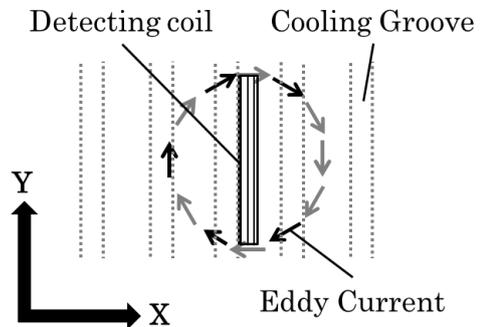


図4 冷却溝の検出原理  
(検出コイルが冷却溝と冷却溝の間)

次に、①プローブによる冷却溝底部に発生す  
るきずの検出原理を説明する。外筒の外周側は  
冷却溝に冷却剤を流すパイプ等によりプロ  
ーブを走査できないので、内筒の内周側から  
の探傷（以下、裏面探傷とする）となる。①  
プローブの検出コイルを冷却溝に対して平行に設置  
（以下、平行配置とする）すると、励磁コ  
イルに誘導される渦電流は、冷却溝とその間部  
で渦電流強度が異なる。図3、4、5に、濃い色  
の矢印が強く淡い色の矢印が弱い渦電流を示す。

平行走査による渦電流の流れを説明する。  
検出コイルが冷却溝の真上に位置する場合を  
図3に示す。検出コイルの巻線方向を軸として  
左右対称に渦電流が分布し起電力は生じない。

検出コイルが冷却溝と冷却溝の間に位置す  
る場合を図4に示す。①プローブが移動した  
ことにより“冷却溝”から“冷却溝の間”へ  
と移動する。これに伴い板厚が変化するため  
渦電流の電流強度も変化する。これにより、

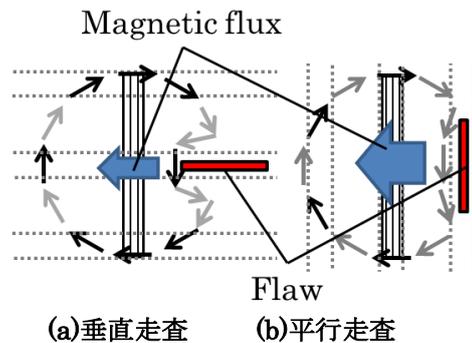


図5 冷却溝底部のきず検出原理

検出コイルの巻線方向を軸として左右非対称に渦電流が分布するため起電力が生じ、冷却溝による雑音を発生する。

⊖プローブが冷却溝底部のきずに至った場合を図5に示す。渦電流はきずを避けるように流れる。検出コイルと冷却溝の関係が垂直の場合よりも平行の方がより避けるように流れるため、検出コイルに発生する起電力は平行のほうが大きくなる。

### 3. 実験方法及び実験条件

図6に、試験体に施した溝ときずの断面図を示す。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の溝を施した。その内の3本の溝に、放電加工により矩形のきず(模擬クラック)を施した。きずは3種類あり、溝底厚1mmに対してきず深さ(D)25%、50%、75%それぞれきず長さは10mm、5mm、2mmである。

⊖プローブの寸法は励磁コイルが内径7mm、外径9mm、巻線断面積1mm<sup>2</sup>である。検出コイルが長さ7mm高さ9mm、巻線断面積1mm<sup>2</sup>である。図7に、プローブの配置と走査方向を示す。試験体と⊖プローブの間にOHPシート(厚さ0.2mm)を敷きリフトオフを一定に保った。励磁コイルに2Vを印加し、探傷周波数は25kHzとした。この時、渦電流の浸透深さは1.01mmとなる。⊖プローブの検出コイルの巻線方向と冷却溝が平行になるように設置し、X方向に走査して裏面探傷を行った。

### 4. 実験結果

図8は、きず深さ0.75mm、きず長さ10mmを平行走査によって得られた3次元鳥瞰図である。信号振幅の最大値を含むX軸のデータを読み取り図9に示す。図9は、平行走査(X軸方向)と垂直走査(Y軸方向)行ったときの信号パターン図である。

