

上置プローブを用いた渦電流探傷試験による
ステンレス鋼材及び炭素繊維複合材の
きず検出と評価に関する研究

本宮 寛憲

目次

第一章	序論	・・・1
1.1	背景	
1.2	論文構成	
第二章	上置プローブによる渦電流探傷試験	・・・8
2.1	背景	
2.2	渦電流探傷 Θ プローブの構造と特長	
2.3	自己誘導形の円形上置プローブの構造と特徴	
2.4	Θ プローブの探傷原理	
2.5	実験装置の構成	
2.6	試験体ときずの形状及び寸法	
2.7	プローブの寸法と実験条件及び方法	
2.8	きず信号振幅の疑似カラー画像	
2.9	Θ プローブと上置プローブのきず検出特性	
2.10	まとめ	
第三章	ステンレス鋼材のきず検出と評価	・・・22
3.1	背景	
3.2	放電加工きずを用いたきず検出及び評価方法の基礎的な検討	
3.2.1	試験体	
3.2.2	Θ プローブの寸法と実験条件及び方法	
3.2.3	Θ プローブによるきずの検出結果	
3.2.4	きず深さの評価方法	
3.2.4.1	EDM きずの検出特性	
3.2.4.2	きずの深さ評価のための補正方法と補正值の検討	
3.2.5	きず長さの評価方法	
3.2.5.1	EDM きずの信号振幅波形の特性	
3.2.5.2	きずの長さ評価のための補正方法と補正值の検討	
3.2.5.3	12dB 法による EDM きずの長さ評価	
3.2.6	EDM きずの深さ評価	
3.3	熱疲労割れに対するきず検出及び評価	
3.3.1	TFC 試験体	
3.3.2	TFC の信号振幅の疑似カラー画像	
3.3.3	TFC の深さ評価	
3.4	応力腐食割れに対するきず検出及び評価	
3.4.1	SCC 試験体	

3.4.2	SCC の信号振幅の擬似カラー画像	
3.4.3	SCC の深さ評価	
3.5	有限要素法を利用した検討	
3.5.1	有限要素法について	
3.5.2	解析モデル	
3.5.2.1	試験体モデル	
3.5.2.2	きずモデル	
3.5.2.3	⊖プローブモデル	
3.5.3	解析結果	
3.5.3.1	EDM きずモデルのきず検出特性	
3.5.3.2	SCC モデルの深さ評価	
3.6	まとめ	
第四章	炭素繊維複合材のきず検出	・・・81
4.1	背景	
4.2	CFRP の探傷原理	
4.3	有限要素解析による渦電流分布の検討	
4.4	解析結果	
4.5	実験方法	
4.5.1	CFRP 試験体	
4.5.2	⊖プローブの寸法と実験条件及び方法	
4.6	実験結果	
4.6.1	正規化インピーダンス	
4.6.2	人工平底穴の検出結果	
4.6.3	衝撃きずの検出結果	
4.7	まとめ	
第五章	総括	・・・106
	謝辞	・・・109

Study on Detection and Evaluation of Flaw in Stainless Steel Material and Carbon Fiber Composite Material by Eddy Current Testing with Surface Probe

Tomonori Hongu

Non-destructive testing is used to detect surface or sub surface flaws or degradation without damaging the test object. Safety of structures, such as social infrastructure, needs to be maintained for long periods of time. Non-destructive testing helps increase the reliability of products and facilities and enable their long-term use.

Eddy current testing is available for fast non-contact detection of the initial flaws, such as surface cracks.

The surface probe is used to detect flaws in mainly flat objects; this type of pancake coil is placed over the surface of the test object. When the relative distance (liftoff) between the test object and the test coil changes slightly owing to a change in surface conditions and the vibrations generated during testing, a large liftoff noise is generated. Because of this problem, it is difficult to detect small flaws with this type of conventional surface probe.

In recent years, new types of probes, such as uniform eddy-current probes and plus probes, have been developed; in principle, these can specifically detect flaw signals without generating lift-off noise. In our laboratory was developed, new types of eddy current probe. This probe is called Θ probe, in principle, these can specifically detect flaw signals without generating lift-off noise. Θ probe can detect flaws with accuracy similar to that of a plus probe and uniform eddy current probe. Therefore it is possible to detect flaws with a high SN ratio. There is also that it is possible to evaluate flaws based on the phase angle of the flaw signal.

The occurrence of stress corrosion cracking(SCC) and Thermal fatigue cracking(TFC) has been reported in the stainless steel material of the power plants. However, to our knowledge there has been no report of the detection and evaluation of SCC and TFC by using the Θ probe, which can detect flaws with accuracy similar to that of the plus probe and uniform eddy current probe

CFRP, which is a composite material of carbon fiber and resin is used extensively in air craft and spacecraft structures. It has a merit of being lightweight and excellent in strength and rigidity. However, there is a disadvantage that the mechanical strength decreases when external impact is applied. There are reports on detection of artificial defects by differential eddy current probe for CFRP, measurement of electrical characteristics using rotary eddy current probe, and detection and evaluation of defects using electromagnetic test. However, to our knowledge there has been no report of the flaw detection of CFRP by using the Θ probe.

This study is the result of aimed to improving the accuracy of detection and evaluation of stainless steel material and carbon fiber composite material using an eddy current Θ probe.

第一章 序論

1.1 背景

1970年代の高度経済成長期、あるいはそれ以前に建設された構造物には供用年数が50年近いものや超えるものがあり、経年劣化が目立ち始めている。経年劣化に伴い、鉄鋼構造物では疲労亀裂などのきずや損傷が発生し、そこを起点とした脆性破壊といった事故の危険が高まる。構造物を長期にわたり使用するためには、安全性を保つ必要があるので、保守検査が必要であり、その一環として非破壊試験法が適用される。非破壊試験とは、構造物などを破壊することなく内部や表面のきず、あるいは劣化の状態を調べる方法のことである。

構造物の中でも鉄鋼構造物に対する非破壊試験の方法として、弾性波を利用した超音波探傷試験や、放射線を利用した放射線透過試験などがある。これらの試験方法はきずの定量評価に優れるが、1か所の試験時間が長いという問題がある。試験時間が長い場合、構造物全体の試験を行うには膨大な時間が必要となるので、保守検査期間が定められているプラント構造物等の場合には、検査時間の圧迫要因となってしまう。そこで、きずの有無を高速度で判定できる試験方法が必要であり、その1つに表面探傷法である渦電流探傷試験がある。

渦電流探傷試験とは電磁誘導現象を利用した非破壊試験法の一つであり、試験対象に渦電流を誘導し、その変化を検出する方法である。渦電流探傷試験の長所として、試験体に非接触かつ高速度での試験が可能で、人の接近が困難な場所でも適用が可能である。試験体の表面および表面近傍の探傷に優れることから、凹凸がない平板、棒、管といった単純形状かつ導電性がある構造物内の配管などのきずの検出に適用される。しかし、試験対象が導電性を持っている必要があり、凹凸がない単純形状でなければならない。また、得られた信号から、きずの種類、形状、寸法などの判別が難しいので、定量的な評価が困難という短所がある。したがって、高速度での試験が可能な渦電流探傷試験によってきずの有無の判定を行い、きずが存在する箇所を超音波探傷試験や放射線透過試験によって定量評価することで、効率的に試験を行うことが可能である。

渦電流探傷試験の探傷原理を図1.1に示す。銅線をコイル状に巻いたプローブに交流電流を流し、導体に近づけると、コイルを流れる交流電流によって発生した交流磁束の一部が導体の内部に浸入する。交流磁束は時間と共に変化するので、電磁誘導作用により、磁束の周りに起電力が発生する。この起電力によって、導体の内部に渦電流が誘導される。この渦電流は導体中にきずや割れなどといった不連続部が存在するとそれを避けて流れる。この時、渦電流の流れはきずのない部分における流れと異なることになる。渦電流が変化すると、渦電流によって発生する磁束が変化するので、コイル内を貫く磁束が変化することになり、コイルに発生する起電力が変化する。この変化をきず信号として検出してきずや割れの検出を行う。

渦電流探傷試験に用いられる試験コイルを図1.2に示す。試験コイルには貫通プローブ、内挿プローブそして上置プローブがある。貫通プローブは、コイルの中に試験体を通して試

験を行い、棒や管及び線の製造工程での品質検査に用いられる。内挿プローブは、配管や穴の軸とプローブの軸が平行となるように挿入されるものをいい、熱交換器や復水器などに用いられる配管の試験に用いられ、きず信号の位相を利用したきず深さの評価が行われている。上置プローブは、表面あるいは表面近傍のきず検出に優れ、凹凸が少ない平板状の試験体に対して用いられ、きず信号の大きさを利用したきずの深さ評価が行われている。本研究では構造物の表面のきず検出に優れる上置プローブに着目して研究を行った。

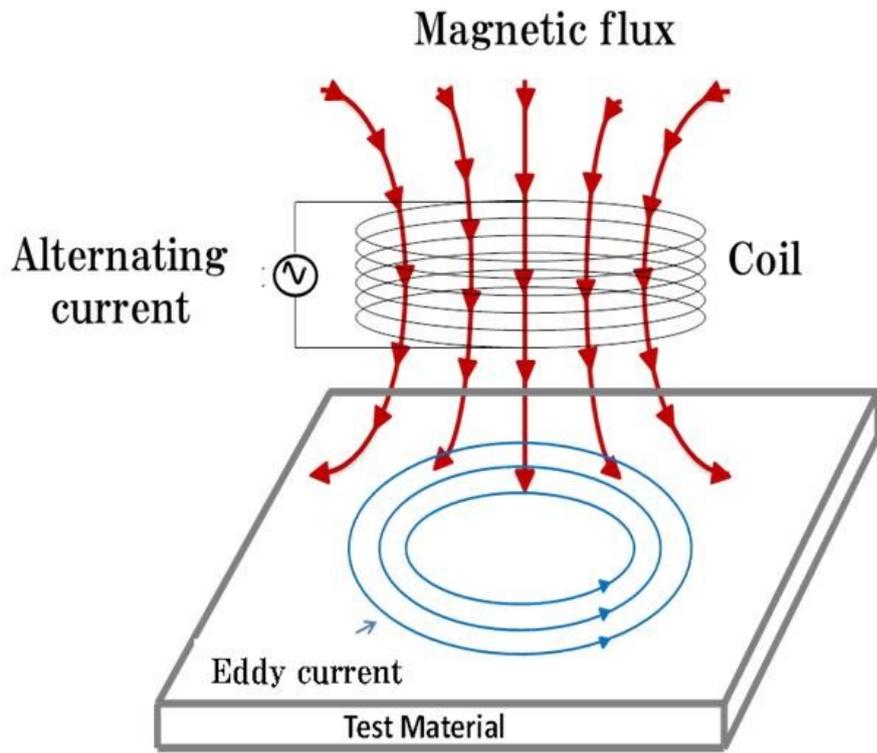
従来、構造物の表面や表面近傍のきず検出には、自己誘導形の円形上置プローブが用いられるが、試験対象とプローブとの相対距離(以降はリフトオフ)が走査に伴う振動などによって僅かに変わると、大きな雑音(以降はリフトオフ雑音)が生じるので、小さいきずの検出が困難である。このリフトオフ雑音の問題を解決する方法として、プローブを自己比較方式で構成する方法があるが¹⁾、プローブが振動などによって傾いた場合には雑音を抑制することができない。また、きずの深さ評価に際しては、信号の大きさを利用した評価が行われてきたが、深さが同じきずであっても、きずの長さ、幅、形状が変わると、信号の大きさも変わるので、定量的な評価が困難である。したがって、きずの評価に関しては精度が低いという認識が定着している²⁾。しかし、近年では、原理的に雑音が発生せず、きずによる信号のみを検出することが可能なプローブである、クロスポイントプローブや一様渦電流プローブといったプローブが開発されており^{3)~8)}、これらのプローブは実際に雑音小さくきず検出が可能である。また、星川・小山らによって、渦電流探傷 Θ プローブ(以降は Θ プローブ)が開発・提案されている。この Θ プローブは、原理的にリフトオフ雑音が発生せず、クロスポイントプローブや一様渦電流プローブと同等以上の精度できずの検出が可能で、SN比高くきずの検出が行える。また、得られるきず信号が安定しているので、内挿プローブと同様に、きず信号の位相に基づいたきずの深さ評価への利用が可能という報告がある⁹⁾。

Θ プローブなどの精度高いきず検出が可能なプローブの適用が求められる対象として、プラント構造物内で発生する事例が報告されている応力腐食割れや熱疲労割れなどの小さいきずが挙げられる。これらは、プラント構造物のステンレス鋼製の機器や配管に発生する事例がある。応力腐食割れは、腐食性の環境に置かれた金属材料に引張応力が作用することで割れが生じる。機器再循環系配管や制御棒の周囲に配置されるシュラウドなどで発生することがある。応力腐食割れが原因となった事故の一例として、1969年に英国の原子力発電所5号タービン発電機において、応力腐食割れが原因で低圧タービンのバースト事故が起きている。熱疲労割れについては、機器の部材が加熱または冷却され、何らかの拘束により部材が温度変化に伴う伸縮ができない場合に熱応力が生じ、これが繰り返し発生することで割れが生じる。熱交換器の出口配管やバイパス配管との合流部などで発生することがある。熱疲労割れが原因となった事故の一例として、1999年に国内の敦賀原子力発電所2号機で熱疲労割れが原因で配管からの一次冷却水漏洩が起きている。応力腐食割れや熱疲労割れは発生時には小さい場合でも、時間経過と共に大きくなるので、早期発見が重要であり、きずが厚さ方向にどの程度進展しているかを正確に評価することも重要とされる。これらのきずに対して、渦電流探傷試験を適用した先行研究として、一様渦電流プローブに着目したマルチ一様渦電流プローブを適用した渦電流探傷試験によって、十分な精度の探傷が可能という報告が

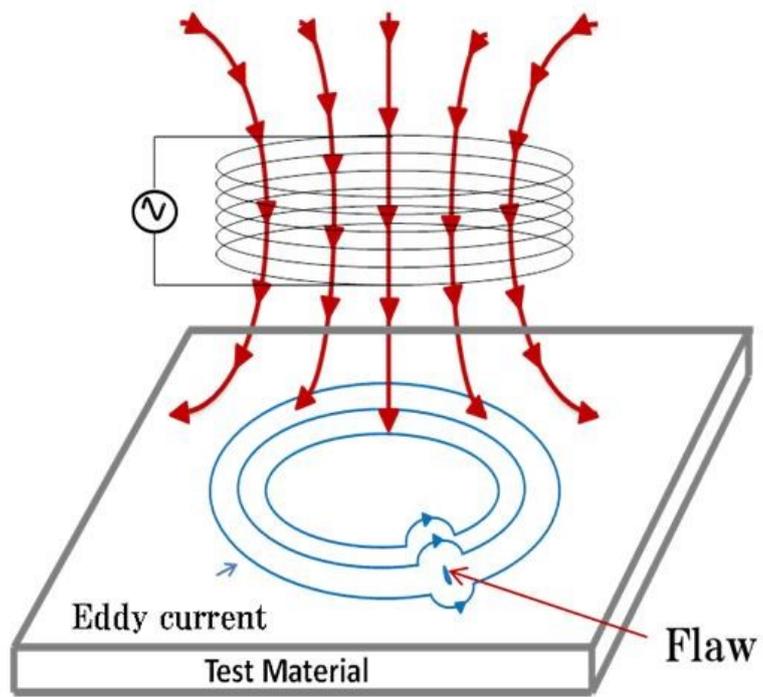
ある¹⁰⁾。しかし、一様渦電流探傷プローブの場合、試験対象には一方向に渦電流が誘導されるので、誘導した渦電流の向きときずの長さ方向が同方向の場合に検出が困難という問題点がある。そこで、試験対象に円形に渦電流を誘導するので、きずの向きによらず検出が行うことが可能で、一様渦電流プローブと同等以上の精度できず検出が可能な Θ プローブがある。しかし、このプローブを適用した応力腐食割れと熱疲労割れの検出と評価についての報告は現在行われていない。そこで、 Θ プローブを適用したきず検出を行い、得られたきず信号からきずの評価を行った。

プラント構造物以外にも精度高いきず検出が可能なプローブの適用が求められる対象として、炭素繊維強化プラスチック(以降はCFRP)と呼ばれる材料がある。CFRPは先進複合材料と呼ばれるアルミニウムなどの従来用いられる金属に代わり得る軽量かつ高性能な材料の一つである。CFRPは強化材として、炭素繊維に母材となる樹脂を含浸させて硬化させることによって作成される材料である。CFRPはアルミニウム合金などの金属材料と比較して比剛性・比強度などに優れることから、航空宇宙分野でも用いられるようになった。近年では、中型旅客航空機「ボーイング 787」や「エアバス A350XWB」では、重量にして構造材料の50%程度CFRPが用いられている。しかし、航空宇宙機の場合、雹や小石などの衝突によって外部から強い衝撃を受けると、樹脂割れ、層間剥離、積層破断などが生じ、強度が低下することから、非破壊試験法によって早期に発見する必要がある。CFRPは金属ほどではないが導電性を持つので、渦電流探傷試験の適用が期待できる。しかし、CFRPは導電率が金属と比較して小さいので、誘導される渦電流が小さいことや、繊維方向に強い導電率を有する異方性といった特徴に起因する、雑音が大きくSN比が低下するといった問題点がある。したがって、CFRPの検査に渦電流探傷試験を適用するには、雑音小さくきず検出性能の高いプローブが必要である。CFRPに対する渦電流探傷試験を適用した先行研究として、雑音を低減を目的とした差動渦電流プローブによるCFRPに人工的に施したきずの検出¹¹⁾やCFRPに対する渦電流探傷試験に関する報告^{12,13)}がある。しかし、CFRPは繊維シートの積層方法などの違いにより各種存在するが、先行研究については各種CFRPに誘導される渦電流の分布や実損傷を模したきずの検出に関する報告は見られない。また、雑音小さくSN比高いきず検出が可能という特長を持つ Θ プローブであれば、CFRPに対しても雑音小さくSN比高いきず検出が期待できるが、このプローブを適用したきず検出に関する報告は見られない。そこで、各種CFRPに対して、 Θ プローブを適用したきず検出を行い、 Θ プローブの有効性について検討を行った。

本論文では新形の上置プローブである、 Θ プローブを適用した渦電流探傷試験を行い、ステンレス鋼材及び炭素繊維複合材のきずの検出と評価の精度向上を指向した研究をまとめた。

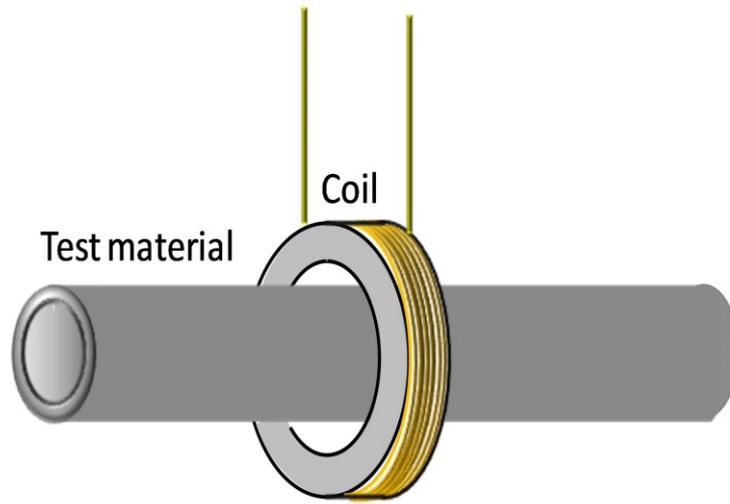


(a)きずがない場合

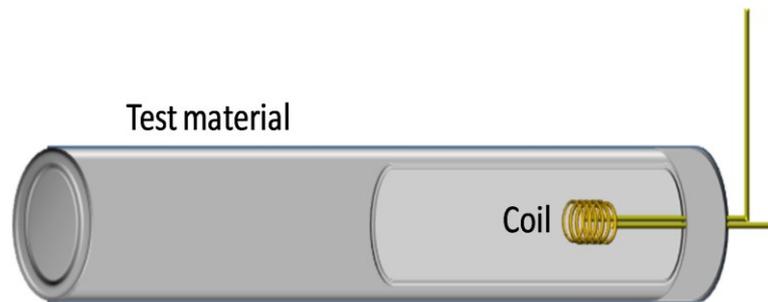


(b)きずがある場合

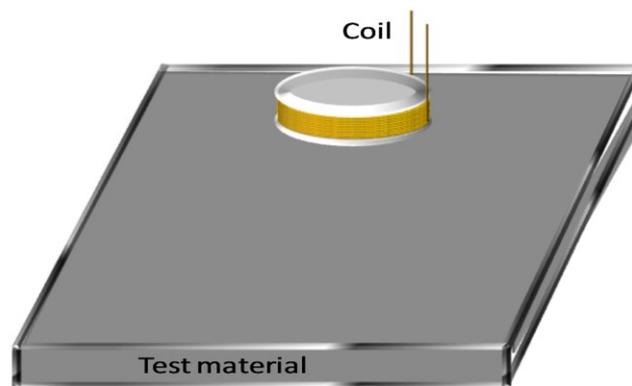
図 1.1 渦電流探傷試験の探傷原理



(a)貫通プローブ



(b)内挿プローブ



(c)上置プローブ

図 1.2 試験コイルの種類

1.2 論文構成

第一章では、従来の円形上置プローブによる渦電流探傷試験の問題点を示し、開発提案された新形の上置プローブである Θ プローブを用いた渦電流探傷試験による、ステンレス鋼材及び炭素繊維複合材のきずの検出と評価の精度向上を指向した、研究の背景と目的及び論文の構成について述べる。

第二章では、きず形状が単純な放電加工(以降 EDM)きずに対して、従来の自己誘導形の円形上置プローブと、原理的にリフトオフ雑音が発生しない Θ プローブを適用した渦電流探傷試験を行い、きず検出特性の比較検討を行った。

第三章では、初めに、プラント構造物で用いられるステンレス鋼材に対して放電加工によってスリット状のきずを施し、基礎的なきず検出特性ときずの評価方法の検討を行った。得られた知見をもとに、プラント構造物内で発生する事例が報告されている、応力腐食割れや熱疲労割れといった微小かつ複雑なきずに対して、 Θ プローブを適用したきずの検出を行い、得られたきず信号からきずの評価を行った。

第四章では、初めに、CFRP に誘導される渦電流の分布を有限要素解析によって明らかにしたのち、3種類のCFRPに人工的に円形平底穴を施し Θ プローブを適用したきず検出を行った。そして、織物CFRPに衝撃きずを模したきずを施し、 Θ プローブの有効性を確認した。

第五章では、各章から得られた結果の総括について述べる。

参考文献

- 1) 非破壊検査技術シリーズ 渦電流探傷試験Ⅱ:社団法人日本非破壊検査協会 ,pp.51-52, (2003)
- 2) 池田忠夫:渦流探傷技術の保守検査への適用軌非破壊検査, 49 (3), pp. 176・182, (2000)
- 3) B. Wincheski,J.P. Fulton, S.Nath, M.Namkung and J.W.Simpson : Self-nulling Eddy Current Probe for Surface and Subsurface Flaw Detection”, Materials Evaluation, 52(1),pp.22-26, (1994)
- 4) K.Krzywosz : Latest Eddy Current Applications in the Nuclear Industry,13th International Conf. Nuclear & Pressure Vessel Industries, Kyoto, Japan, pp.61-65, (1995)
- 5) G.L.Burkhardt,J.L.Fisher,J.S.Stolte,S.R.Kramer and K.L.Cobble: NDE of Aging Aircraft Structure Using Orthogonal-axis Eddy Current Probes, Review of Progress in QNDE,Vol.16,pp.1021-1027, (1997)
- 6) 星川 洋, 小山 潔 : 回転渦電流を利用した渦流探傷プローブ,日本AEM学会誌,3(3), pp.36-42, (1995)
- 7) 星川 洋,小山 潔 : きず深さの評価を目指したリフトオフ雑音が小さい渦電流探傷上置プローブの提案,非破壊検査 53(5),pp.288-293, (2004)
- 8) 星川 洋,小山 潔,三橋 宗太郎 : 一様渦電流プローブによる磁性体の渦電流探傷と漏洩磁束探傷について,非破壊検査,54(2),pp.84-90, (2005)
- 9) 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新形上置プローブに関する研究,非破壊検査,50(11),pp.736-742, (2001)
- 10) 福岡 克弘,橋本 光男 : マルチ化した一様渦電流プローブによる自然き裂の探傷評価,電学論 A,126,12,pp.1255-1261, (2006)
- 11) K.Urabe, A.Saeki and M.Kawakami : Eddy Current Inspection of Fiber Fracture in CFRP, Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium, pp.2147-2152 (1993)
- 12) 小山潔, 星川洋, 小島剛基 : 電磁誘導非破壊試験による CFRP の損傷検出に関する基礎的検討, 第 1 回日本複合材料合同会議講演論文集, JCCM-1 (2010)
- 13) K.Koyama, H.Hoshikawa and G.Kojima : Eddy Current Nondestructive Testing for Carbon Fiber-Reinforced Composites, Journal of Pressure Vessel Technology, 135(4), pp.1-5 (2013)

第二章 上置プローブによる渦電流探傷試験

2.1 背景

従来、構造物の表面や表面近傍のきず検出には、自己誘導形の円形上置プローブが用いられる。しかし、試験対象とプローブとのリフトオフが走査に伴う振動などによって僅かに変わるだけで、リフトオフ雑音が生じるので小さいきずの検出が困難である。リフトオフ雑音の問題を解決する方法として、プローブを自己比較方式で構成する方法があるが¹⁾、プローブが振動などによって傾いた場合には雑音を抑制できない。また、きずの深さ評価に際しては、信号の大きさを利用した評価が行われてきたが、深さが同じきずであっても、きずの長さ、幅、形状が変わると、信号の大きさも変わるので、定量的な評価が困難である。なお、きず深さの評価方法として、内挿プローブの場合に用いられる、きず信号の位相を利用した評価方法があるが、上置プローブの場合では、リフトオフ雑音によって信号の位相が大きく変化するので、信号位相を利用したきず深さの評価が困難である。上置プローブには以上のような問題点があり、この問題を解決する方法として、リフトオフ雑音が発生しないプローブと、得られたきず信号から精度高くきずの深さを評価する方法が必要である。きず検出と評価の精度を向上させることで、渦電流探傷試験の信頼性向上が期待できる。

近年では、原理的に雑音が発生せず、きずによる信号のみを検出することが可能なプローブとして、クロスポイントプローブや一様渦電流プローブといったプローブが開発され、これらのプローブは実際に雑音小さくきずを検出することが可能という報告がある^{2~11)}。また、「きずによって発生する渦電流分布の変化だけを検出することで、原理的にリフトオフ雑音が発生しない」という考えに基づき、星川・小山らによって新形の上置プローブとして Θ プローブが開発・提案されている。このプローブは、原理的にリフトオフ雑音が発生せず、クロスポイントプローブや一様渦電流プローブと同等以上の精度できずの検出が可能で、SN比高くきずの検出が行える。また、得られるきず信号の位相が安定しており、内挿プローブと同様に、きず信号の位相に基づいたきず深さの評価が可能という報告がある¹²⁾。

本章では、単純形状のきずに対して、従来の自己誘導形の円形上置プローブと新形の Θ プローブを適用した際に得られるきず検出特性について比較検討を行った。

2.2 渦電流探傷 Θ プローブの構造と特長

図 2.1 に Θ プローブの構造図を示す。 Θ プローブは、円形横置ききの励磁コイルと矩形縦置ききの検出コイルによって構成されており、励磁コイルは試験体にコイルの巻線方向に同心円状の渦電流を誘導し、検出コイルは巻線方向に流れる渦電流によって発生する磁束の変化をきず信号として検出する。このプローブは、きずが存在しないときには検出コイルの巻線方向に流れる渦電流の成分がないので、きず信号が発生しない。また、リフトオフが高さ方向に変化した場合、試験体に誘導される渦電流の強さは変化するが、リフトオフ変化による雑音が発生しないという特長がある。

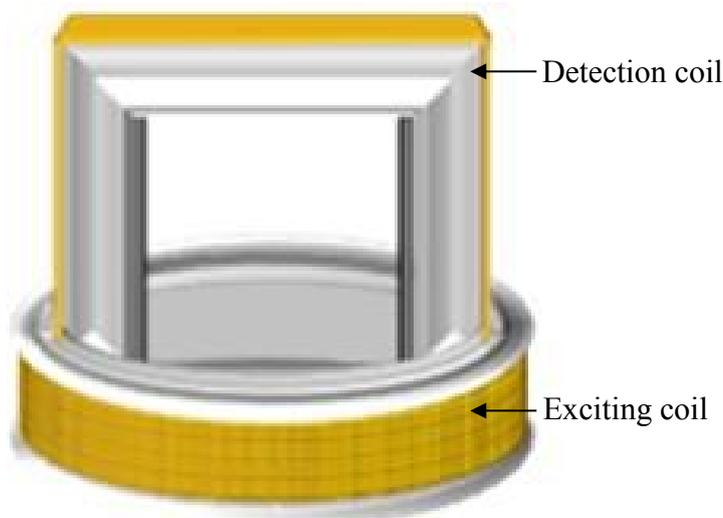


図 2.1 Θ プローブの構造図

2.3 自己誘導形の円形上置プローブの構造と特徴

図 2.2 に自己誘導形の円形上置プローブの構造図を示す。自己誘導形の円形上置プローブは、円形横置ききの単一のコイルによって構成されており、一つのコイルで、試験体への渦電流を誘導するための励磁と、渦電流の変化によって生じるきず信号の検出とを兼ねて行う。このプローブは、試験体の寸法に関係なく、コイル径を決められるので、試験体表面の局所部分にのみ渦電流を誘導して探傷できるが、リフトオフ雑音大きいといった特徴がある。

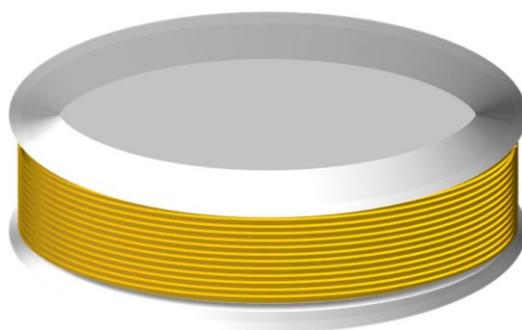


図 2.2 円形上置プローブの構造図

2.4 Θプローブの探傷原理

図 2.3 にきずがない場合の探傷原理を示す。図 2.3(a)のようにきずがない場合、渦電流は励磁コイルの円周方向にのみ誘導され、その分布は検出コイルの巻線方向を軸に左右対称に誘導される。この時、渦電流によって生じた検出コイルを貫く磁束の総和は打ち消しあって零になるので、検出コイルに起電力が発生しない。図 2.3(b)のようにきずがなくリフトオフが大きくなった場合、試験体に誘導される渦電流の強さは小さくなるが、その分布は検出コイルの巻線方向を軸に左右対称に誘導されているので、渦電流によって生じた検出コイルを貫く磁束の総和は打ち消しあって零になるので、高さ方向に変化した場合でも検出コイルに起電力が発生しない。

図 2.4 にスリット状のきずと検出コイルの巻線方向が平行になるように走査した場合の探傷原理ときず信号波形を示す。なお、渦電流探傷試験では、励磁コイルの交流電流と同相(In-phase component)(図 2.4(a))と 90 度進相(Quadrature component) (図 2.4(b))の複素電圧がきず信号として得られる。また、図 2.4(c)にきず信号パターンを示す、横軸は同相成分の電圧、縦軸は進相成分の電圧である。検出コイルがきずの左側に位置する場合、きずを避けて流れた渦電流が、検出コイルの近傍を巻線方向と平行に流れるので、起電力が発生する(図中①)。きずの真上に検出コイルが位置する場合、きずを中心に渦電流が左右対称に誘導されるので、検出コイルを貫く磁束の総和が零になる(図中②)。したがって、検出コイルに起電力が発生しない。検出コイルが、きずの右側に位置する場合、左に位置するときと同様に、検出コイルに起電力が発生する(図中③)。なお、検出コイルがきずの右側に位置するときの信号は、左側に位置する時とは、逆極性の信号が発生する。

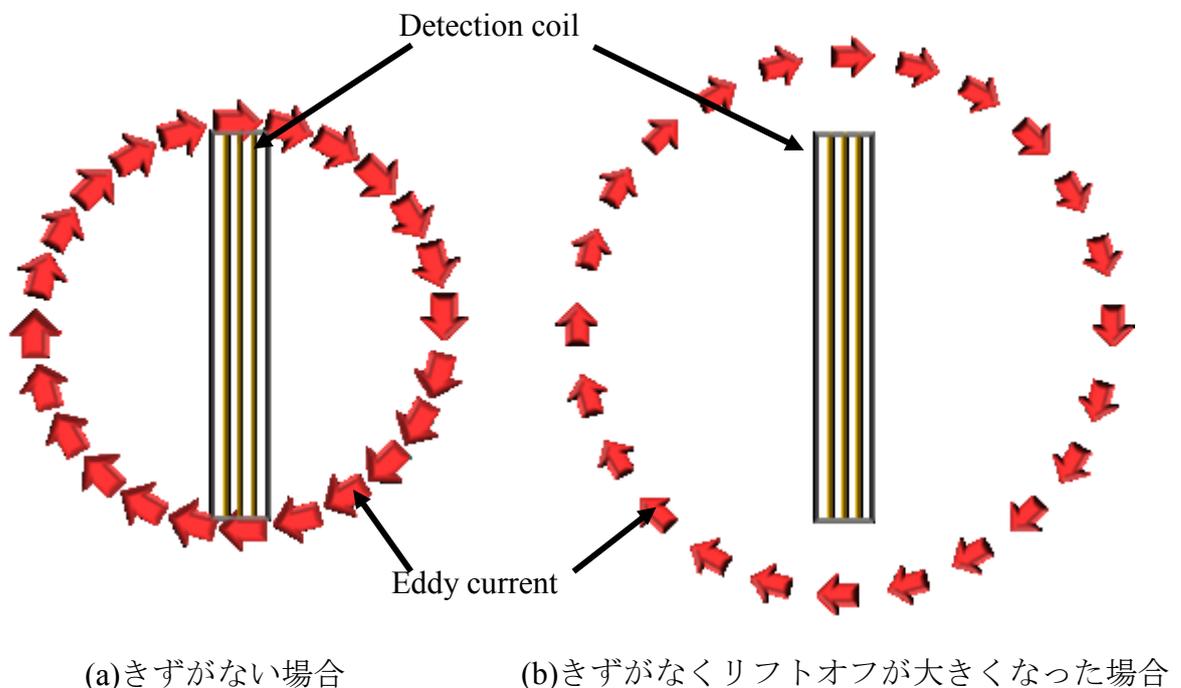
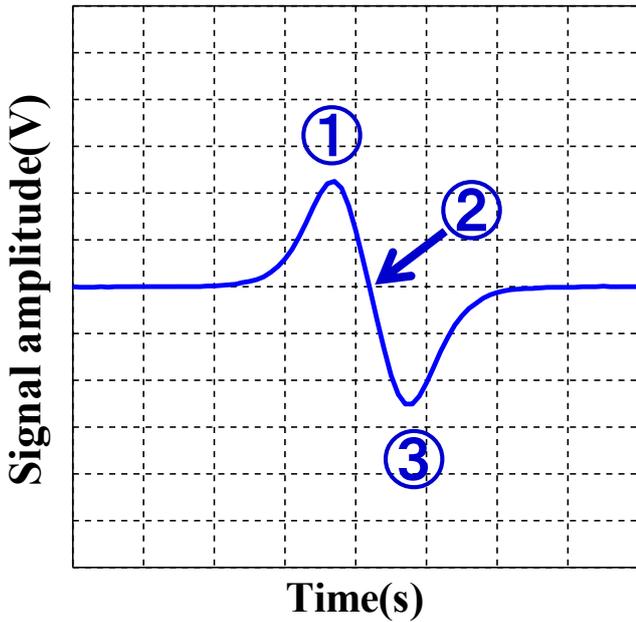
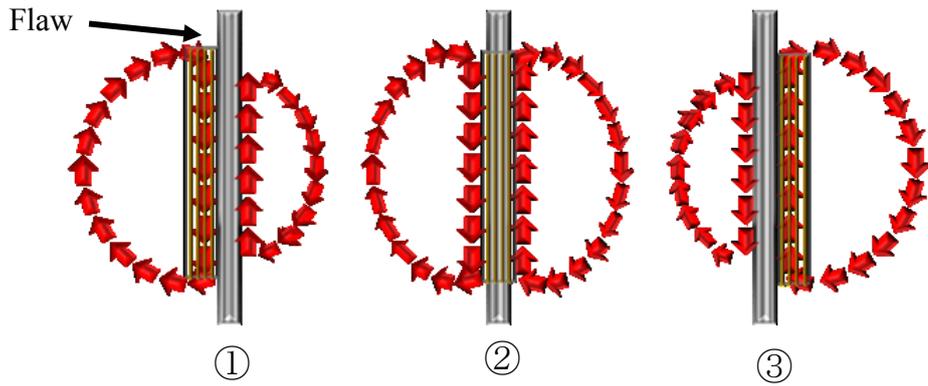
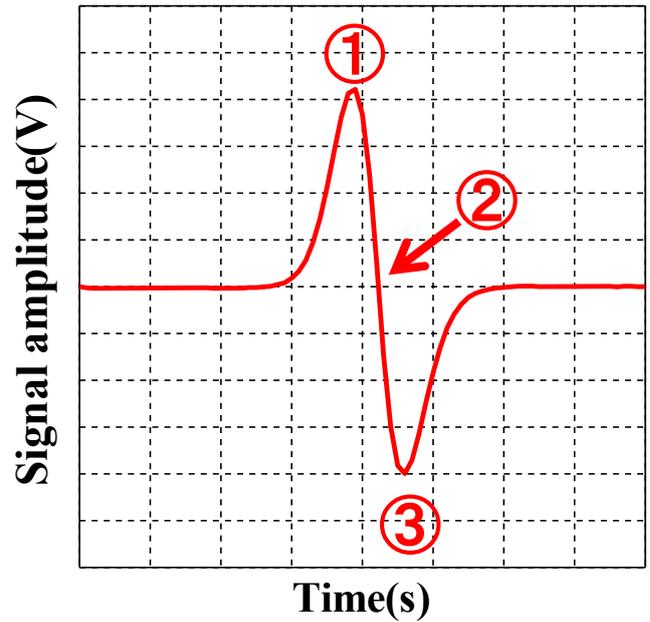


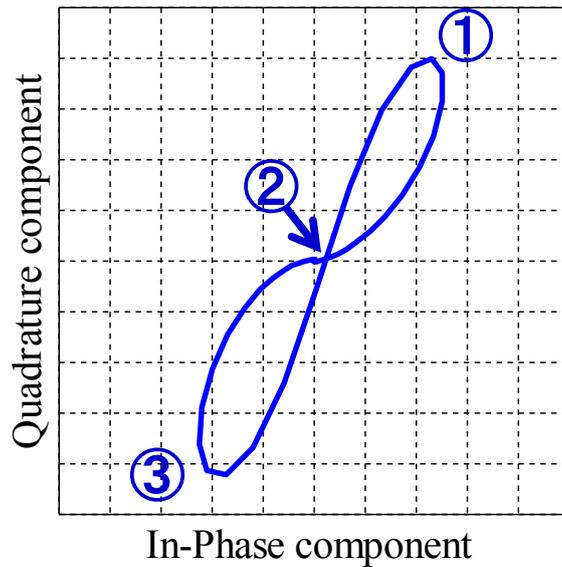
図 2.3 きずがない場合のΘプローブの探傷原理



(a)同相成分のきず信号波形



(b)進相成分のきず信号波形



(c)きず信号パターン

図 2.4 スリット状のきずと平行に走査した場合の
θプローブの探傷原理ときず信号波形

2.5 実験装置の構成

図2.5に実験装置の構成を示す。Personal Computer (PC)はXYテーブルを制御するI/O boardと検出信号を取り込むA/D boardを内蔵している。ロックインアンプから発生した励磁信号はパワーアンプで増幅され、励磁コイルに入力される。励磁信号を受けた励磁コイルは、試験体に渦電流を誘導する。試験体のきずによって、渦電流が変化すると、検出コイルの起電力も変化する。検出コイルの起電力の変化が、きず信号として検出される。きず信号は、ロックインアンプに送られる。ロックインアンプのアナログ出力をA/D boardによりデジタル信号に変換され、PCのハードディスクに記録される。試験に用いるプローブは、XYテーブルに設置した試験体の上に非導電性シートを敷きその上に設置した。

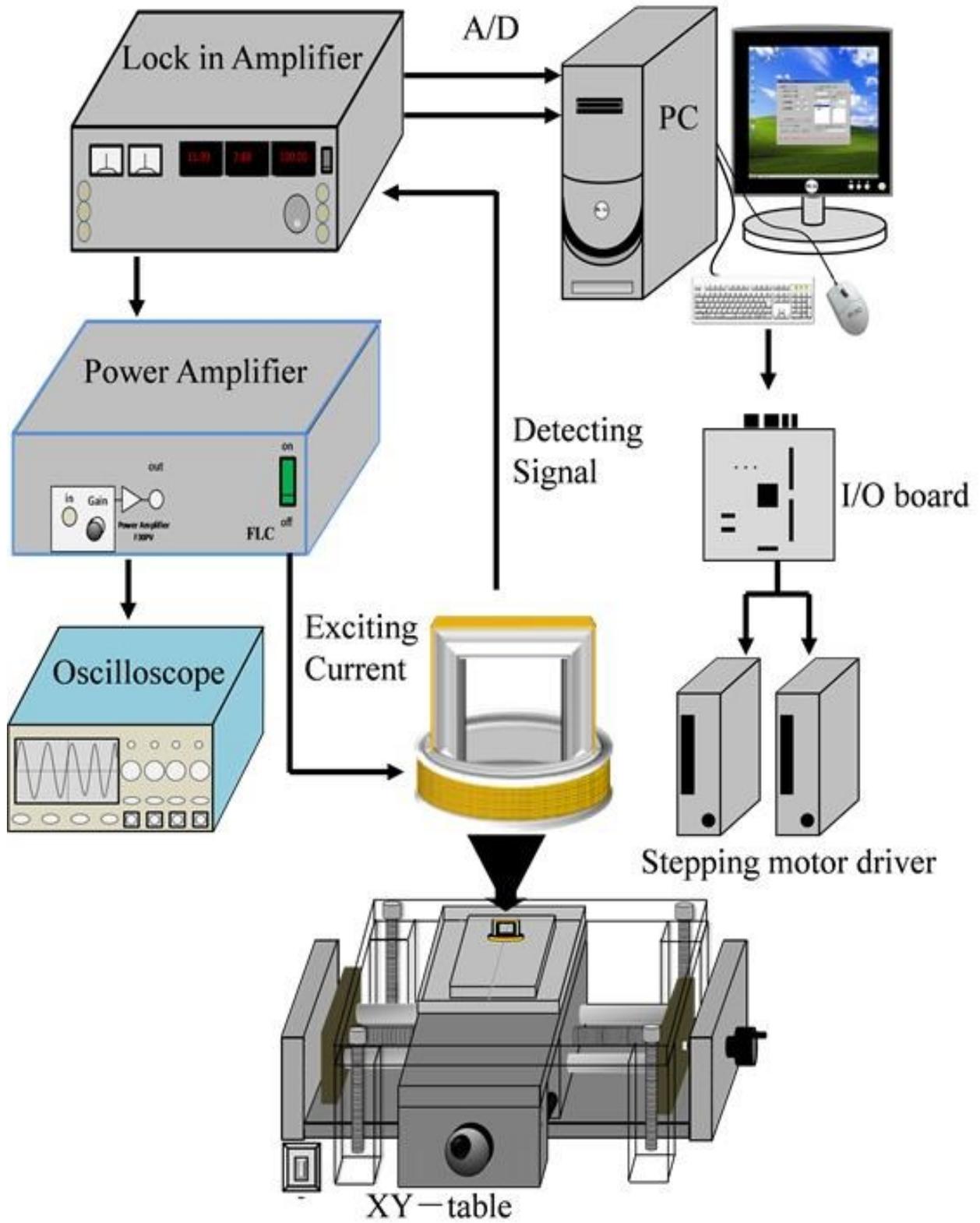


図 2.5 実験装置の構成

2.6 試験体ときずの形状及び寸法

試験体の寸法を図 2.6 に示す。試験体には SUS304 系の平板試験体を用いた。試験体には放電加工によって矩形型のスリットきずを施した。きずの断面形状を図 2.7 に示す。表 2.1 にきずの寸法を示す。