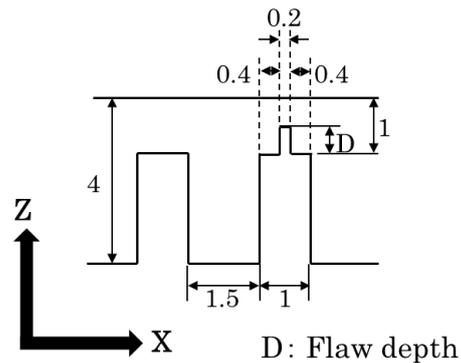


図6 試験体の断面図

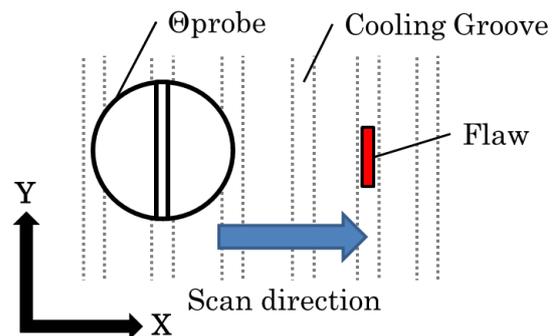


図7 きずと⊖プローブの位置及び走査方向

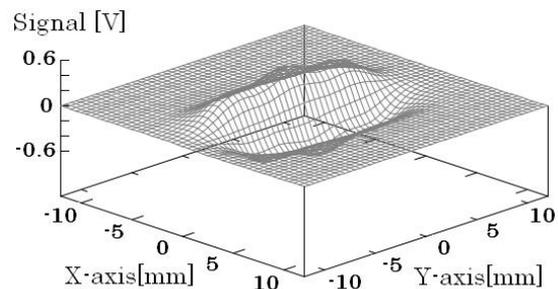


図8 3次元鳥瞰図

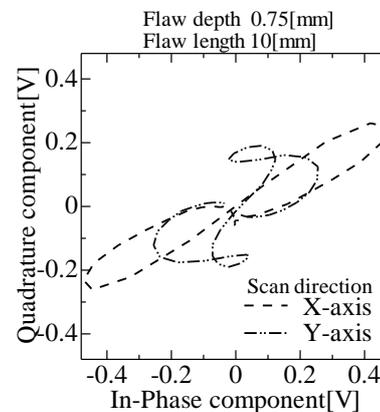


図9 平行と垂直走査の信号パターンの比較

垂直走査では、励磁コイルの径よりきずが長い時、渦電流が複雑に流れるため、捻じれた信号パターンになってしまう。平行走査では励磁コイルの径よりきずが長くても信号は捻じれず、振幅が大きいことが図からもわかる。

図 10 にきず深さ 0.75mm きず長さ 2、5、10mm の平行走査をしたときの信号パターンを示す。垂直走査では 5mm と 10mm の振幅の大きさに大差はなかったが、平行走査では短くなるにつれ信号振幅が減少しているのがわかる。また信号パターンの捻じれがないことで振幅の P-P 値で位相を読み取りやすい。

図 11 にきず深さ 0.25、0.50、0.75mm、きず長さ 2、5、10mm のきず深さに対する信号位相を示す。きず深さが一定ならば、きず長さが変化しても位相はほぼ変化していない。またきず長さ 10mm 一定で、きず深さを変化させて見ると図より直線で結べることがわかる。平行走査によって得られた信号位相は、きず深さと対応していることがわかった。

図 12 にきず深さ 0.25、0.50、0.75mm きず長さ 10mm を平行、垂直走査した時の、きず深さに対する正規化信号振幅を示す。きず深さ 0.50、0.25mm において、垂直走査に比べ平行走査の方が、若干正規化信号振幅の大きいことが分かる。しかし、非常に小さい信号振幅であることは変わらないので、振幅においては平行と垂直走査は大差がないことがわかる。

## 5. まとめ

燃焼器のクラック検出の基礎的研究として ④ プローブを用いて平行と垂直走査のきず検出の検討を行った。

平行走査であってもきず検出が出来ることがわかった。平行走査は、垂直走査による信号の捻じれがないため位相の変化などが読み取りやすい。また、きず深さと信号位相が対応している。

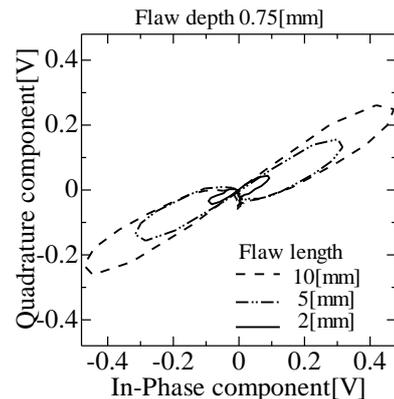


図 10 きず長さが異なる場合の信号パターン

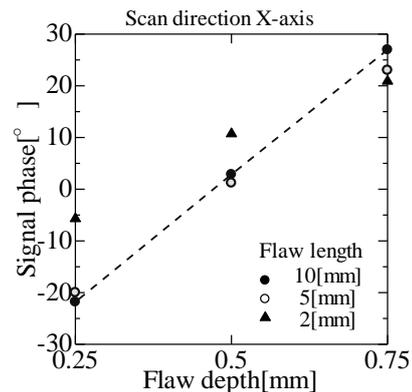


図 11 きず深さに対する信号位相

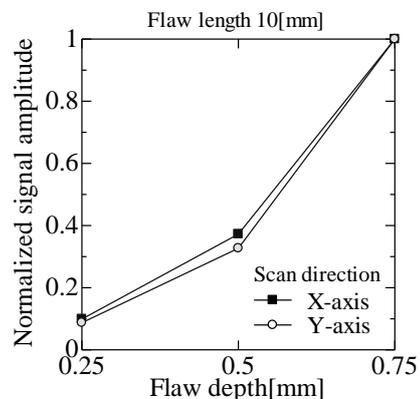


図 12 平行と垂直走査の

きず深さに対する正規化信号振幅

## 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”非破壊計測技術シンポジウム 2010 年 3 月
- [2]何東風,他 A3-2”異方性磁気抵抗素子を用いた ECT システムによる燃焼器模擬試験片の欠陥評価”安全安心な社会を築く先端材料・非破壊計測技術シンポジウム p147-152
- [3]佐藤悠理,小山潔,星川洋”④ プローブを利用した液体ロケット燃焼器に対する渦電流探傷試験に関する研究”日大生産工第 43 回学術講演会 p99-102