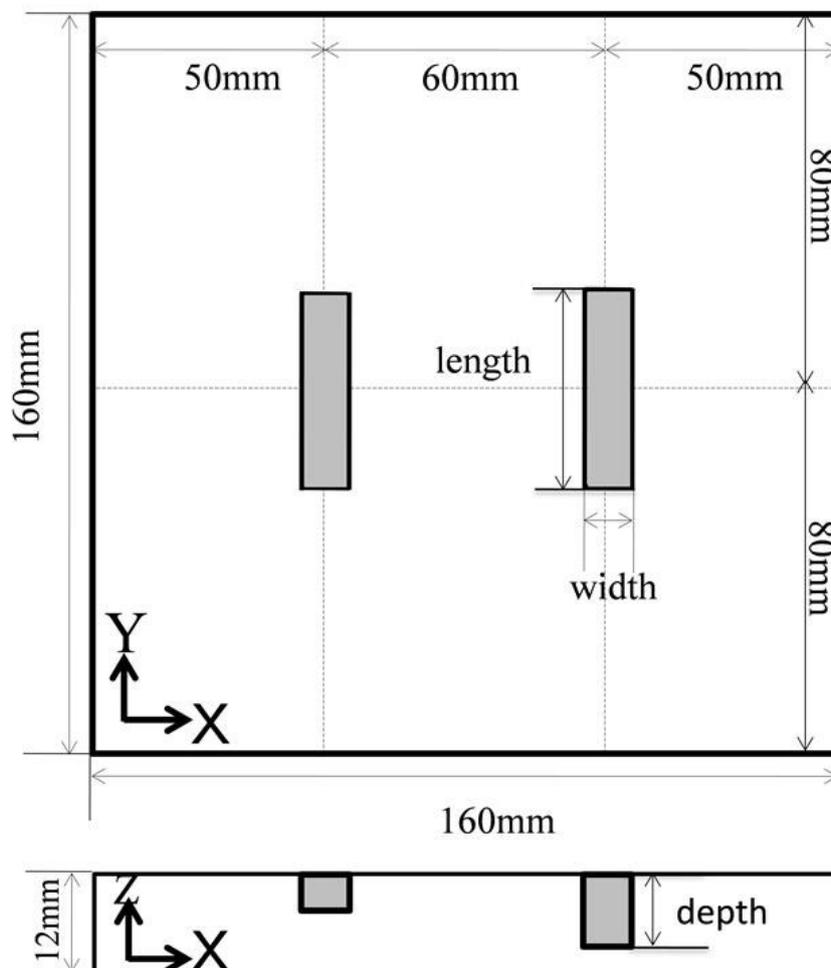


図 2.6 試験体の寸法

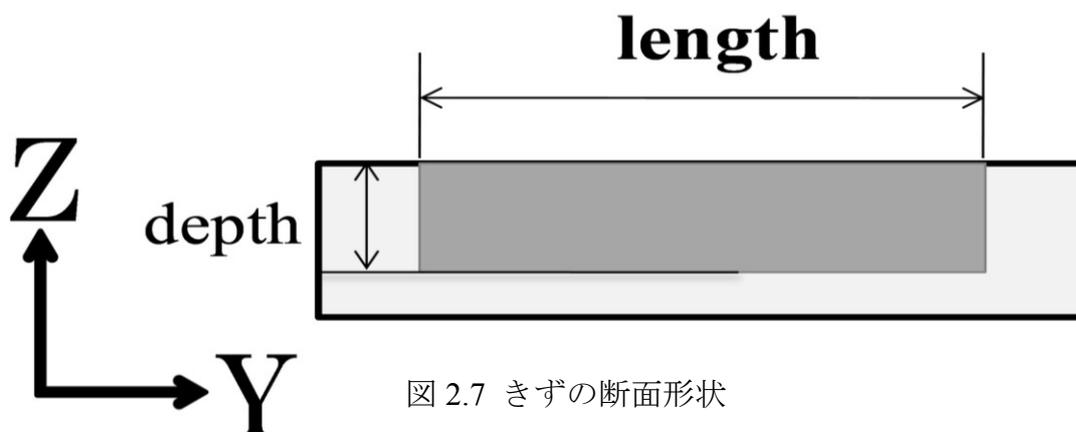


図 2.7 きずの断面形状

表 2.1 きずの寸法

Unit(mm)

Flaw number	Length	Depth	Width
Rectangle1	25.0	1.0	0.4
Rectangle2	25.0	2.0	0.4
Rectangle3	25.0	4.0	0.4
Rectangle4	25.0	8.0	0.4

2.7 プロブの寸法と実験条件及び方法

⊖プロブの、励磁コイルの内径を 7mm、外径を 9mm、巻き線の太さを 0.16mm、巻線断面積を 1mm²、巻数を 70 回とした。検出コイルでは、縦 7mm、横 7mm、巻き線の太さを 0.09mm、巻線断面積を 1mm²、巻数を 150 回とした。実験条件として、試験電圧を 3V、試験周波数は 100kHz とし、プロブと試験体との間に薄い非導電性シートを挟みリフトオフを 0.5mm 一定とした。

上置プロブは⊖プロブの励磁コイルを利用した。実験条件として、試験電圧を 0.6V、試験周波数は 100kHz とし、プロブと試験体との間に薄い非導電性シートを挟みリフトオフを 0.5mm 一定とした。

プロブを X-Y テーブルに設置し、きずの中心から XY 軸ともに ±20mm の範囲で 2 次元探傷を行った。また、0.5mm 移動するごとに探傷データを取得した。なお、⊖プロブについては、検出コイルの巻線方向が Y 軸方向となるように設置した。

2.8 きず信号振幅の擬似カラー画像表示

図 2.8 に⊖プロブを適用した場合、図 2.9 に上置プロブを適用した場合の 2 次元探傷によって得られたきず信号振幅の擬似カラー画像を示す。渦電流探傷試験では、励磁コイルの交流電流と同相(In-phase component)と 90 度進相(Quadrature component)の複素電圧が得られるので、きず信号振幅は $\sqrt{(Inphase)^2 + (Quadrature)^2}$ より得られる。図中のカラーバーは信号振幅の大きさを示している。⊖プロブと上置プロブのどちらの場合も、きずの長さ方向に対して左右対称にきず信号が得られていることがわかる。しかし、上置プロブの場合、きずがない部分(図中黒枠部など)で雑音が発生していることがわかる。

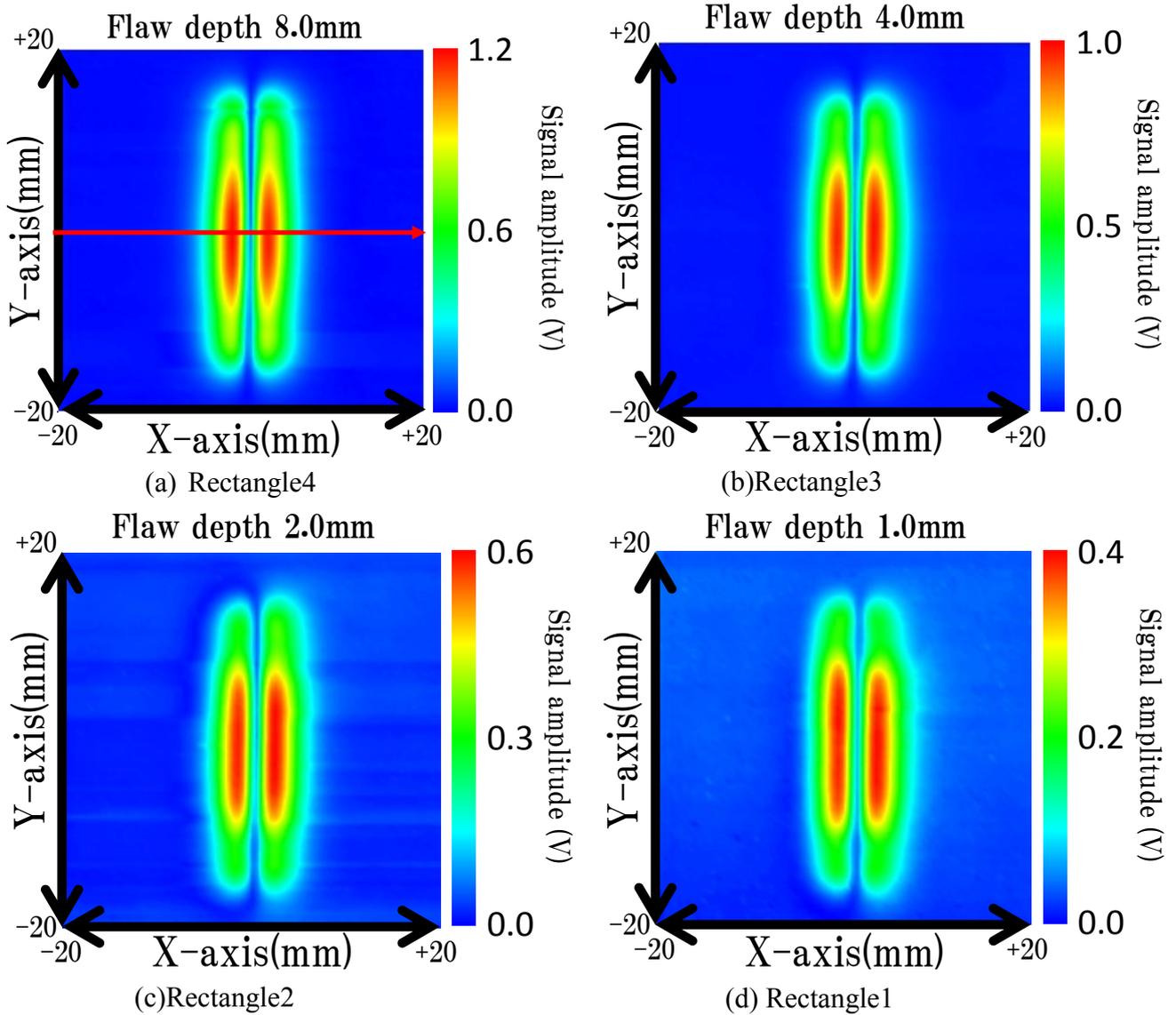


図 2.8 Θ プローブを適用した場合の
信号振幅の擬似カラー画像

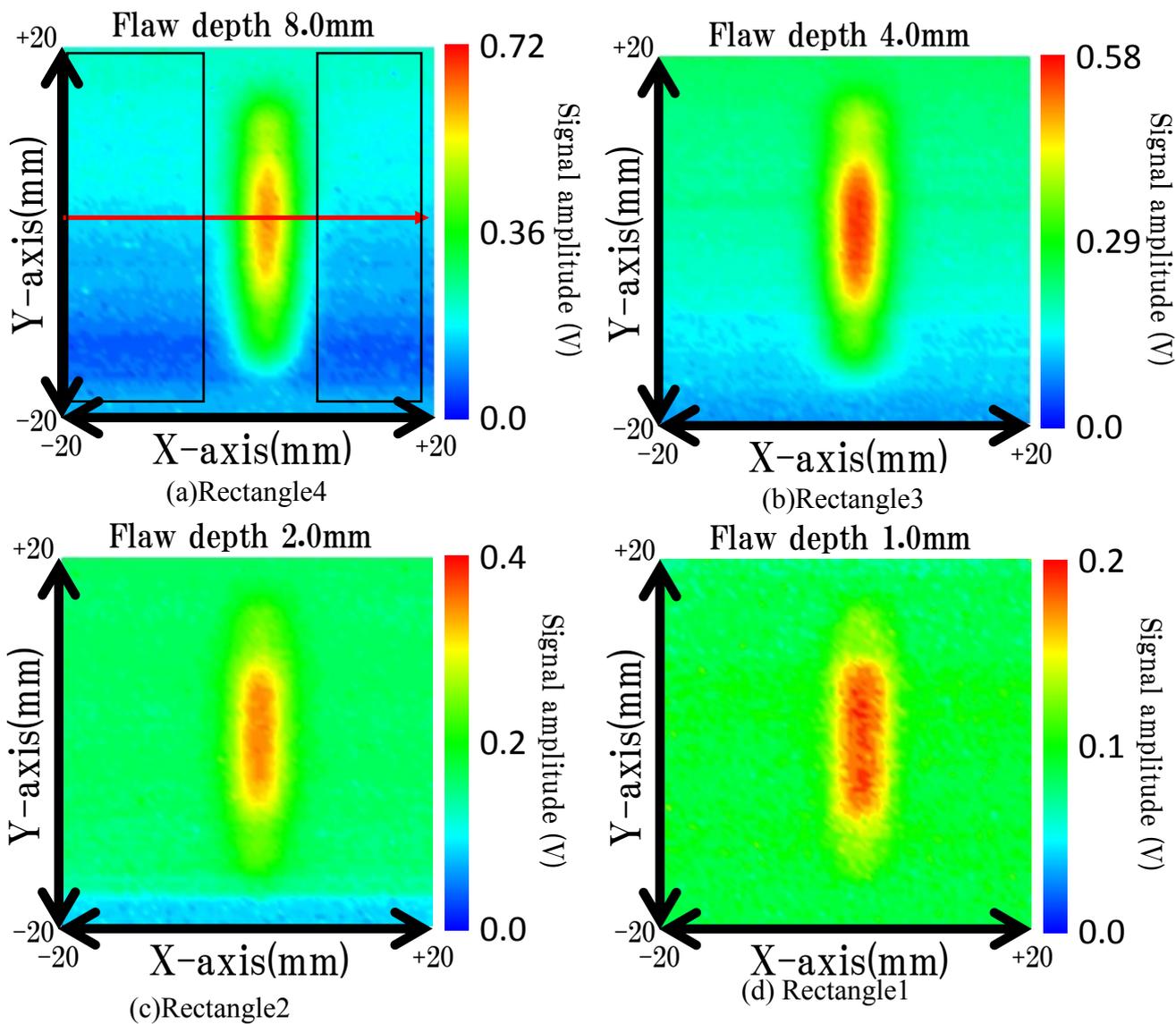


図 2.9 上置プローブを適用した場合の
信号振幅の擬似カラー画像

2.9 Θプローブと上置プローブのきず検出特性

図 2.10(a),(b)にΘプローブと上置プローブのきず信号パターンを示す。なお、きず信号パターンは、横軸にきず信号の同相成分、縦軸に進相成分として描く。きずが単純形状の場合、きずの中心部で最も信号が大きくなるので、きずの中心部の X 軸方向(図 2.8(a)及び図 2.9(a)中赤矢印の位置)のきず信号を利用して信号パターンを描く。どちらのプローブもきずが深くなると信号パターンが大きくなるのがわかる。また、Θプローブの場合、きず信号の大きさに対して雑音(noise)が小さく、信号パターンが安定しており、きずが深くなるとパターンの傾きが遅れる(時計回りの方向に傾く)ので、パターンの傾きを利用したきず深さの評価が期待できる。上置プローブの場合、信号の大きさに対して雑音が大きく、きずが深くなると信号パターンが遅れるが、雑音によってパターンの傾きが安定しないので、きず深さの評価に利用することが困難である。なお、きずが深くなると信号パターンが遅れるのは、誘導された渦電流の位相が導体内部に浸透するにつれて遅れるためである。次に図 2.11 に示す信号振幅波形からΘプローブと上置プローブの SN 比を求めて比較を行った。なお、図は上置プローブの信号振幅波形を一例として示している。また、図中のきず信号の波形(青い波形)は図 2.9 中の赤矢印の位置の信号を利用しており、雑音信号の波形(赤い波形)は、試験体のきずがない部分を走査した際に得られた信号である。SN 比はきず信号の最大値と雑音の最大値の比である。図 2.12 にΘプローブと上置プローブのきず深さに対する SN 比を示す。上置プローブの場合、きずの深さが 8mm で SN 比が 10 程度なのに対して、Θプローブの場合、きずの深さが 8mm で SN 比が約 110 なので、Θプローブの方が SN 比高くきずの検出が可能である。

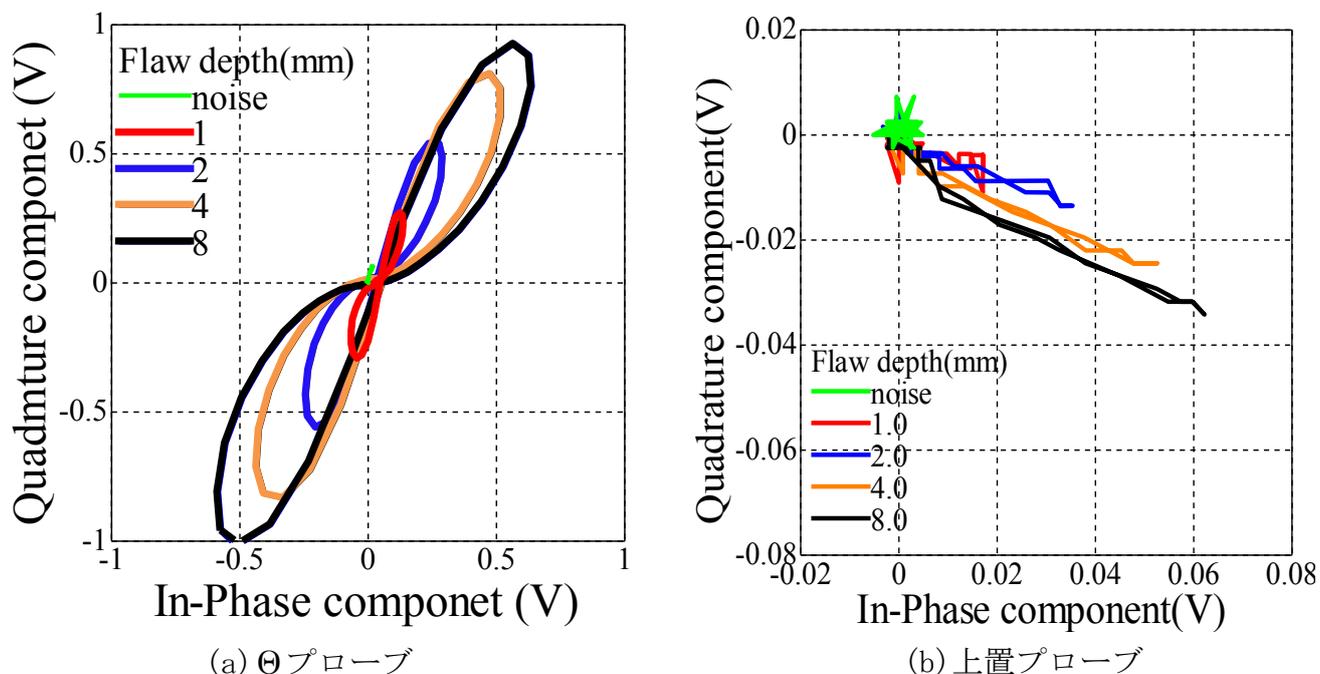


図 2.10 きず信号パターン

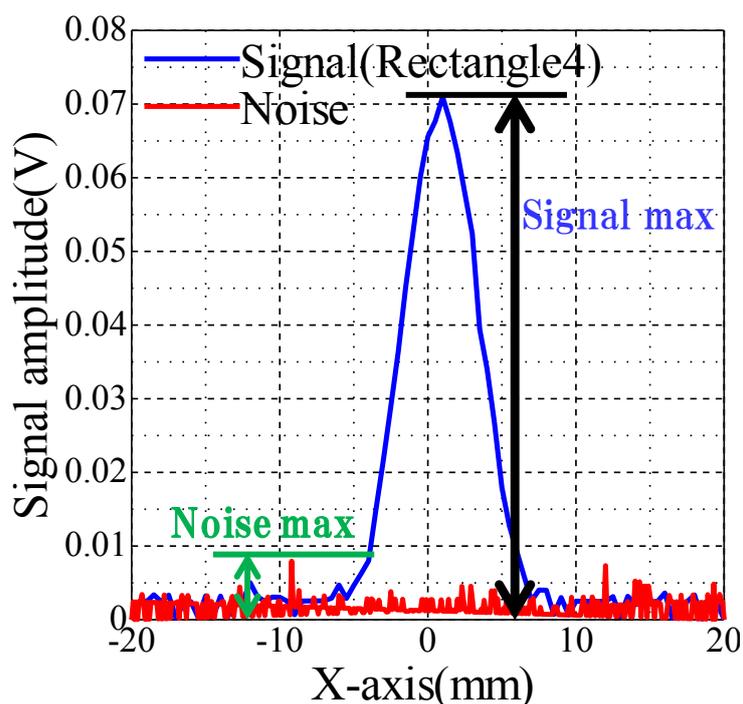


図 2.11 上置プローブの信号振幅波形
(Rectangle4)

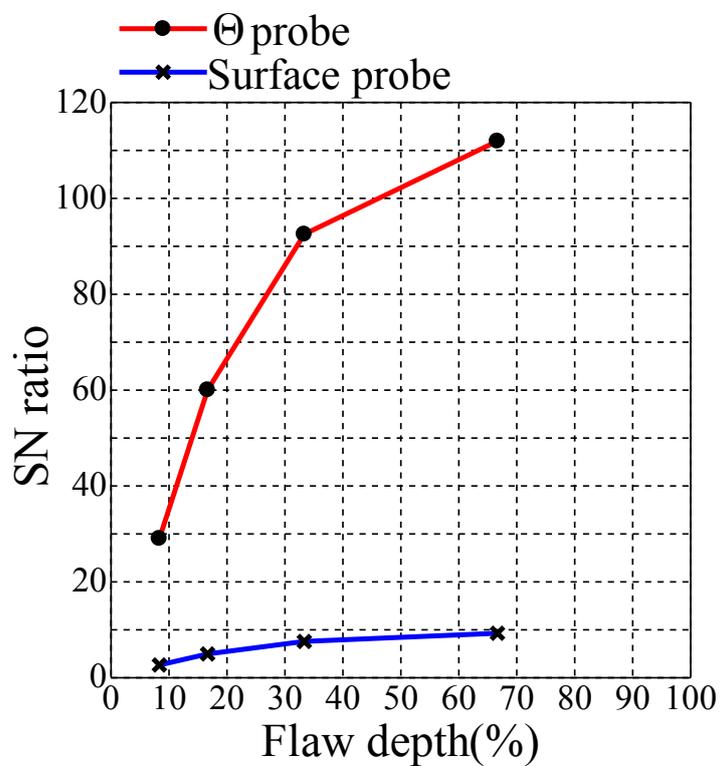


図 2.12 きずの深さに対する SN 比

2.10 まとめ

第二章では従来の自己誘導形の円形上置プローブと、原理的に雑音が発生しない新形の Θ プローブのきず検出特性について比較検討を行った。以下に本章の結果について示す。

- 1) 従来の自己誘導形の円形上置プローブの場合、きず信号の大きさに対する雑音が大きく、SN比が低い。また、雑音の影響できず信号パターンの傾きが安定しないので、きずの深さ評価への利用が困難である。
- 2) Θ プローブの場合、従来の円形上置プローブと比べて雑音が小さく、SN比高く、信頼性の高いきず検出が可能である。また、表面きずの場合には、きずが深くなるときず信号パターンが遅れることが明らかになった。
- 3) Θ プローブの場合、きず信号が安定しているので、信号の振幅を評価に利用できることがわかった。また、きず信号パターンも安定しているので、パターンの傾きを利用したきず深さの評価が期待できる。

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会編：渦流探傷試験Ⅱ，日本非破壊検査協会，p. 51，(1995)
- 2) B・Wincheski・J.P.Fulton. S.Nath, M・Namkung and J. W. Simpson : Self-nulling Eddy Current Probe for Surface and Sub surface Flaw Detection , Materials Evaluation , 52 (1), pp. 22-26, (1994)
- 3) K.Krzywosz : Latest Eddy Current Applications in the Nuclear Industry, 13th Intemational Conf.Nuclear&PressureVessel Industries, Kyoto, Japan, pp. 61-65, (1995)
- 4) 星川 洋. 小山 潔:回転渦電流を利用した渦流探傷プローブ, 日本 AEM 学会誌, 3 (3), Pp36-42, (1995)
- 5) G・L.Burkhardt, J.L.Fisher, J.S.Stolte, S.R. Kraemer and K.L. Cobble : NDE of Aging Aircraft Structure Using Orthogonal axis Eddy Current Probes, Review of Progress in QNDE, Vol. 16, pp. 1021-1027, (1997)
- 6) H.Hoshikawa and K.Koyama : A New Eddy Current Probe Using Uniform Rotating Eddy Current, Materials Evaluation, 56 (1), pp. 85-89, (1998)
- 7) 小山 潔, 星川 洋, 柄澤 英之 : リフトオフ雑音の発生しない新型渦流探傷プローブについて, 平成 11 年度 NDI 秋季大会講演概要集, pp. 111-112, (1999)
- 8) 星川 洋, 小山 潔, 柄澤 英之 : きず深さに関する位相情報を有する渦流探傷上置プローブについて, 平成 12 年度 NDI 春季大会講演概要集, pp. 101-102, (2000)
- 9) 星川 洋, 小山 潔 : 回転渦電流を利用した渦流探傷プローブ, 日本 AEM 学会誌, 3(3), pp.36-42, (1995)
- 10) 星川 洋, 小山 潔 : きず深さの評価を目指したリフトオフ雑音が小さい渦電流探傷上置プローブの提案, 非破壊検査 53(5), pp.288-293, (2004)
- 11) 星川 洋, 小山 潔, 三橋 宗太郎 : 一様渦電流プローブによる磁性体の渦電流探傷と漏洩磁束探傷について, 非破壊検査, 54(2), pp.84-90, (2005)
- 12) 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新型上置プローブに関する研究, 非破壊検査, 50(11), pp.736-742, (2001)

第三章 ステンレス鋼材のきず検出と評価

3.1 背景

1970年代の高度経済成長期、あるいはそれ以前に建設された構造物には経年劣化に伴う事故や破壊の危険性がある。中でも、発電プラントなどのプラント構造物では、応力腐食割れや熱疲労割れといった割れきずが生じる事例が報告されている。応力腐食割れ(Stress Corrosion Cracking :以降は SCC)は、腐食性の環境に置かれた金属材料に引張応力が作用することで割れが生じる。再循環系配管や制御棒の周囲に配置されるシュラウドなどで発生することがある。事故の一例として、1969年に英国の原子力発電所5号タービン発電機において、SCCが原因で低圧タービンのバースト事故が起きている。また、熱疲労割れは、機器の部材が加熱または冷却され、何らかの拘束により部材が温度変化に伴う伸縮ができない場合に熱応力が生じ、これが繰り返して発生することで割れが生じる。熱交換器の出口配管やバイパス配管との合流部などで発生することがある。事故の一例として、1999年に国内の敦賀原子力発電所2号機で熱疲労割れが原因で配管からの一次冷却水漏洩が起きている。これらのきずは発生時には小さい場合でも、時間経過と共に大きくなるので、早期発見が重要となる。また、きずが発見された場合、維持基準に沿って補修や交換の判断を技術的に行う必要があるため、精度高いきずの検出と評価が求められる。

発電プラントでは、保守検査期間が設けられており、その期間内できずの検出と評価を行ったうえで、維持基準の判定を行う必要がある。保守検査における非破壊試験法として、きずの定量評価に優れる超音波探傷試験や放射線透過試験が用いられるが、これらの試験方法は1か所の試験時間が長いので、構造物全体を試験するには膨大な時間がかかってしまう。そこで、非接触かつ高速度での検査が可能な、渦電流探傷試験と組み合わせて行うことで、効率的な試験を行うことが可能である。しかし、単一の周波数による従来の自己誘導形の円形上置プローブでは試験中の振動などによってリフトオフが変わるとリフトオフ雑音が発生するので、小さいきずの検出は困難であった。また、きず深さの評価を行う場合には、対比試験片に加工された人工きずの信号と、実際のきずから得られた信号の大きさを比較する方法がある。しかし、きず信号の大きさは、きずの深さが同じ場合でも、きずの長さ、幅、形状の影響を受けてしまうので、きず深さの評価精度が低いという問題点もある。近年では、リフトオフ雑音の問題を解決するために、アレイプローブ、クロスポイントプローブや一様渦電流プローブなどの、原理的にリフトオフによる雑音が発生せず、きずによる信号のみを検出することができる新形の上置プローブが開発されている^{1~7)}。そして、SCCやTFCに対する先行研究として、複雑な自然き裂の分布形状を把握するのに有効とされる一様渦電流プローブに着目したマルチ一様渦電流プローブを適用した渦電流探傷試験によって、十分な精度の探傷が可能という報告がある⁸⁾。さらに、きずを正確に評価するために、有限要素法を利用した数値解析を行い、実測データと解析データを比較することで、逆問題的にきずの深さや形状を推定する研究も盛んに行われている^{9~19)}。しかし、一様渦電流探傷プローブの場

合、試験対象には一方向に渦電流が誘導されるので、渦電流の向きがきずの長さ方向と同方向の場合検出が困難という問題点がある。そこで、試験対象に円形に渦電流を誘導することで、きずの向きによらず検出が行うことが可能で、一様渦電流プローブと同等以上の精度できず検出が可能な Θ プローブがある。また、このプローブは得られるきず信号の位相が安定しているので、位相を利用したきずの深さ評価が可能という報告がある²⁰⁾。しかし、このプローブを適用した応力腐食割れと熱疲労割れの検出と評価についての報告は現在行われていない。

本章では、以上のような背景の下、初めに放電加工(以降は、EDM)きずに対して Θ プローブを適用したきず検出を行い、きず検出特性について検討を行う。そして、得られたきず信号からきずの評価方法の検討を行い、EDMきずの評価を行った。EDMきずから得られた知見に基づき、SCCやTFCに対して Θ プローブを適用したきずの検出を行い、得られたきず信号からきずの評価を行ったのでその結果について述べる。

3.2 放電加工きずを用いたきず検出及び評価方法の基礎的な検討

3.2.1 試験体

プラント構造物には、オーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 系が用いられているので、試験体の材質には SUS304 系を用いた。図 3.1 に試験体の寸法図を示す。試験体の寸法は縦 160mm、横 160mm、厚さ 12mm とした。試験体には深さ、長さ及び幅が種々異なるスリット状の矩形型のきずを 8 種、お椀型のきずを 2 種の合計 10 種類の EDM きずを施した。図 3.2 にきずの形状を示す。表 3.1 に EDM きずの寸法（きずの深さは最大値）を示す。

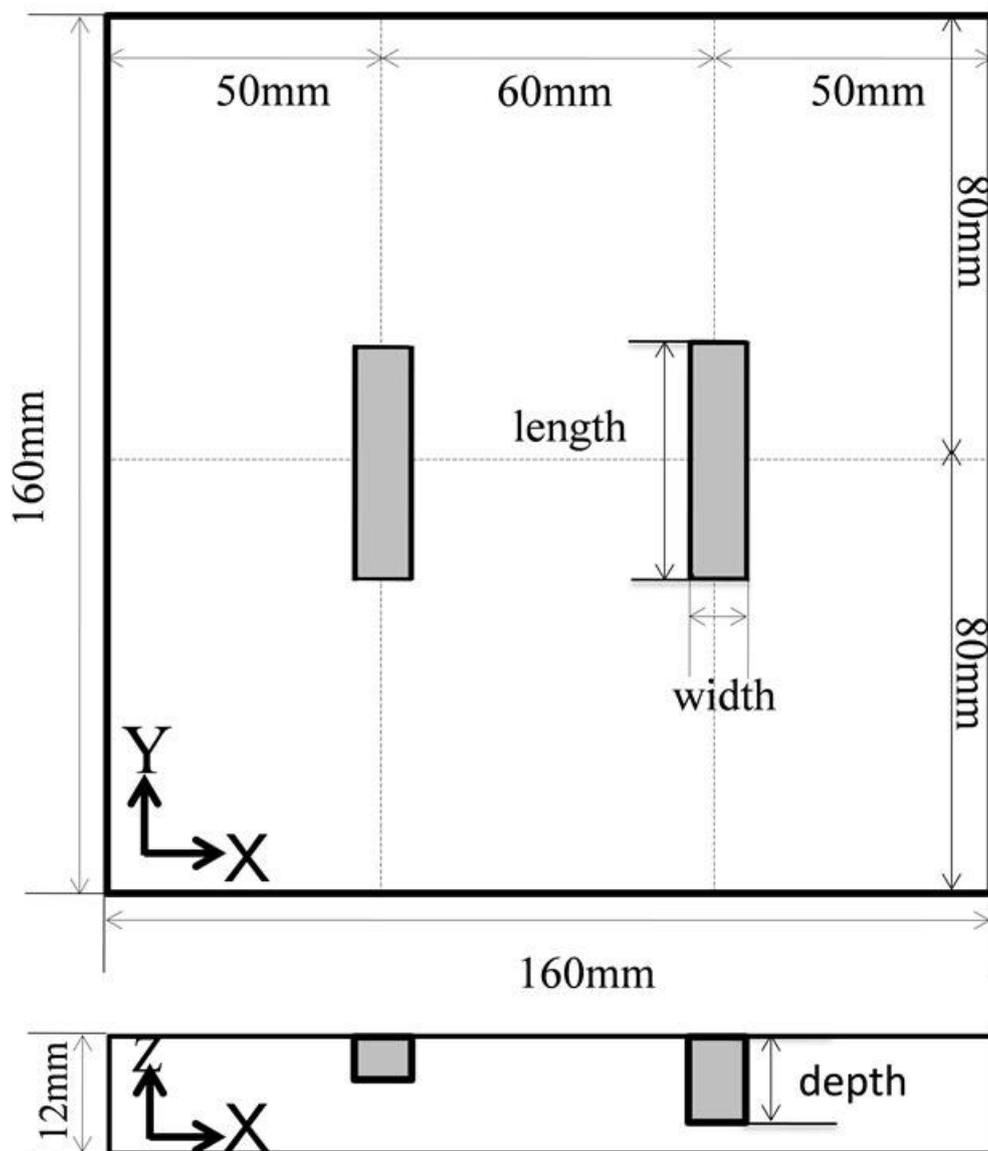
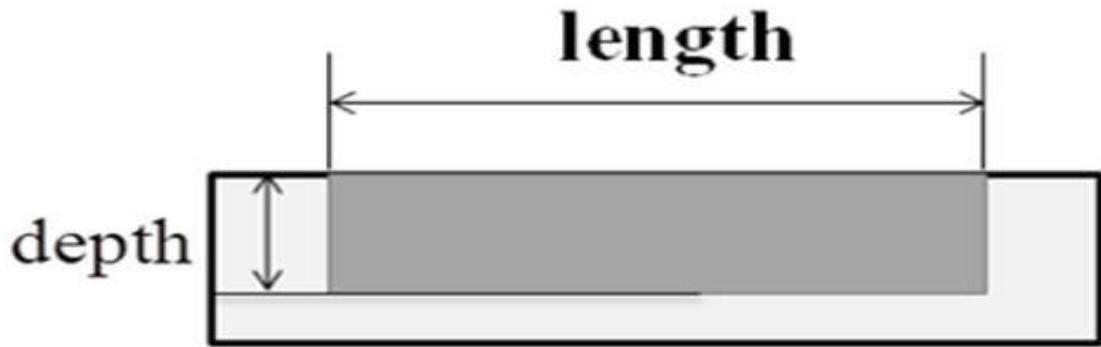
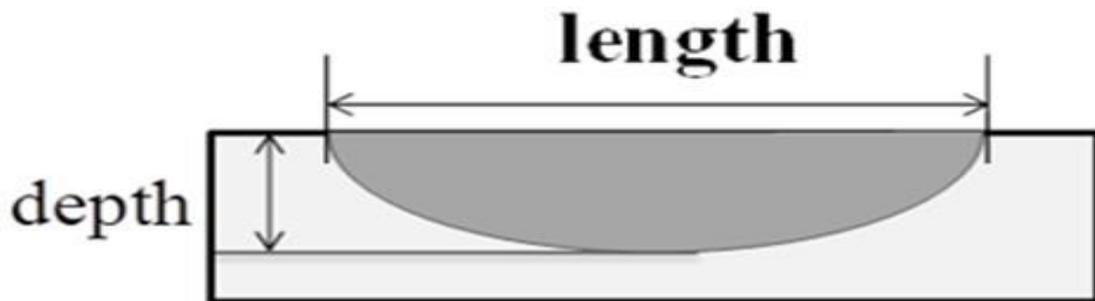


図 3.1 試験体の寸法



(a)Rectangle



(b)Bowl

図 3.2 きずの形状

表 3.1 EDM きずの寸法

Unit(mm)

Flaw number	Length	Depth	Width
Rectangle1	25.0	1.0	0.4
Rectangle2	25.0	2.0	0.4
Rectangle3	25.0	4.0	0.4
Rectangle4	25.0	8.0	0.4
Rectangle5	10.0	4.0	0.4
Rectangle6	15.0	4.0	0.4
Rectangle7	25.0	1.0	0.1
Rectangle8	25.0	1.0	0.2
Bowl 1	15.0	5.0	0.2
Bowl 2	25.0	8.0	0.4

3.2.2 ①プローブの寸法と実験条件及び方法

①プローブの、励磁コイルの内径を 7mm、外径を 9mm、巻き線の太さを 0.16mm、巻線断面積を 1mm^2 、巻数を 70 回とした。検出コイルでは、縦 7mm、横 7mm、巻き線の太さを 0.09mm、巻線断面積を 1mm^2 、巻数を 150 回とした。

実験条件として、試験電圧を 3V、試験周波数は 100kHz とし、プローブと試験体との間に薄い非導電性シートを挟みリフトオフを 0.5mm 一定とした。

実験方法については、①プローブの検出コイルの巻線方向を Y 軸方向になるように、X-Y テーブルに設置し、きずの中心から XY 軸ともに $\pm 20\text{mm}$ の範囲で 2 次元探傷を行う。また、0.5mm 移動するごとに探傷データを取得した。EDM きずの深さ、長さ、幅、形状が異なる場合の探傷データを取得した。また、SCC や TFC などの自然きずは長さ方向に角度を持つので、EDM きずの長さ方向の角度（以降は、きずの角度）を 5° 刻みで $\pm 10^\circ$ の範囲で変えて探傷データを取得した。

3.2.3 ①プローブによるきず信号振幅の擬似カラー画像

図 3.3～3.7 に 2 次元探傷によって得られた、信号振幅の擬似カラー画像を示す。きずの深さが異なる場合、きずに沿うように左右両側で信号が発生し、きずの中心部で最も信号が大きくなることわかる。また、きずの長さ、幅、形状及び角度が異なる場合もきずに沿ってきず信号が発生し、中心部で最も信号が大きくなる。しかし、きずの長さが 10mm の場合（図 3.4(a)）、中心部よりも両端部付近での信号の方が大きくなることがわかった。これは、きずの長さが励磁コイルの外径と同程度であるためだと考えられる。きずの長さと同程度の場合、検出コイルの中心がきずの中心部に位置する時、きずの両端部付近に励磁コイルの外縁が位置することになる。この時、渦電流はきずの両端部を回り込むように流れ、きずに沿って検出コイルの巻線方向に流れる渦電流が減少するので、得られるきず信号が小さくなると考えられる。

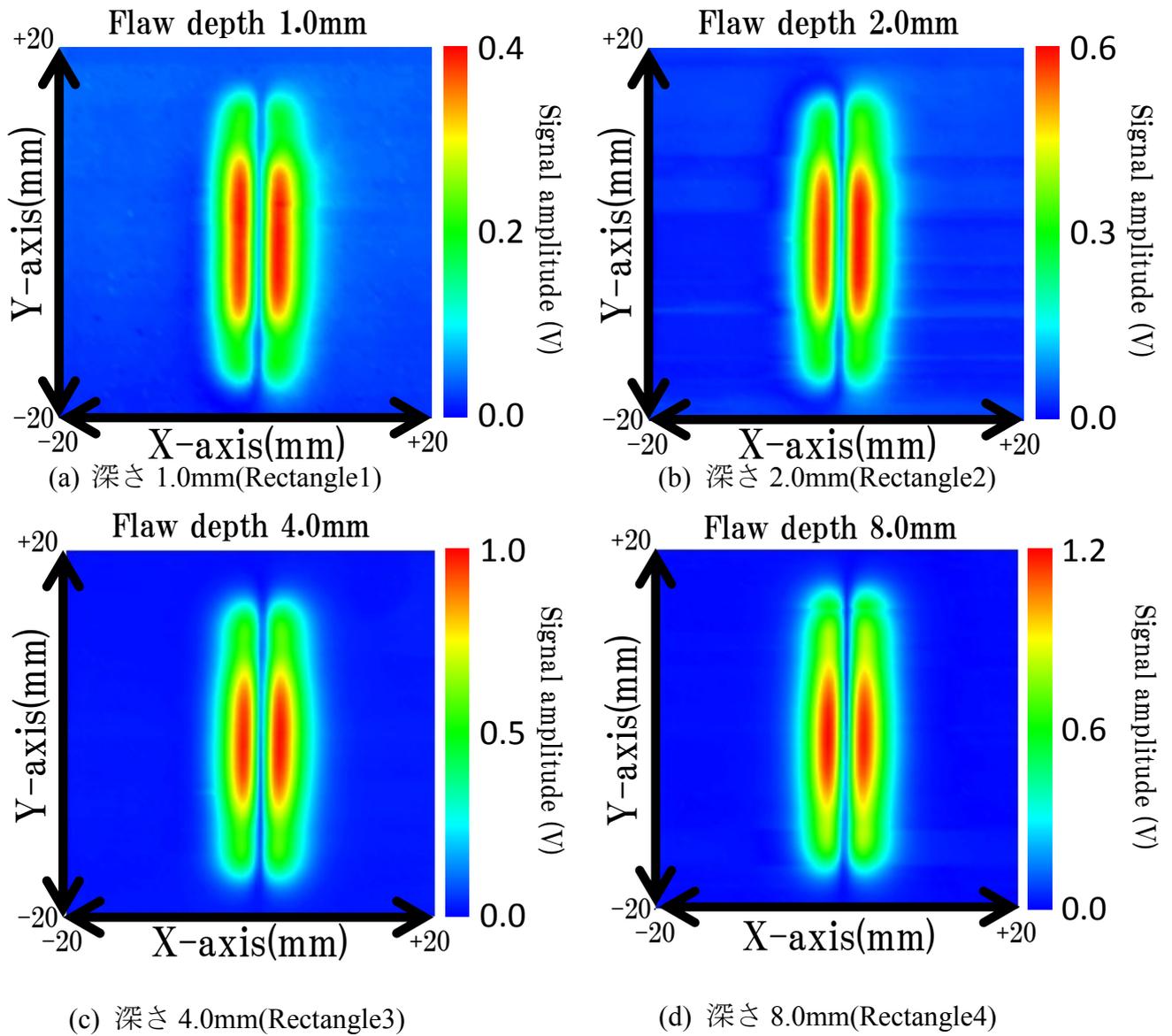
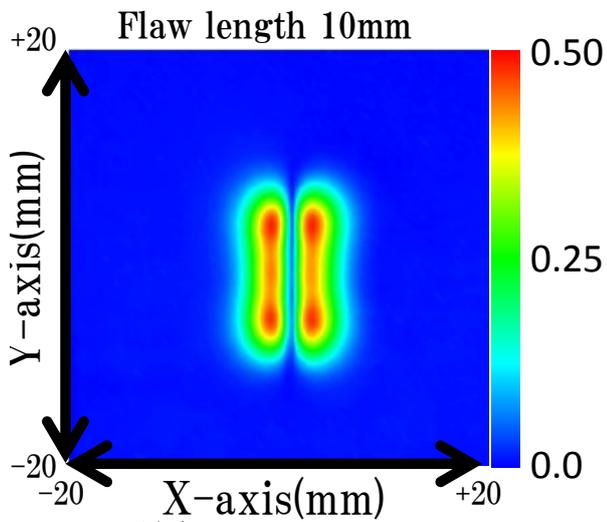
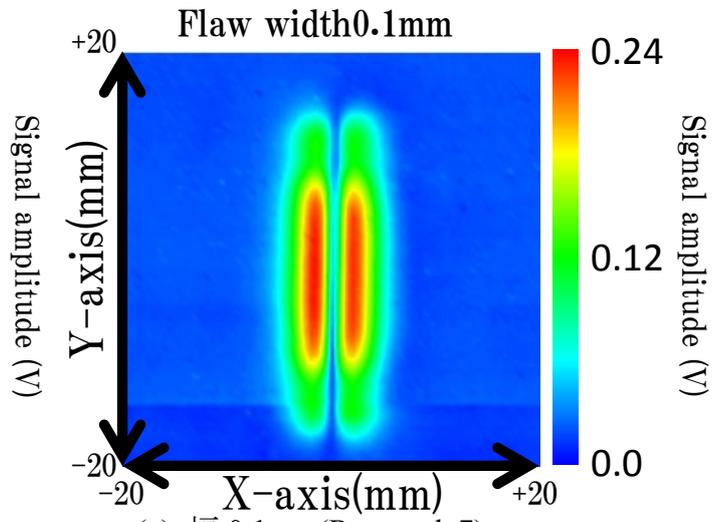


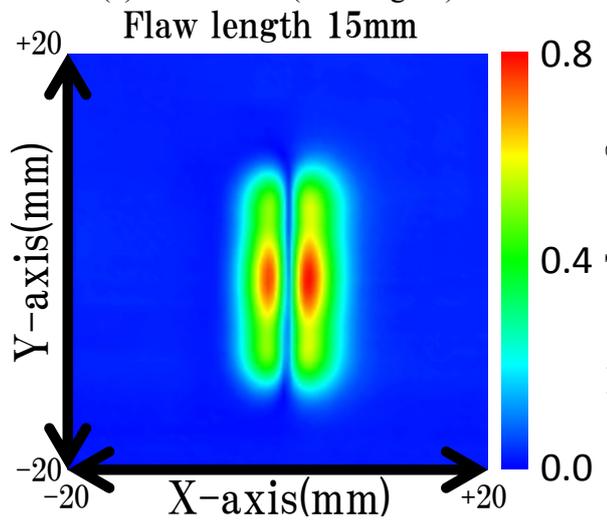
図 3.3 きずの深さが異なる場合の信号振幅の擬似カラー画像



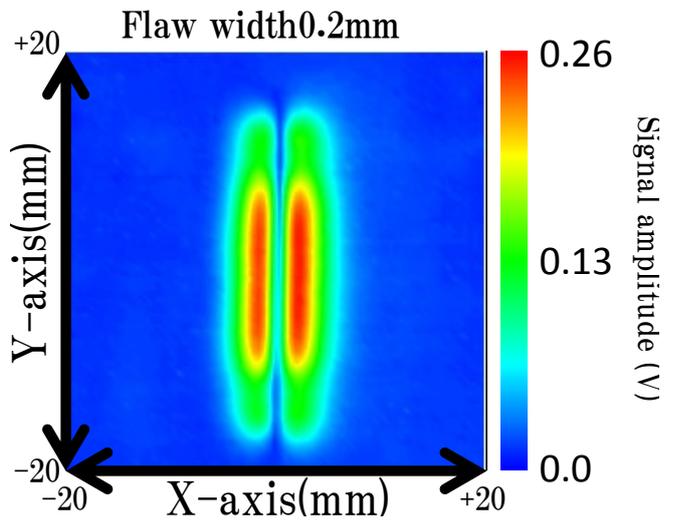
(a)長さ 10mm(Rectangle5)



(a)幅 0.1mm(Rectangle7)



(b)長さ 15mm(Rectangle6)



(b)幅 0.2mm(Rectangle8)

図 3.4 きずの長さが異なる場合の
信号振幅の擬似カラー画像

図 3.5 きずの幅が異なる場合の
信号振幅の擬似カラー画像

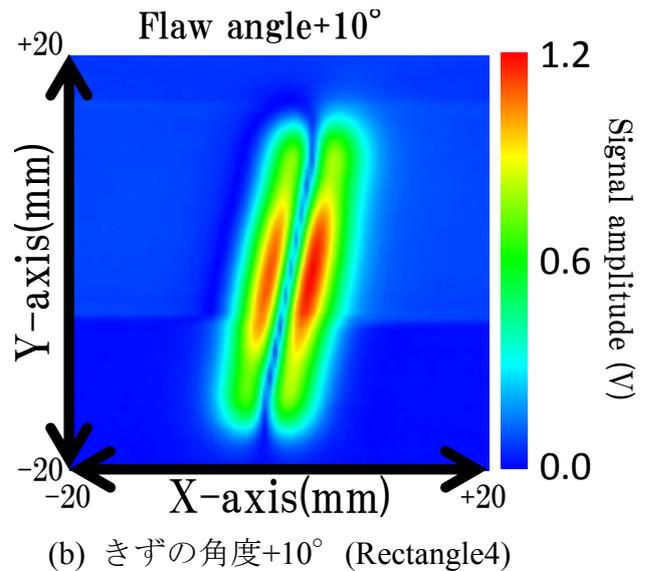
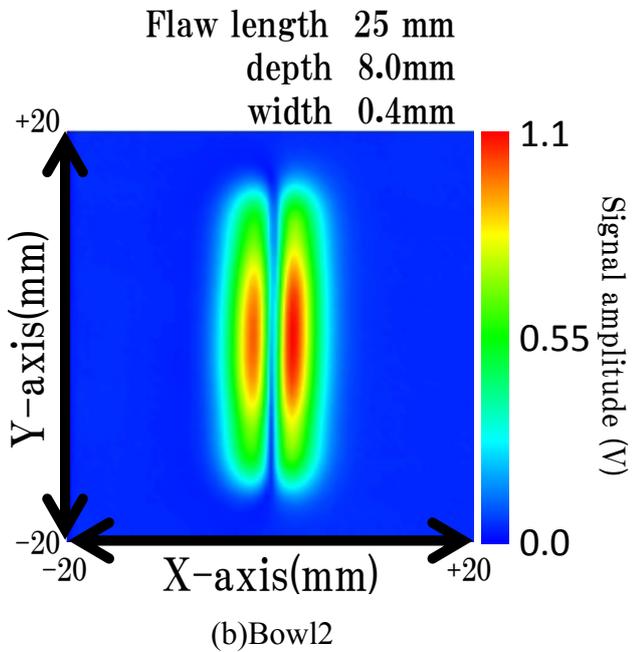
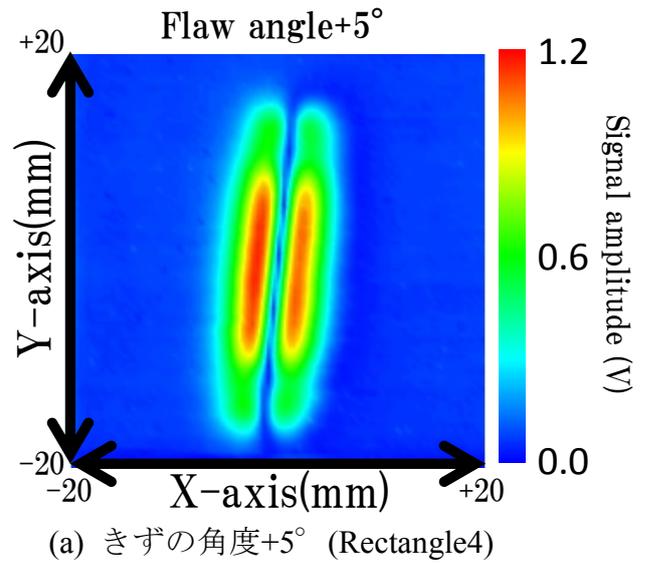
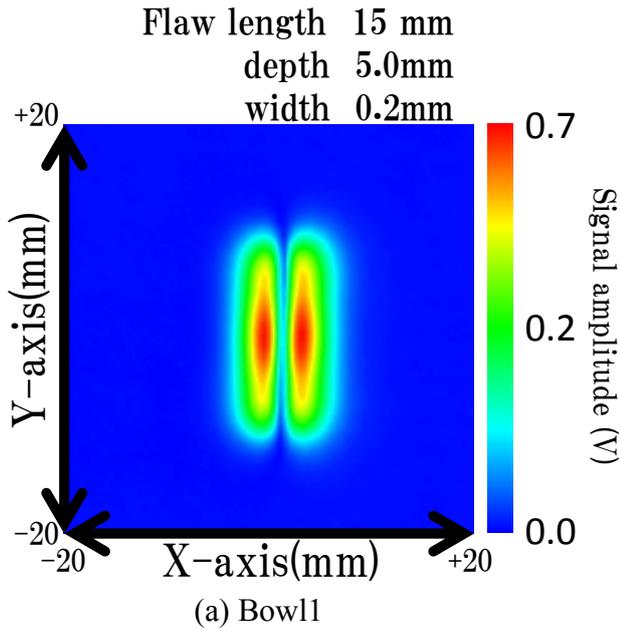


図 3.6 きずの形状がお椀型の
信号振幅の擬似カラー画像

図 3.7 きずの角度が異なる場合の
信号振幅の擬似カラー画像

3.2.4 きず深さの評価方法

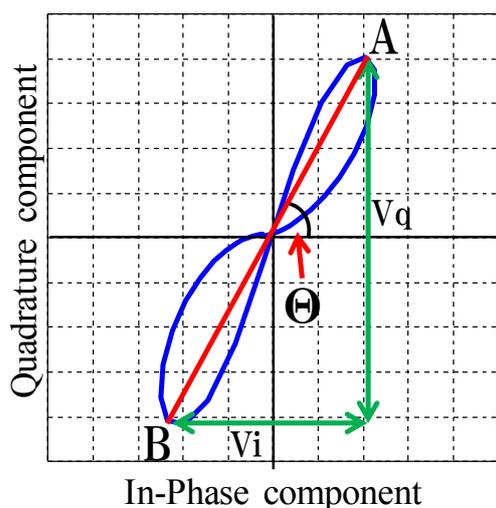
EDM きずを明瞭に検出できたので、2次元探傷によって得られたきず信号から、きず深さの評価を行った。

きずの深さは、得られたきず信号から図 3.8(a)に示すようなきず信号パターンを描き、パターンの傾きから信号位相を求め、それを利用して評価を行った。

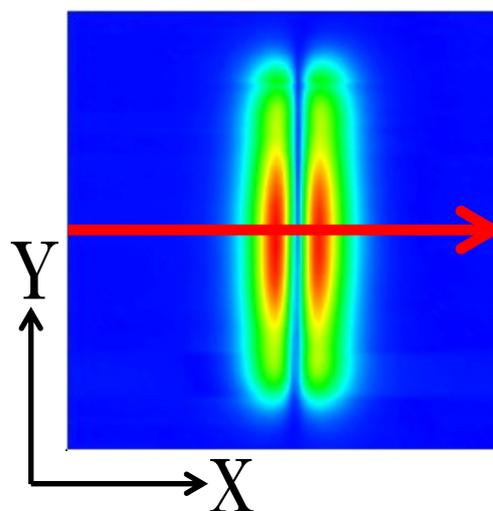
信号パターンを描くには、X 軸方向(図 3.8(b) 中赤矢印の位置)のきず信号を利用する。きず信号には同相成分と進相成分が含まれているので、横軸を同相成分、縦軸を進相成分として、複素平面上で描くことで得られる。

信号位相は、信号パターンの振幅が最大となる 2 点(図 3.8(a)中 A,B)を直線で結び、同相成分の変化の大きさを V_i 、進相成分の変化の大きさを V_q とすると、信号位相 θ は(3.1)より求めることができる。なお、信号位相の求め方は日本非破壊検査協会発行の[非破壊検査技術シリーズ]渦電流探傷試験 I,p85~p86「きず信号の評価」に基づいている²¹⁾。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_q}{V_i} \right) \quad \text{---(3.1)}$$



(a) きず信号パターン



(b)EDM きずの信号振幅の擬似カラー画像 (Rectangle4)

図 3.8 きず深さの評価方法

3.2.4.1 EDM きずの検出特性

きずの深さ、長さ、幅、形状及び角度を種々変えて、信号位相にどのような影響があるか検討を行った。表 3.2 に検討項目と検討に用いたきずの寸法を示す。

表 3.2 検討項目ときずの寸法

検討項目	深さ(mm)	長さ(mm)	幅(mm)	形状	角度(°)
きずの深さが異なる場合	1.0	25.0	0.4	矩形	0.0
	2.0				
	4.0				
	8.0				
きずの長さが異なる場合	4.0	10.0	0.4	矩形	
		15.0			
		25.0			
きずの幅が異なる場合	1.0	25.0	0.1	矩形	
			0.2		
			0.4		
きずの形状が異なる場合	8.0 (最大深さ)	25.0	0.4	矩形	
				お椀	
きずの角度が異なる場合	8.0	25.0	0.4	矩形	5.0
					10.0

図 3.9 に EDM きずの信号パターンを示す。図 3.9(a)にきずの形状が矩形型で長さ(25mm)及び幅(0.4mm)を一定とし、深さを 1,2,4,8mm とした場合の信号パターンを示す。きずが深くなると信号パターンが大きくなり、位相が遅れる。きずが深くなると、パターンの傾きが遅れるのは、渦電流が試験体内部に進むことで位相が遅れるためである。

図 3.9(b)にきずの形状が矩形型できずの深さ(4mm)及び幅(0.4mm)を一定とし、長さを 10,15,25mm とした場合の信号パターンを示す。きずの長さが短くなると信号パターンが小さくなり、位相が進む。きずが短くなると、パターンの傾きが進むのは、きずの長さが短い場合、きずの両端部を回りこむ渦電流が増加するので、表面近傍に集中して流れる。そのため、励磁コイルの外形(9mm)よりも十分に長いきず(25mm)と比べて、パターンの傾きが進むのだと考えられる。

図 3.9(c)にきずの形状が矩形型で、きずの深さ(1mm)及び長さ(25mm)を一定とし、幅を 0.1,0.2,0.4mm とした場合の信号パターンを示す。きずの幅が狭くなると、信号パターンの大きさは小さくなるが、信号パターンの傾きはほとんど変化しない。

図 3.9(d)にきずの最大深さ(8mm)、長さ(25mm)及び幅(0.4mm)を一定とし、きずの形状が矩形型とお椀型の場合の信号パターンを示す。矩形型と比べてお椀型の場合、両端部が浅く、体積が小さいので、信号パターンは小さくなり、位相が僅かに進む。信号パターンが進むのは、きずの深さが一様でなく内部に浸透した渦電流が、浅い両端部側を流れるので、信号パターンが進むのだと考えられる。

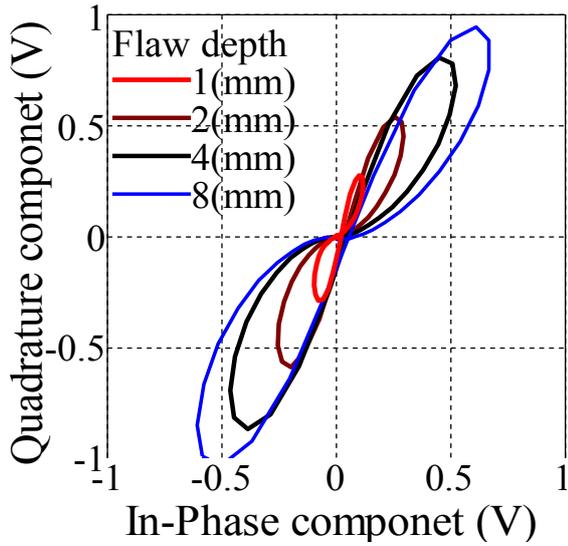
図 3.9(e)にきずの形状が矩形型で、きずの深さ(8mm)、長さ(25mm)及び幅(0.4mm)を一定と

し、きずの角度を $0, 5, 10^\circ$ とした場合の信号パターンを示す。きずの角度が異なる場合、信号パターンの大きさと傾きはほぼ同じになる。

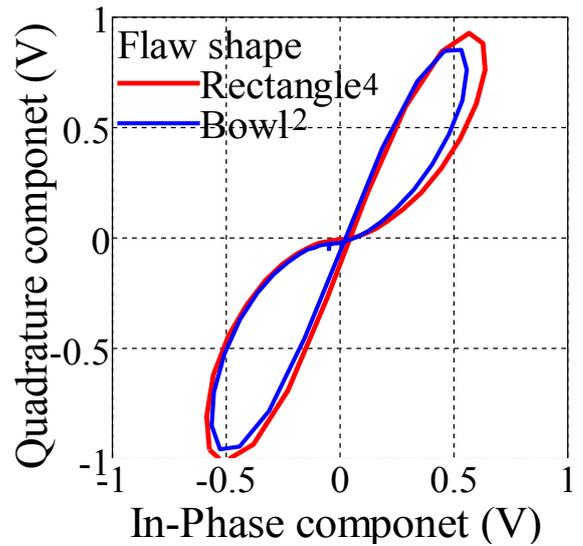
以上のことから、信号パターンの傾きは、きずの深さ、長さそして形状の影響を受け、きずの幅と角度(± 10 以内)の影響は小さい。

信号パターンから(3.1)式より、信号位相を求めた。図 3.10 に最大きず深さに対する信号位相を示す。図中の()内の数字はきずの長さである。きずが深くなると、信号位相が遅れる。Bowl2 は最大きず深さが同じである Rectangle4 と比べて信号位相が僅かに進む。これは、きずの深さが一様でないためだと考えられる。また、きずの長さが 25mm に対して短いきずの場合も、信号位相が進む。これは、励磁コイルの外径ときずの長さが同程度の場合、渦電流がきずの両端部を回り込むように流れるので、渦電流が表層付近に集中するためだと考えられる。

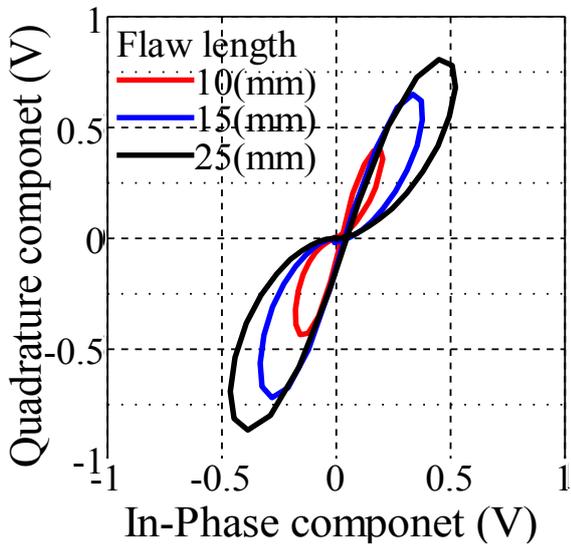
以上のことから、信号位相はきずの深さに大きな影響を受ける。また、きずの深さほどではないがきずの長さや形状の影響を受けることを明らかにした。



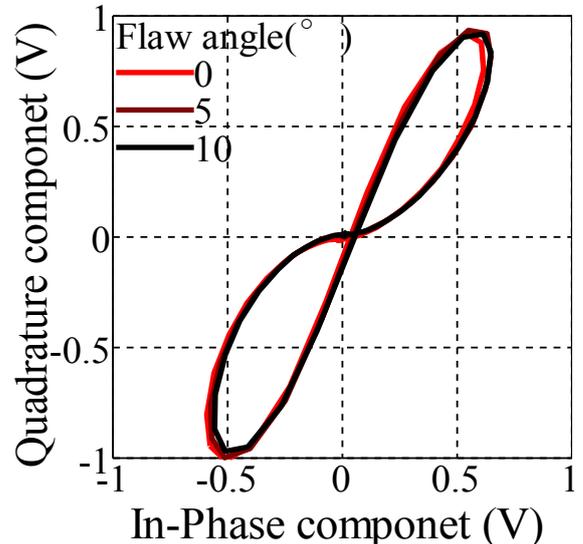
(a) きずの深さが異なる場合



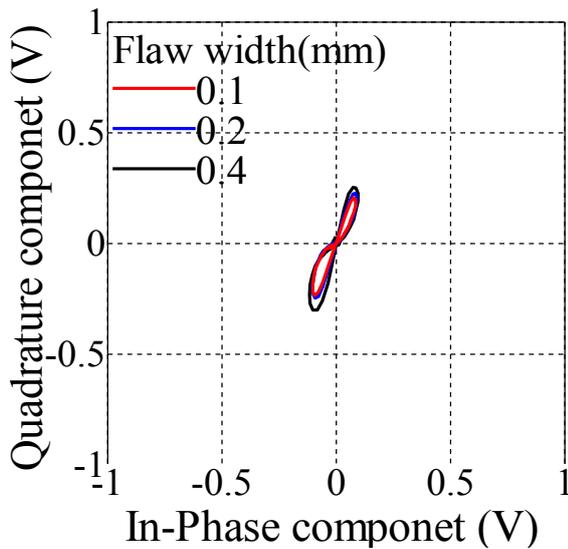
(d) きずの形状が異なる場合



(b) きずの長さが異なる場合



(e) きずの角度が異なる場合



(c) きずの幅が異なる場合

図 3.9 EDM きずの信号パターン

3.2.4.2 きずの深さ評価のための補正方法と補正值の検討

信号位相は、きずの深さ以外にも長さや形状の影響を受けるので、最大きず深さが同じきずであっても得られる信号位相の大きさが異なることがある。したがって、得られた信号位相をそのまま利用した場合、正確なきず深さの評価は困難である。そこで、得られた信号位相からきずの長さや形状の影響を補正することで、より正確なきず深さの評価が行えると考えた。

長さの影響を補正するために、きずの長さが 10,15,25mm (Rectangle3,5,6)より得られた信号位相から、補正曲線を求めた。図 3.11 にきず長さの補正曲線を示す。きずの長さが 25mm (Rectangle3)と比較すると、きずの長さが 10mm (Rectangle5)の場合+5.87°、きずの長さが 15mm(Rectangle6)の場合+2.35°位相が大きいため、それぞれ-5.87°、-2.35°補正を行う。

形状の影響を補正するために、同寸法の Bowl2 と Rectangle4 の信号位相を比較した結果、+0.83°大きいため、-0.83°補正を行う。

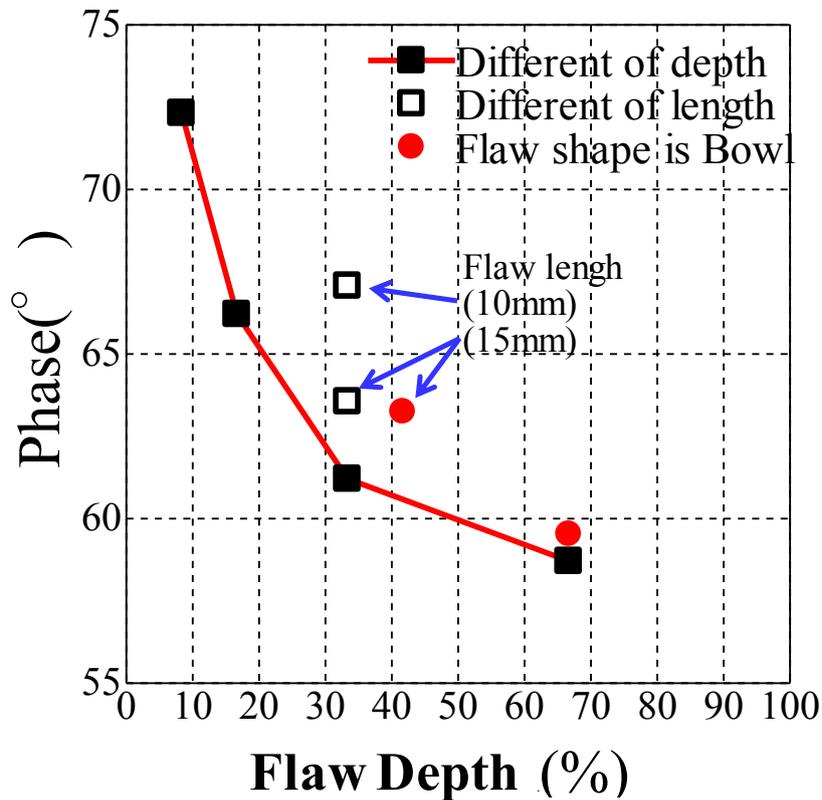


図 3.10 きずの深さに対する信号位相

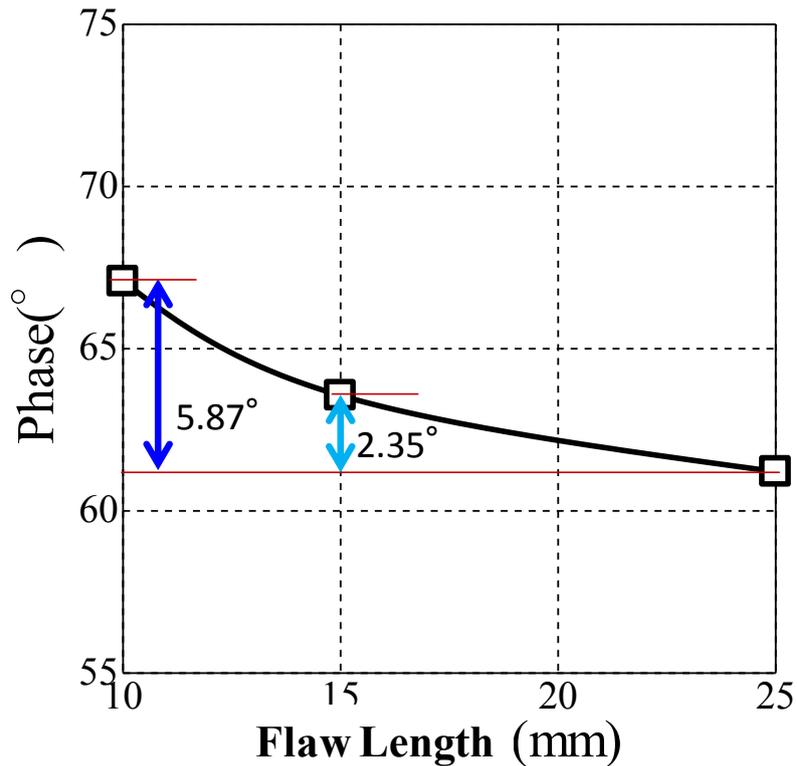
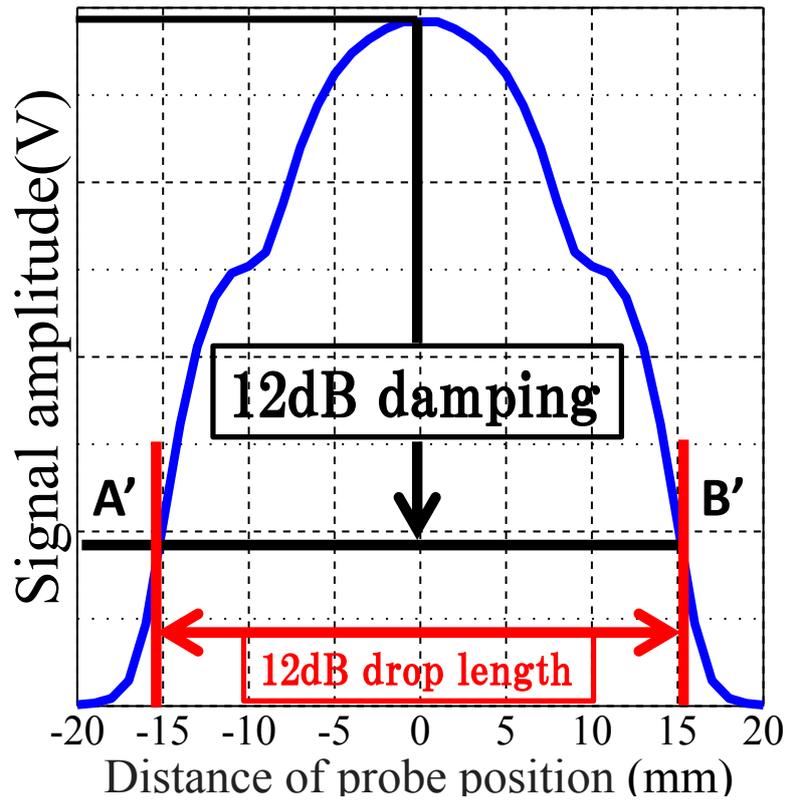


図 3.11 きず長さの補正曲線

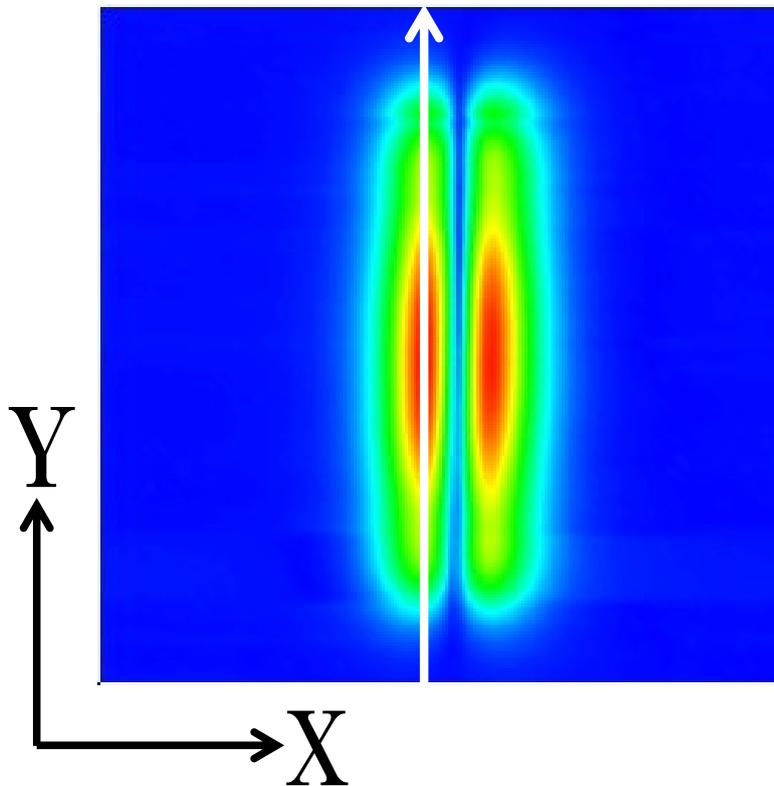
3.2.5 きず長さの評価方法

信号位相は、きず長さの影響を受けるので、最大きず深さが同じきずでも得られる信号位相が異なることがある。したがって、精度高くきずの深さを評価するためには、きず長さの影響を補正する必要がある。しかし、未知のきずの場合には長さが不明確なので、きずの長さを評価する必要がある。

応力腐食割れに対して長さ評価を行う際に、円形コイルを用いた場合のきず長さの評価方法として、図 3.12 (a)のような信号振幅波形の 12dB ドロップ指示長さを利用した従来法がある²²⁾。評価に利用する信号振幅波形を描くには、きずに沿って発生する信号 (図 3.12 (b)の図中白矢印の位置)を利用する。なお、信号振幅はきず信号の同相と進相の複素電圧から振幅値を求めている。次に、評価に利用する 12dB ドロップ指示長さは、信号振幅の大きさが最大値の 12dB ドロップ(信号の大きさが最大値の-12dB(=0.25 倍))となる位置座標 (図中 A' と B'の 2 点)の距離のことである。この距離を利用してきずの長さを評価する。



(a)きず信号振幅波形



(b) EDM きずの信号振幅の擬似カラー画像
(Rectangle4)

図 3.12 きず長さの評価方法

3.2.5.1 EDM きずの信号振幅波形の特性

きずの長さ、深さ、幅、形状及び角度を種々変えて信号振幅波形にどのような影響があるか検討を行った。表 3.3 に検討項目と検討に用いたきずの寸法を示す

表 3.3 検討項目ときずの寸法

検討項目	深さ(mm)	長さ(mm)	幅(mm)	形状	角度(°)
きずの長さが異なる場合	4.0	10.0	0.4	矩形	0.0
		15.0			
		25.0			
きずの深さが異なる場合	1.0	25.0	0.4	矩形	
	2.0				
	4.0				
	8.0				
きずの幅が異なる場合	1.0	25.0	0.1	矩形	
			0.2		
			0.4		
きずの形状が異なる場合	8.0 (最大深さ)	25.0	0.4	矩形	
				お椀	
きずの角度が異なる場合	8.0	25.0	0.4	矩形	5.0
					10.0

図 3.13 に EDM きずの信号振幅波形を示す。図 3.13(a)にきずの形状が矩形型で深さ(4mm)及び幅(0.4mm)を一定とし、きずの長さを 10,15,25mm とした場合の信号振幅波形を示す。きずが長くなると、12dB ドロップ指示長さは長くなる。なお、きずの長さが 10mm の信号振幅波形については、3.2.3 で述べたように、きずの中央部での信号が小さく、きずの両端部で信号が大きくなるため、凹の字のような波形となる。

図 3.13(b)にきずの形状が矩形型で長さ(25mm)及び幅(0.4mm)を一定とし、きずの深さを 1,2,4,8mm とした場合の信号振幅波形を示す。きずが深くなっても 12dB ドロップ指示長さはほとんど変わらない。

図 3.13(c)にきずの形状が矩形型で深さ(1mm)及び長さ(25mm)を一定とし、きずの幅を 0.1,0.2,0.4mm とした場合の信号振幅波形を示す。きずの幅が狭くなっても 12dB ドロップ指示長さはほとんど変わらない。

図 3.13(d)にきずの最大深さ(8mm)、長さ(25mm)及び幅(0.4mm)を一定とし、きずの形状を矩形型とお椀型の信号振幅波形を示す。きず形状がお椀型の場合、12dB ドロップ指示長さは、矩形型と比べて僅かに短くなる。これは、きずの深さが一様な矩形型と異なり、お椀型の場合は両端部が浅いことが原因だと考えられる。

図 3.13(e)にきずの形状が矩形型できずの深さ(8mm)、長さ(25mm)及び幅(0.4mm)を一定とし、きずの角度を 0,5,10° とした場合の信号振幅波形を示す。きずの角度が大きくなっても ±10° 以内であれば 12dB ドロップ指示長さはほとんど変わらない。

以上のことから、信号振幅波形の 12dB ドロップ指示長さはきずの長さに対応する。また、きずの深さ、幅そして角度の影響をほとんど受けない。きずの形状がお椀型の場合、矩形型と比べて僅かに短くなるが、きずの長さが異なる場合に比べて影響が小さいことが明らかになった。

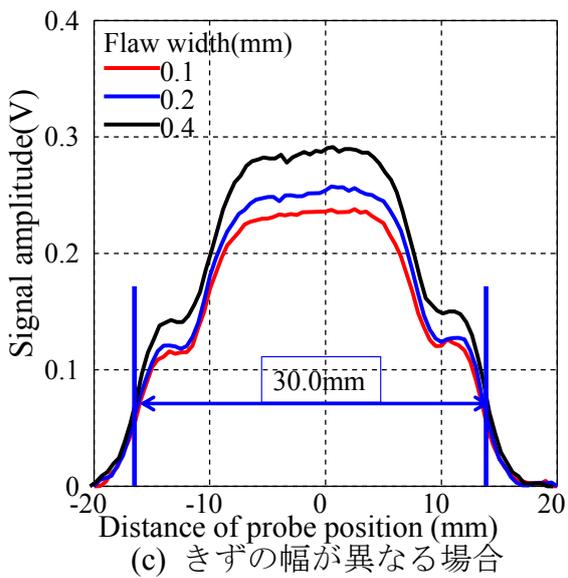
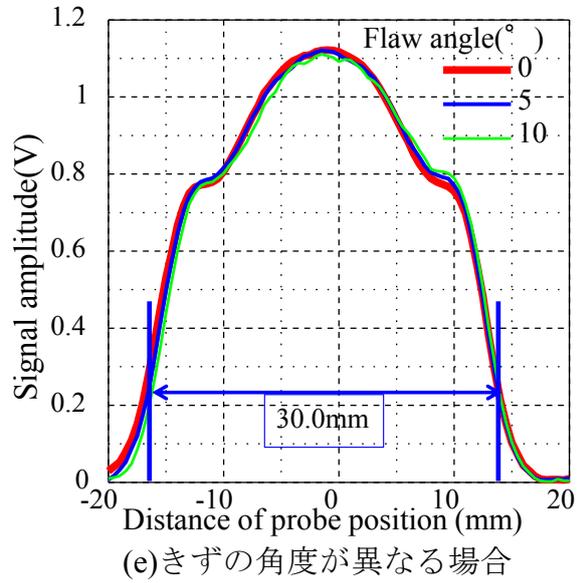
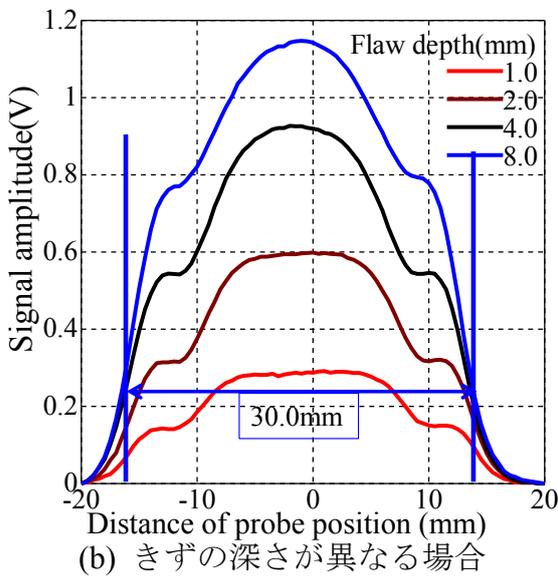
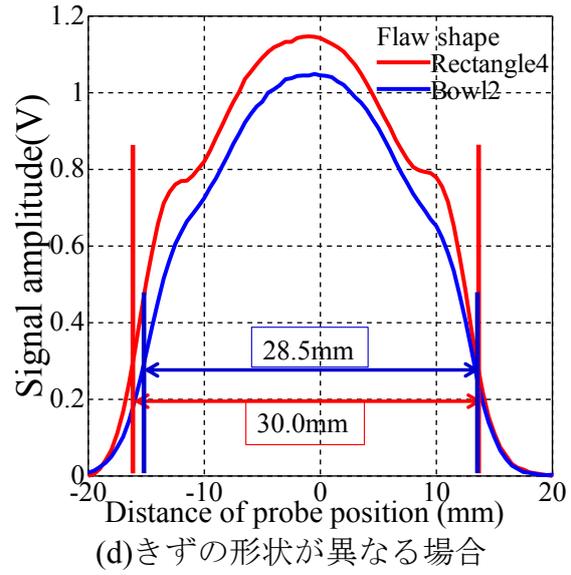
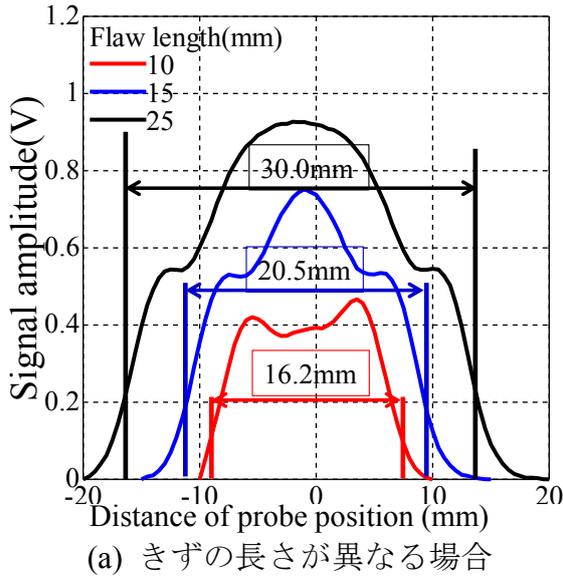


図 3.13 EDM きずの信号振幅波形

3.2.5.2 きずの長さ評価のための補正方法と補正值の検討

12dB ドロップ指示長さによって評価したきずの長さは、実際のきず長さよりも+20%程度長く評価されるので、評価精度が低いという結果が得られた。実際のきずの長さよりも渦電流は磁気的な性質や励磁コイルの外径によって広がりを持つので、長く評価されるのだと考えられる。そこで、より精度高くきず長さを評価する方法として、新たに 12dB 法を提案してきず長さ評価を行った。12dB 法は、12dB ドロップ指示長さから、渦電流の広がり起因する長さを補正して評価する方法である。

補正する長さを求めるために 10 種の EDM きず全ての 12dB ドロップ指示長さを求めた結果、実際のきず長さよりも平均して+5.0mm 程度長いことが明らかになった。したがって、12dB ドロップ指示長さから-5.0mm 補正することできずの長さを評価できると考えた。なお、試験体の材質、試験周波数によって補正する長さは異なる。

3.2.5.3 12dB 法による EDM きずの長さ評価

12dB 法によって評価した結果を図 3.14 に示す。横軸に実際のきず長さ、縦軸に評価したきず長さを示す。評価したきずの長さは、励磁コイルの外径に対してきずの長さが 10mm の場合+12%の範囲で評価可能であり、15mm 以上であれば±7%の範囲で評価可能である。きずの長さが励磁コイルの外径(9mm)に近い 10mm の場合に評価精度が低くなるが、励磁コイルの外径を短くすることで、評価精度を向上させることが可能である。

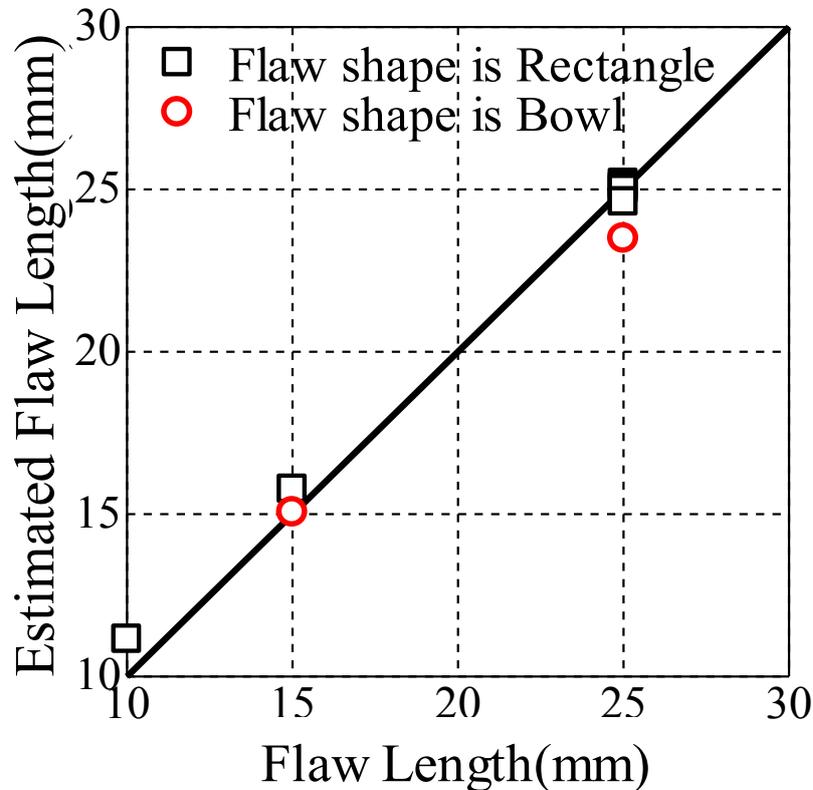


図 3.14 EDM きずの長さに対する
評価したきず長さ

3.2.6 EDM きずの深さ評価

12dB 法によって評価したきず長さを利用して信号位相を補正して、EDM きずの深さ評価を行った。図 3.15 に補正後のきず深さに対する信号位相を示す。EDM きずの場合、きずの長さが 15mm 以上の場合、検定曲線に対して±0.5%の範囲で評価可能であり、きずの長さが 10mm の場合、検定曲線に対して+2.5%の範囲で評価可能である。なお、きずの長さを補正する際に利用した補正曲線(図 3.11)は深さごとに僅かに異なるが、今回の手法によって、きず深さを精度高く評価することが可能である。

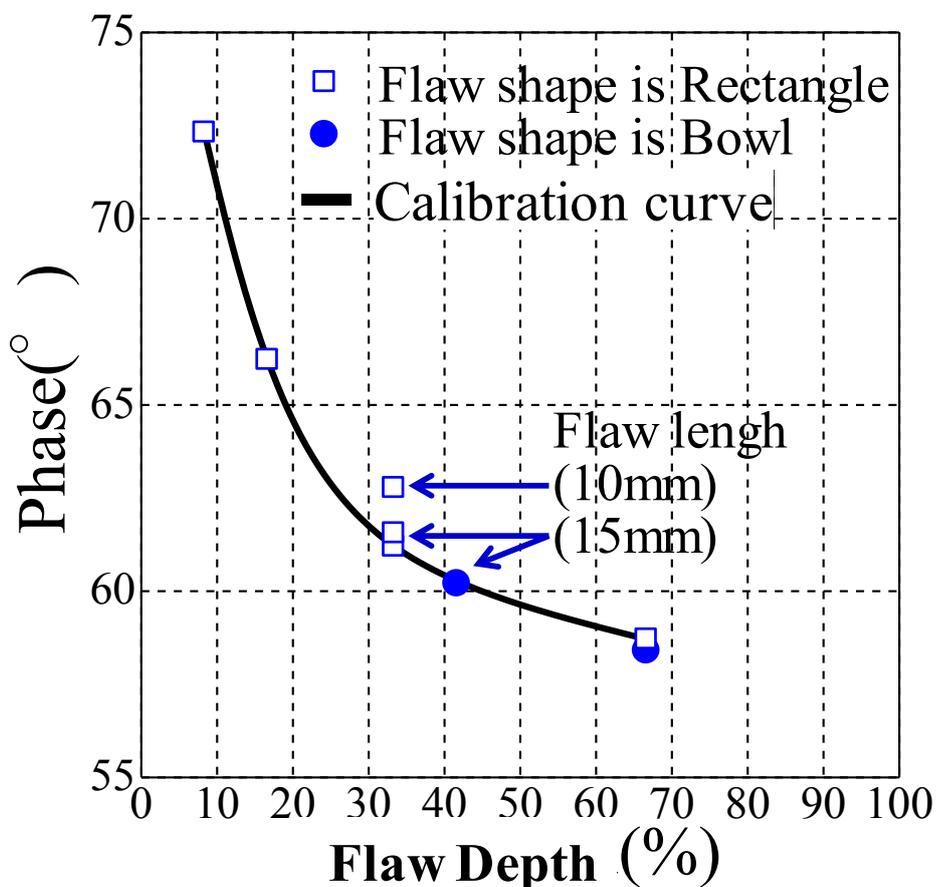


図 3.15 評価したきず長さを利用して補正した
きず深さに対する信号位相

3.3 熱疲労割れに対するきず検出及び評価

3.3.1 TFC 試験体

試験体の材質にはオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 を用いた。図 3.16、3.17 にそれぞれ TFC の表面図と断面図を示す。なお、TFC3 の断面図については破壊試験の都合上、きず全体の右側 12.7mm のみの画像である。表面性状については、TFC1 は蛇行しながら直線的に割れている。TFC2 は蛇行しながら斜めに割れている。TFC3 は弓なりに割れている。TFC1 の場合は右片側が深い形状をしている。TFC2 は中心部が一番深い形状をしている。TFC3 の場合、右側 12.7mm のみではあるが、きずの全長が 20.1mm なので、左片側が深い形状をしていると推定できる。今回用いた TFC は、きずの形状はほぼ半楕円形であり著しい凹凸は存在しない。また、3 つの TFC は断面図と表面性状からは断面接触は見られない。なお、図 3.17 の TFC の断面図は、TFC の長さ方向に切断した図であるが、切断した角度や座標についての詳細は不明確である。

表 3.4 に TFC を施した試験体の寸法を示す。また、表 3.5 に TFC の寸法（きずの深さは最大値）を示す。

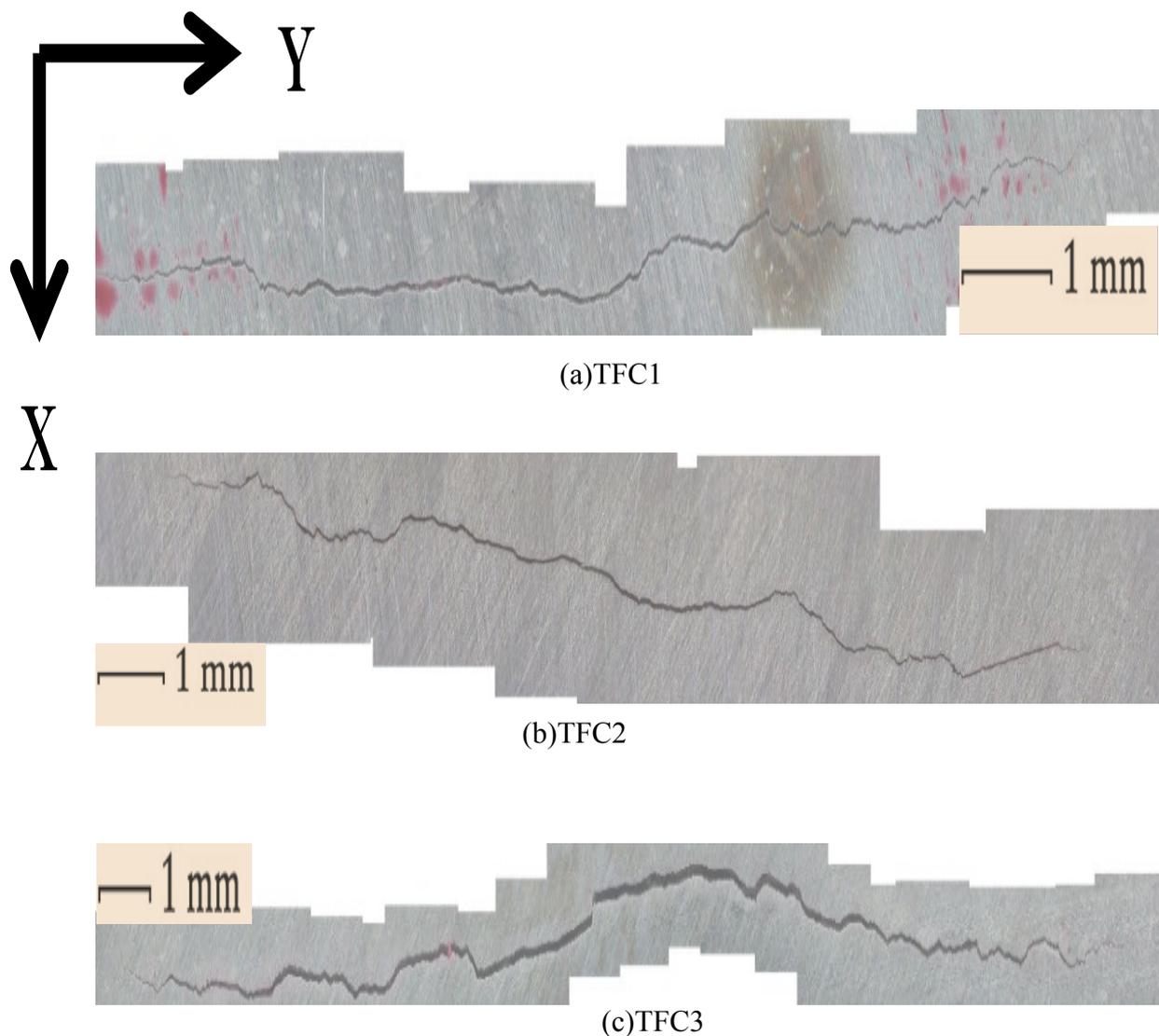


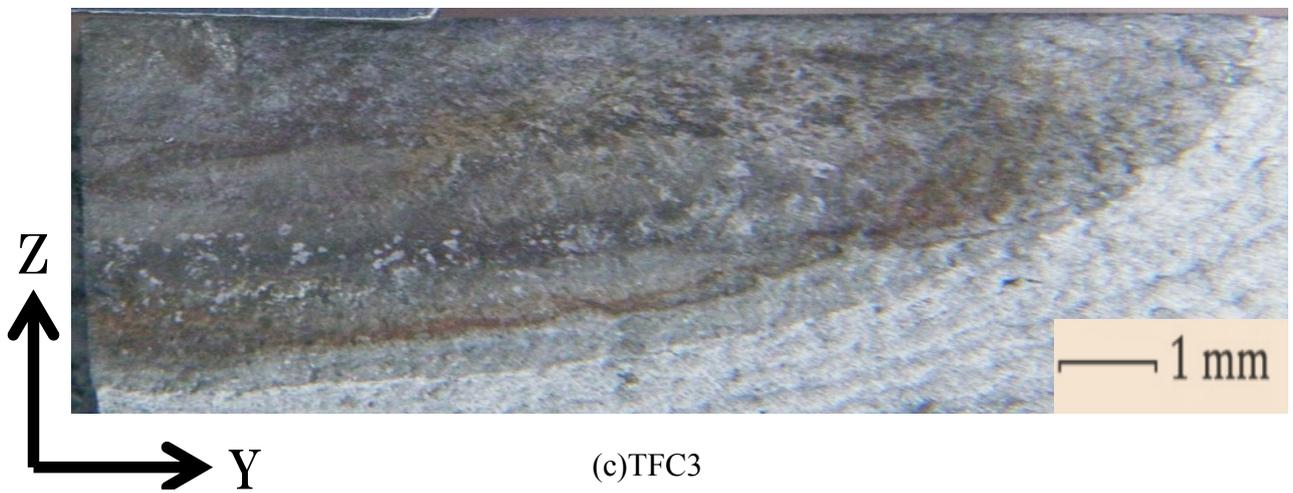
図 3.16 TFC の表面図



(a)TFC1



(b)TFC2



(c)TFC3

図 3.17 TFC の断面図

表 3.4 TFC 試験体の寸法

Material number	Size(mm)	Flaw number
TFC Material1	250×150×25	TFC2
TFC Material2	250×150×25	TFC1
TFC Material3	250×150×25	TFC3

表 3.5 TFC の寸法

Flaw number	Unit(mm)	
	length	depth
TFC1	11.7	4.10
TFC2	14.4	4.10
TFC3	20.1	6.50

3.3.2 TFC の信号振幅の擬似カラー画像

図 3.18 に 2 次元探傷によって得られた、TFC の信号振幅の擬似カラー画像を示す。きずの左右両側できずに沿うように信号が発生し、雑音小さく明瞭にきず検出が可能である。

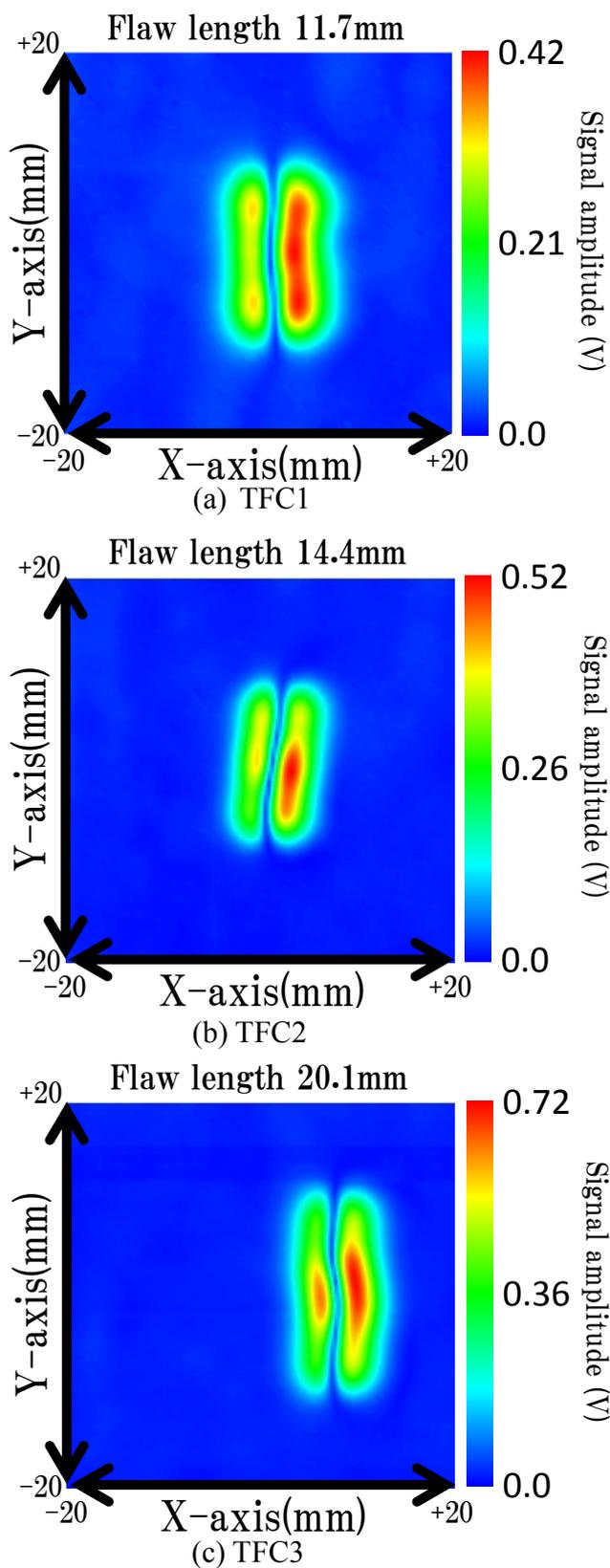


図 3.18 TFC の信号振幅の擬似カラー画像

3.3.3 TFC の深さ評価

図 3.19 に TFC の信号パターンを示す。TFC の場合も EDM きず同様、きずが深くなると信号パターンは大きくなり、パターンの傾きが遅れることを確認している。

TFC の深さを評価するに際して、EDM きずで得られた知見を基に、12dB 法によって TFC の長さ評価を行った。なお、TFC の場合、図 3.18 に示したように、きずの左右で発生する信号の大きさが異なるので、左右のきず信号の内、信号振幅の最大値が大きい方の信号を利用して波形を描き評価を行った。図 3.20 に TFC の信号振幅波形と 12dB ドロップ指示長さを示す。TFC の場合も EDM きず同様、きずが長くなると 12dB ドロップ指示長さが長くなる。図 3.21 に 12dB 法によって評価した TFC の長さに対する評価したきず長さを示す。なお、図中の番号は TFC の番号である。TFC の長さに対して評価したきず長さは、励磁コイルの外径 9mm に対してきずの長さが 11.7mm の場合+20%で評価可能であり、きずの長さが 14.4mm 以上であれば+7%の範囲で評価可能である。11.7mm の場合に評価精度が低いのは、きずの長さが 10mm の EDM きずと同様の理由だと考えられる。

評価したきず長さを利用して補正を行い、TFC の深さ評価を行った。信号パターンより得られた信号位相から、図 3.11 の補正曲線を用いて長さの影響を補正した。形状の影響の補正については、今回用いた TFC は全て EDM きずのお椀型に近い半楕円形なので、 -0.83° 補正を行った。図 3.22 に TFC の最大きず深さに対する信号位相を示す。なお、図中の番号は TFC の番号である。図中の黒線は 3.2.6(図 3.15)にて EDM より求めた検定曲線である。また、青いプロットは補正前の信号位相であり、赤いプロットは補正後の信号位相である。TFC の場合、検定曲線に対して $\pm 2.5\%$ の範囲で評価可能である。

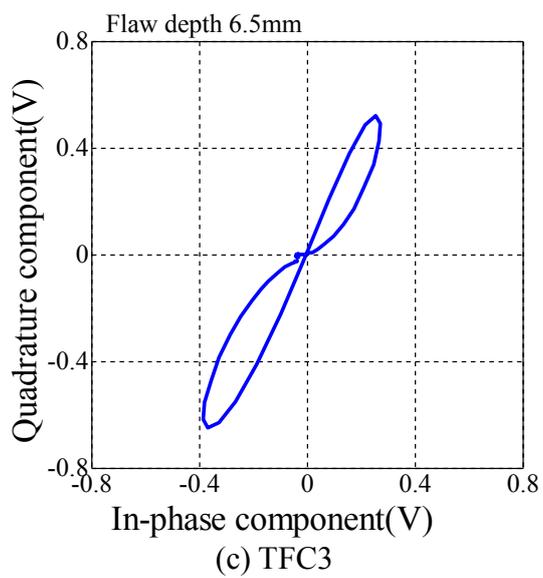
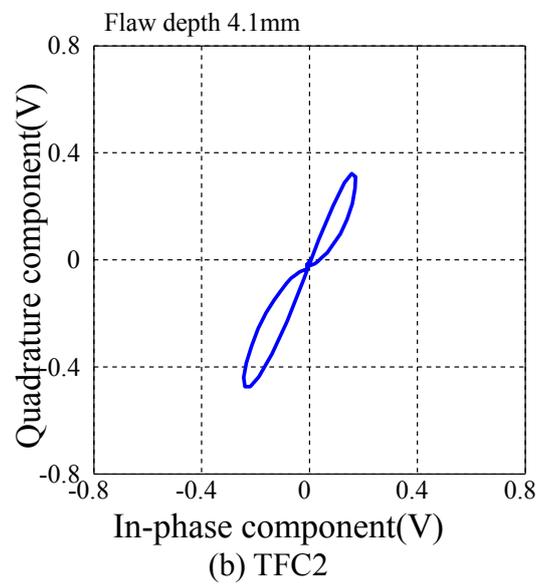
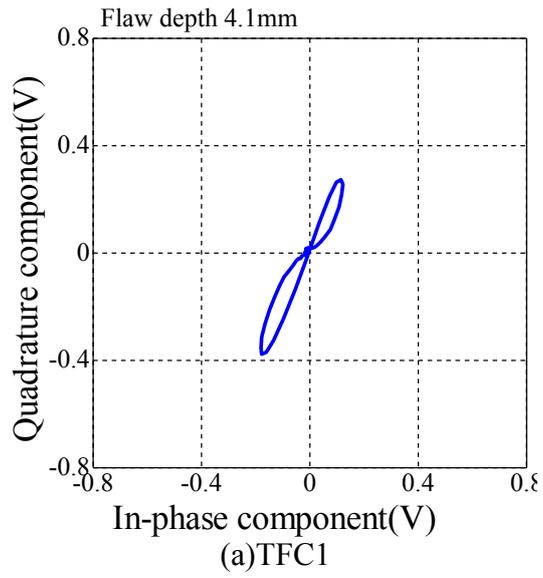
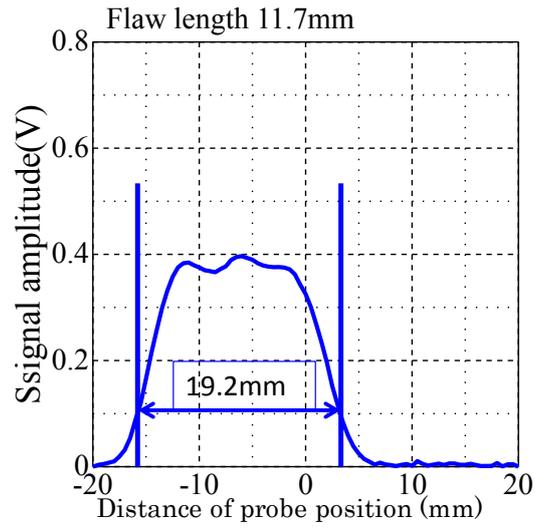
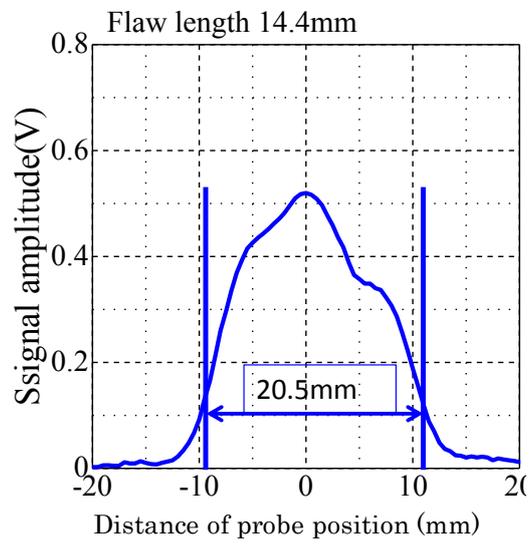


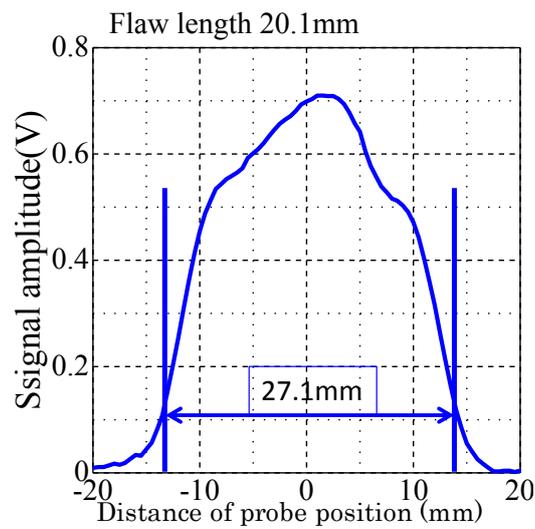
図 3.19 TFC の信号パターン



(a)TFC1



(b) TFC2



(c) TFC3

図 3.20 TFC の信号振幅波形

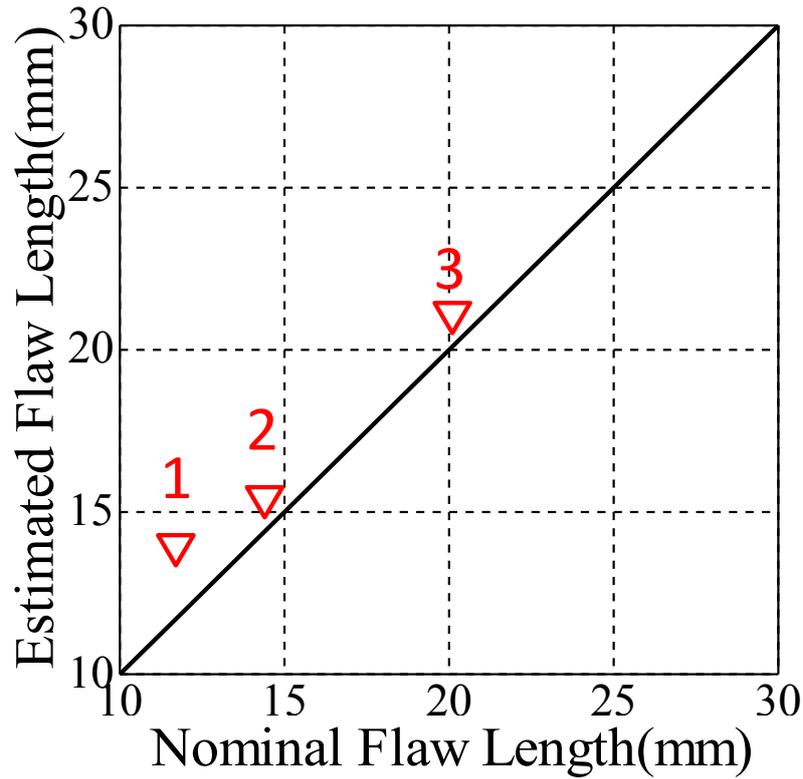


図 3.21 TFC の長さに対する
評価したきずの長さ

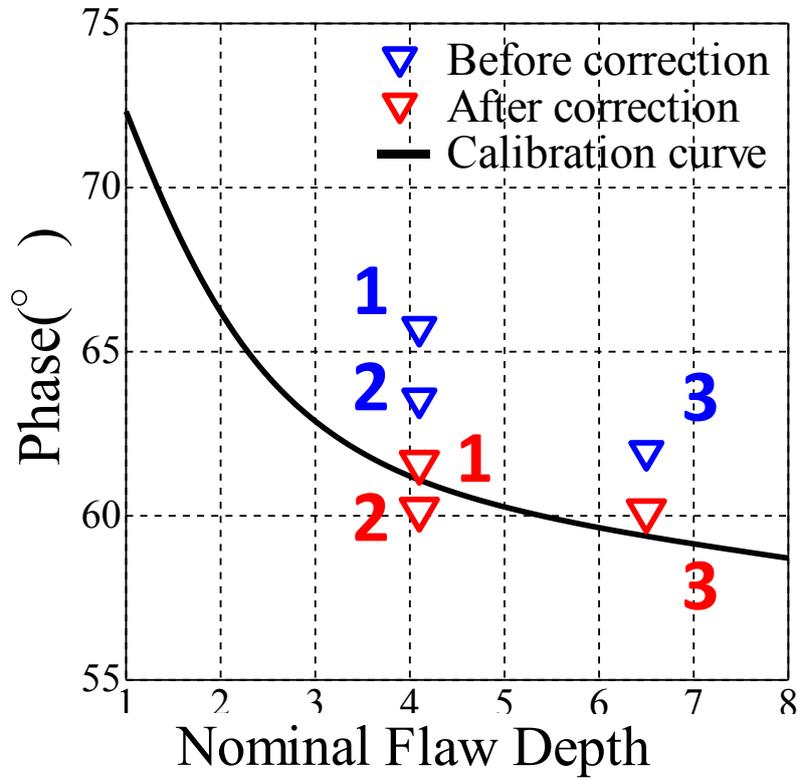


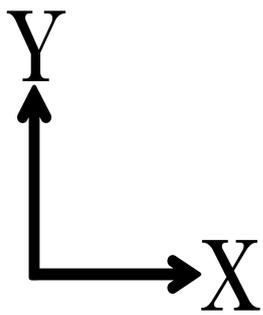
図 3.22 TFC の最大きず深さに対する信号位相

3.4 応力腐食割れに対するきず検出及び評価

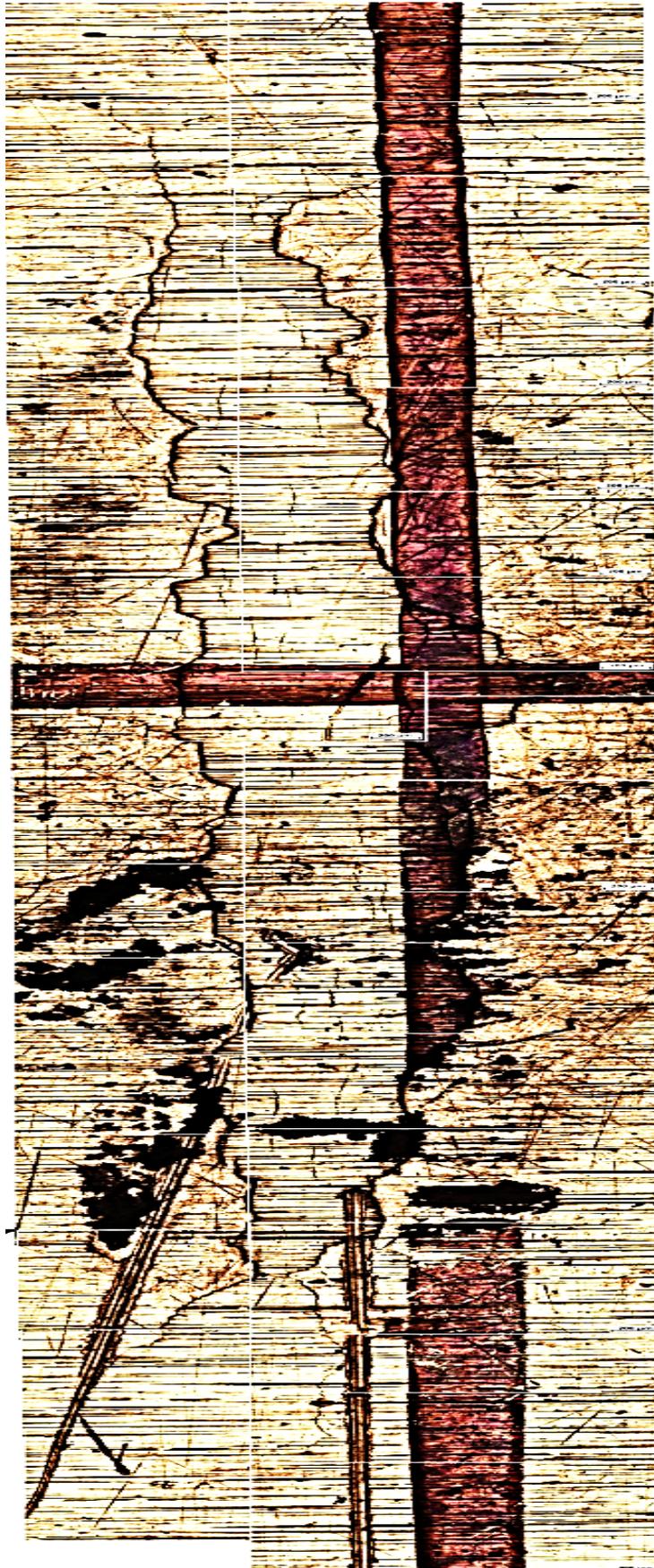
3.4.1 SCC 試験体

試験体の材質にはオーステナイト系ステンレス鋼の SUS304 を用いた。図 3.23 に SCC の表面図を示す。図 3.24 に SCC の断面図を示す。断面図の画像は、きずの長さ方向(Y 軸方向)に対して、直交する方向(X 軸方向)に切断することで得られた画像であり、図タイトル中の Y=±数字 mm は切断した Y 座標である。画像から、SCC1 と 4 はきずが 1 つだが、SCC2 は最大きず深さが同程度のきずが 2 つ、SCC3 は深さが異なるきずが 5 つ隣接して存在していることが明らかになった。また、今回用いた SCC は深さ 2mm 以降で断面接触が見られる。なお、示した断面図は破壊試験によって得られた画像のうち、きずの深さが最も深い位置(Y 座標)の画像である。図 3.25 に SCC のきず形状を示す。なお、きず形状は破壊試験によって得られた各位置での断面図から深さを求めて推定した。

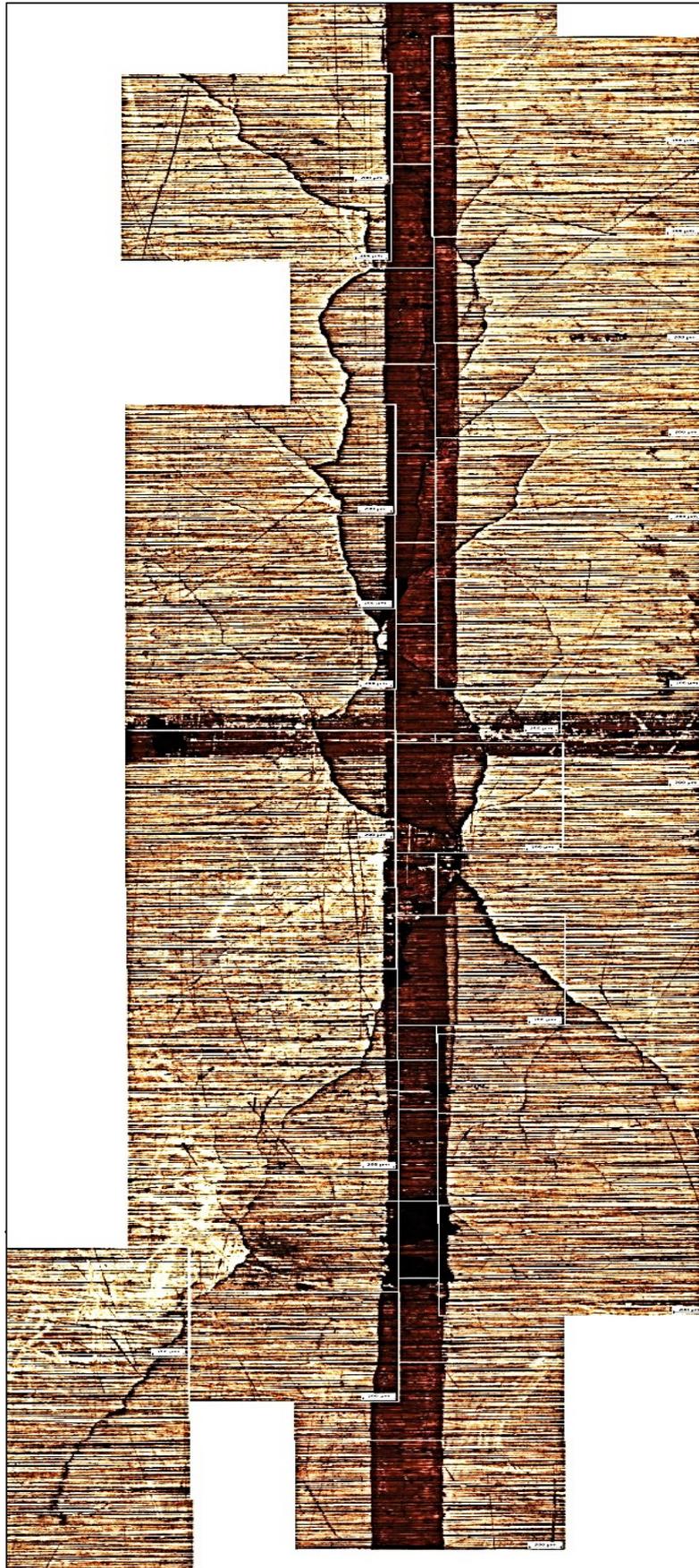
表 3.6 に SCC を施した試験体の寸法を示す。試験体に施した人工応力腐食割れは、放電加工、疲労亀裂またはノッチによって予き裂を加えたうえで、テトラチオンサ酸、ポリチオン酸または塩化マグネシウムといった腐食液に浸すことで作製した。表 3.7 に SCC の寸法(深さは最大値)を示す。長さ、深さ及び形状が異なる SCC を 4 種類用意した。SCC の深さは破壊試験によって得られたきずの断面図から推定した。



(a) SCC1



(b) SCC2

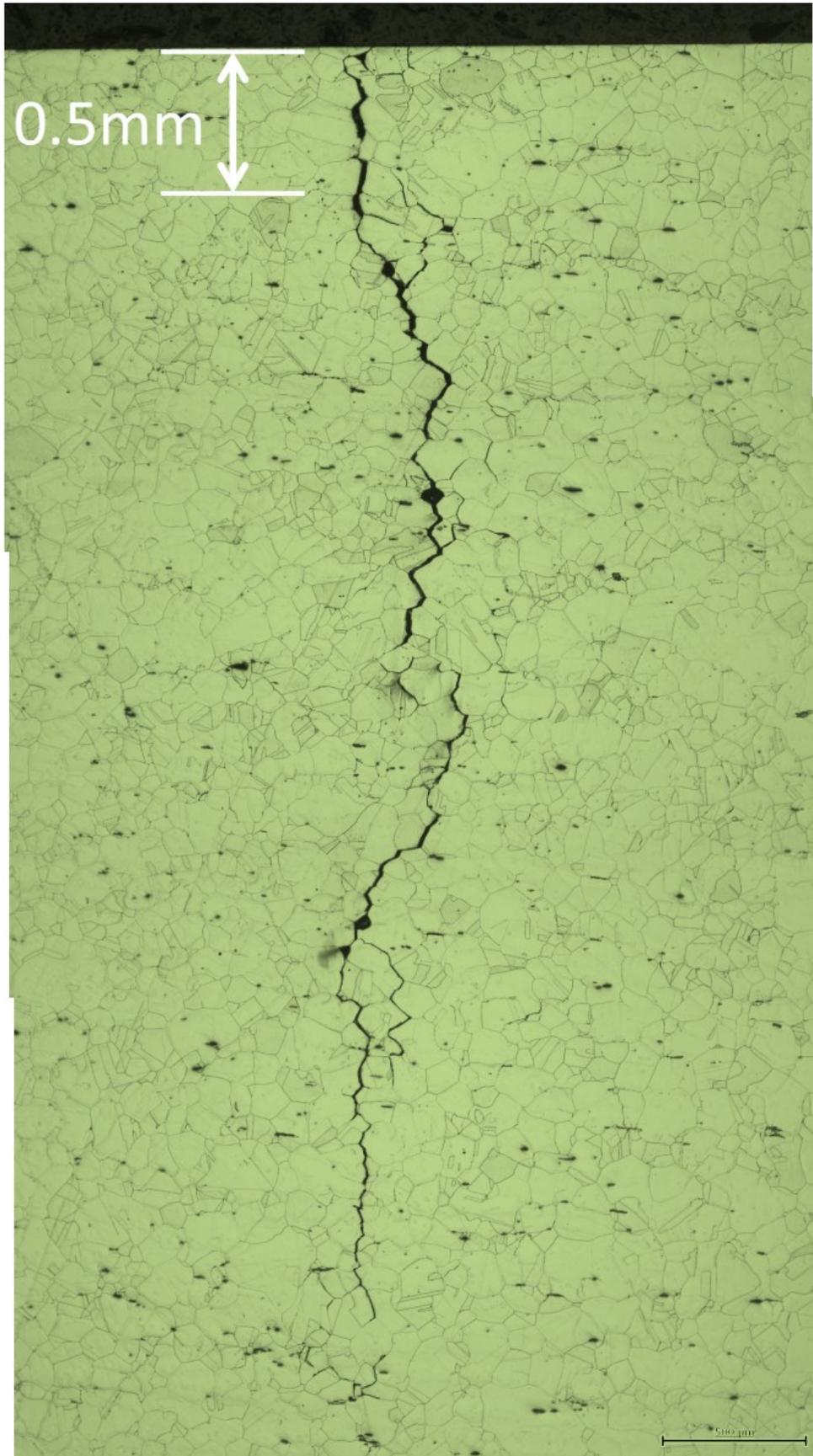


(c) SCC3

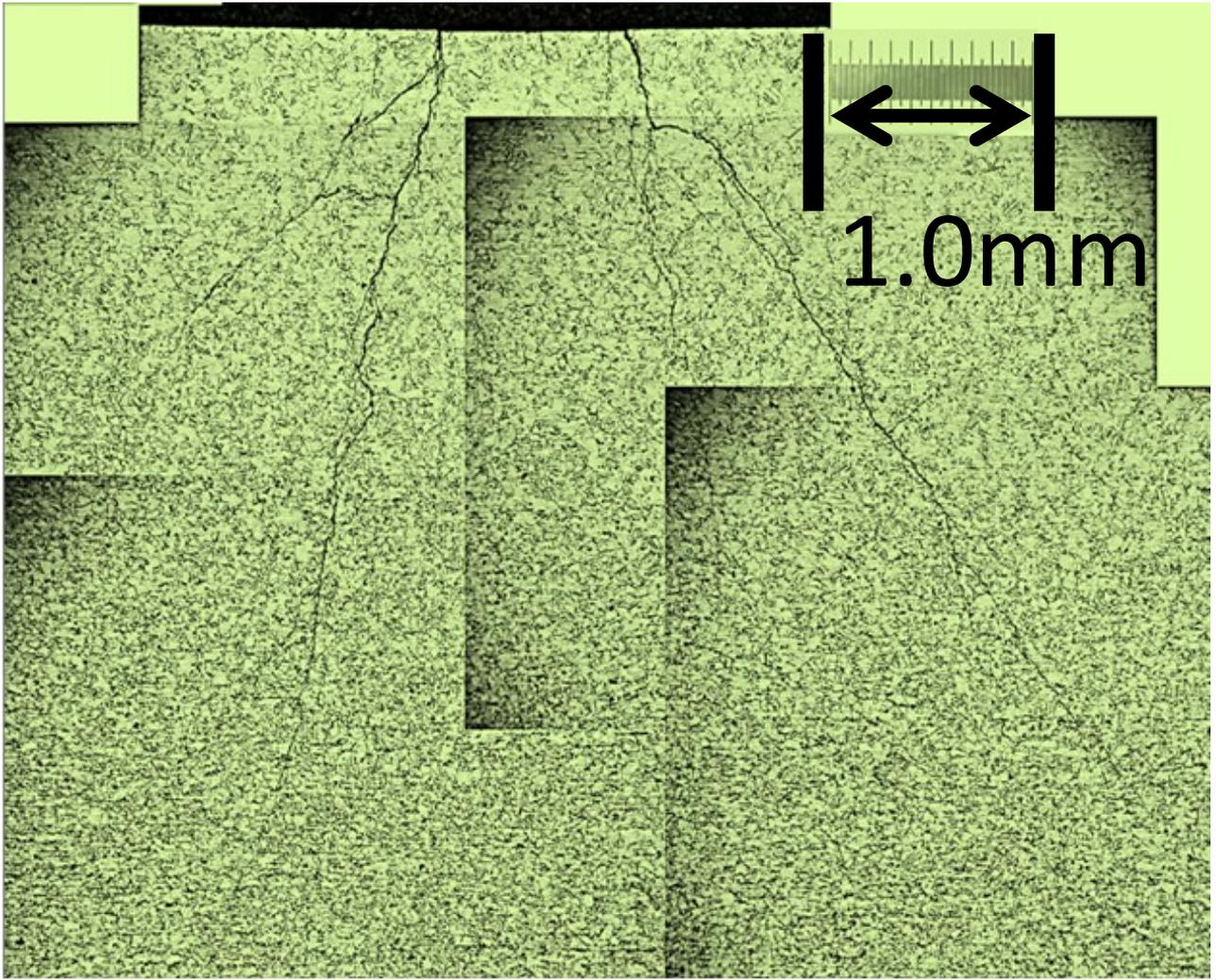


(d) SCC4

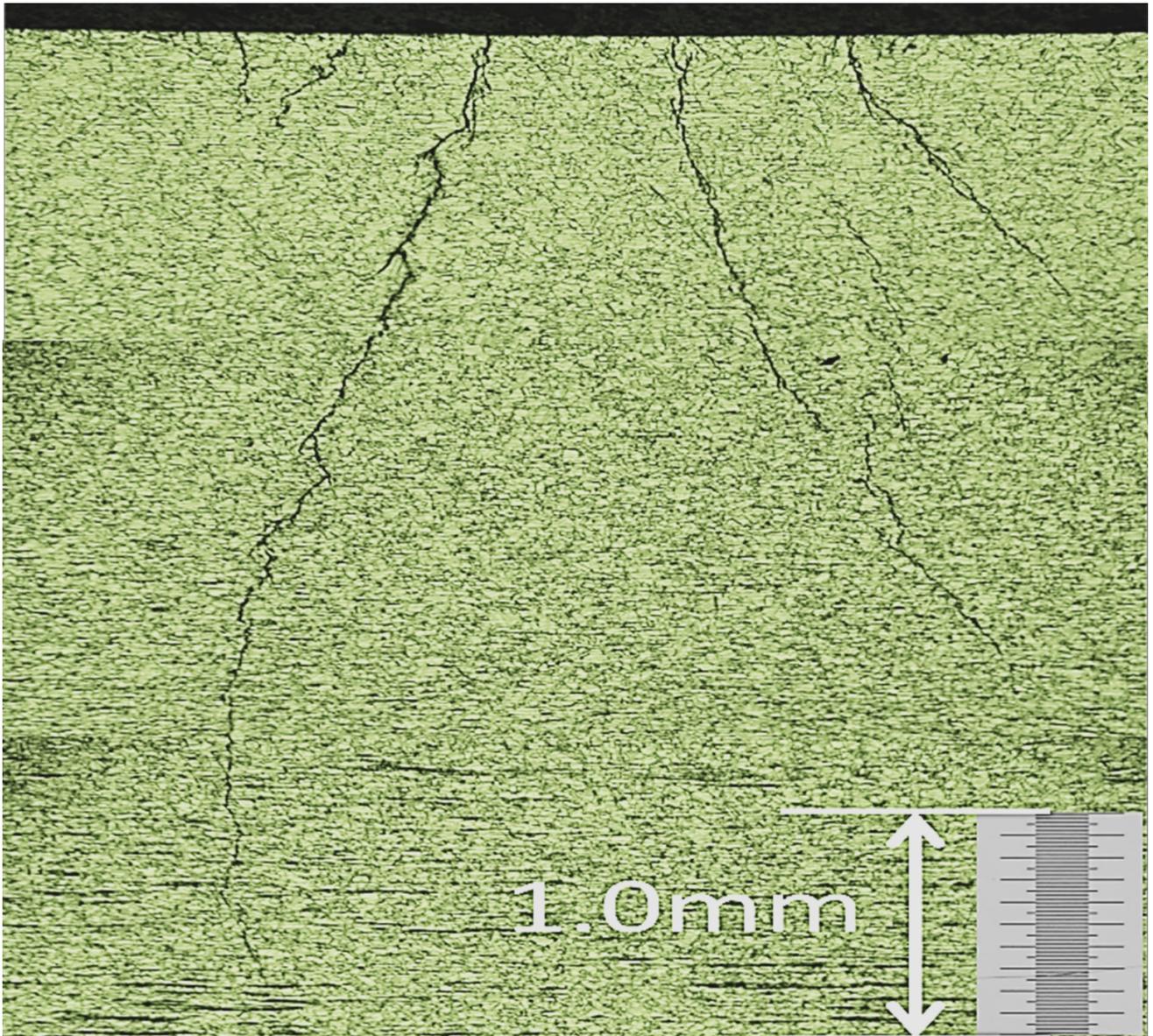
図 3.23 SCC の表面図



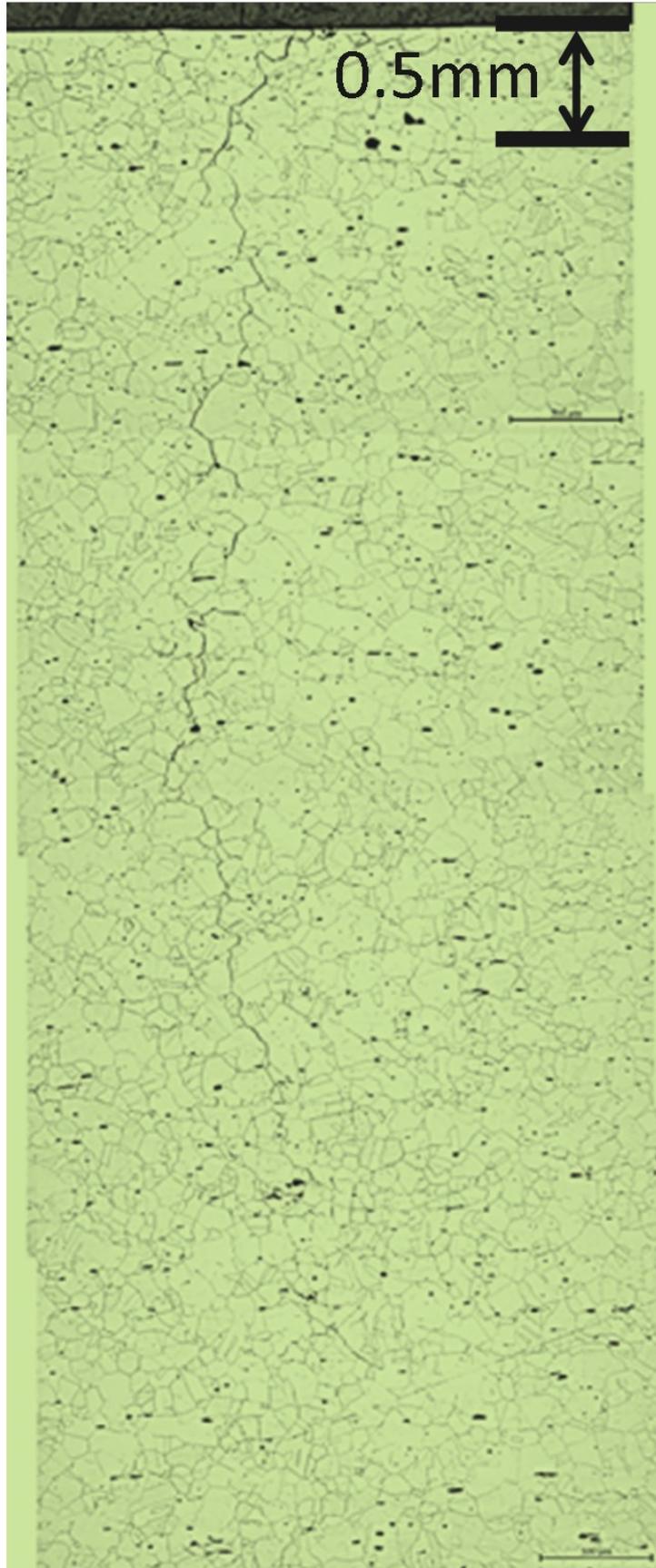
(a) SCC1(Y=0mm)



(b) SCC2(Y=+2mm)

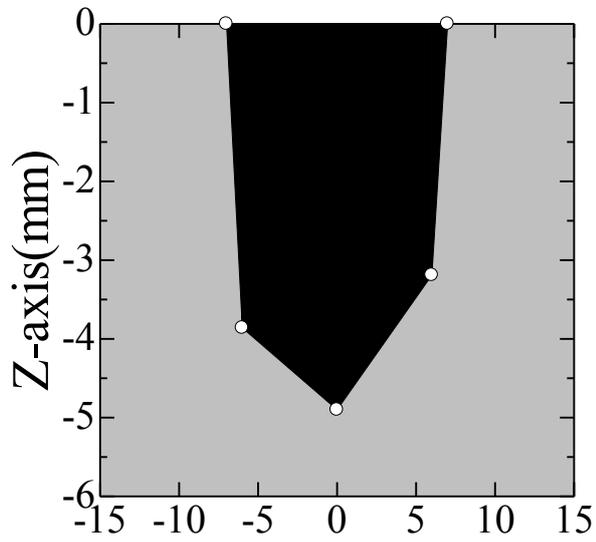


(c) SCC3(Y=0mm)



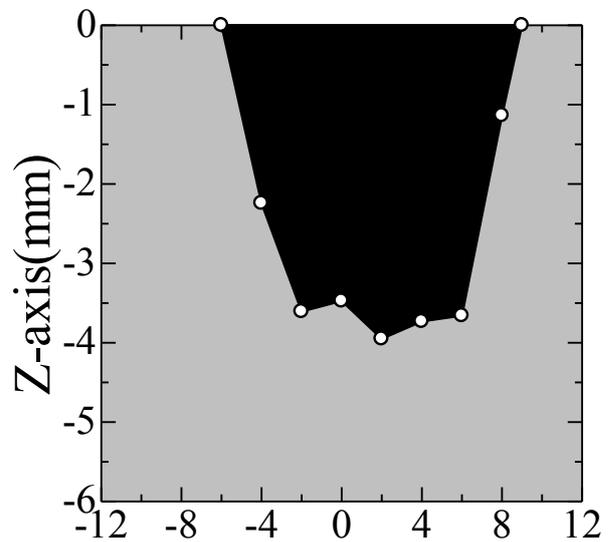
(d) SCC4(Y=0mm)

図 3.24 SCC の断面図



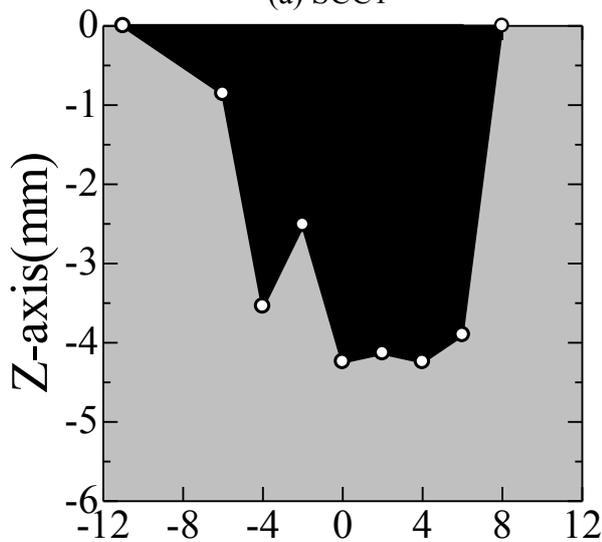
Cross-section position(mm)

(a) SCC1



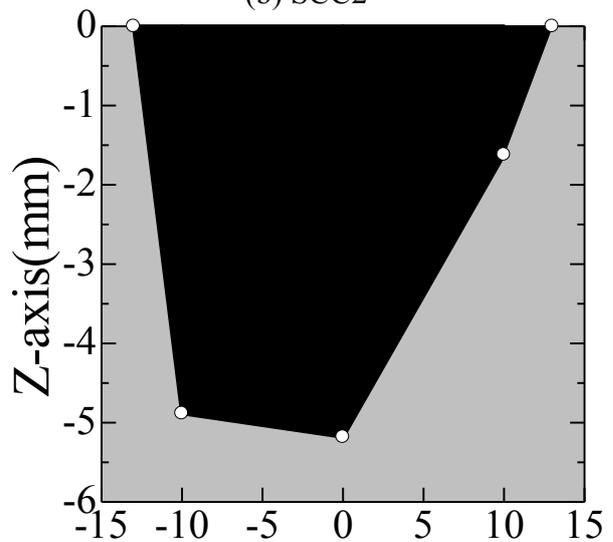
Cross-section position(mm)

(b) SCC2



Cross-section position(mm)

(c) SCC3



Cross-section position(mm)

(d) SCC4

図 3.25 破壊試験の結果から推定した
SCC の形状

表 3.6 SCC 試験体の寸法

Material number	Size(mm)	Flaw number
SCC Material1	160×100×16	SCC4
SCC Material2	160×100×16	SCC1
SCC Material3	218×100×10	SCC3
SCC Material4	218×99×10	SCC2

表 3.7 SCC の寸法
Unit(mm)

Flaw number	length	depth
SCC1	14.0	4.95
SCC2	15.0	3.76
SCC3	19.0	4.28
SCC4	26.0	6.03

3.4.2 SCC の信号振幅の擬似カラー画像

図 3.26 に 2 次元探傷によって得られた、SCC の信号振幅の擬似カラー画像を示す。きずの長さ方向に対して左右両側できずに沿うように信号が発生し、きず以外の部分での信号が小さく明瞭にきず検出が可能である。なお、図 3.26(b)、(c)については、きずの右側にも信号が見られるが、この信号は雑音ではなく、SCC2,3 を導入した際に予期せず発生した SCC の信号である。また、図 3.26(a)、(d)の左側の信号は探傷対象ではない SCC の信号である。

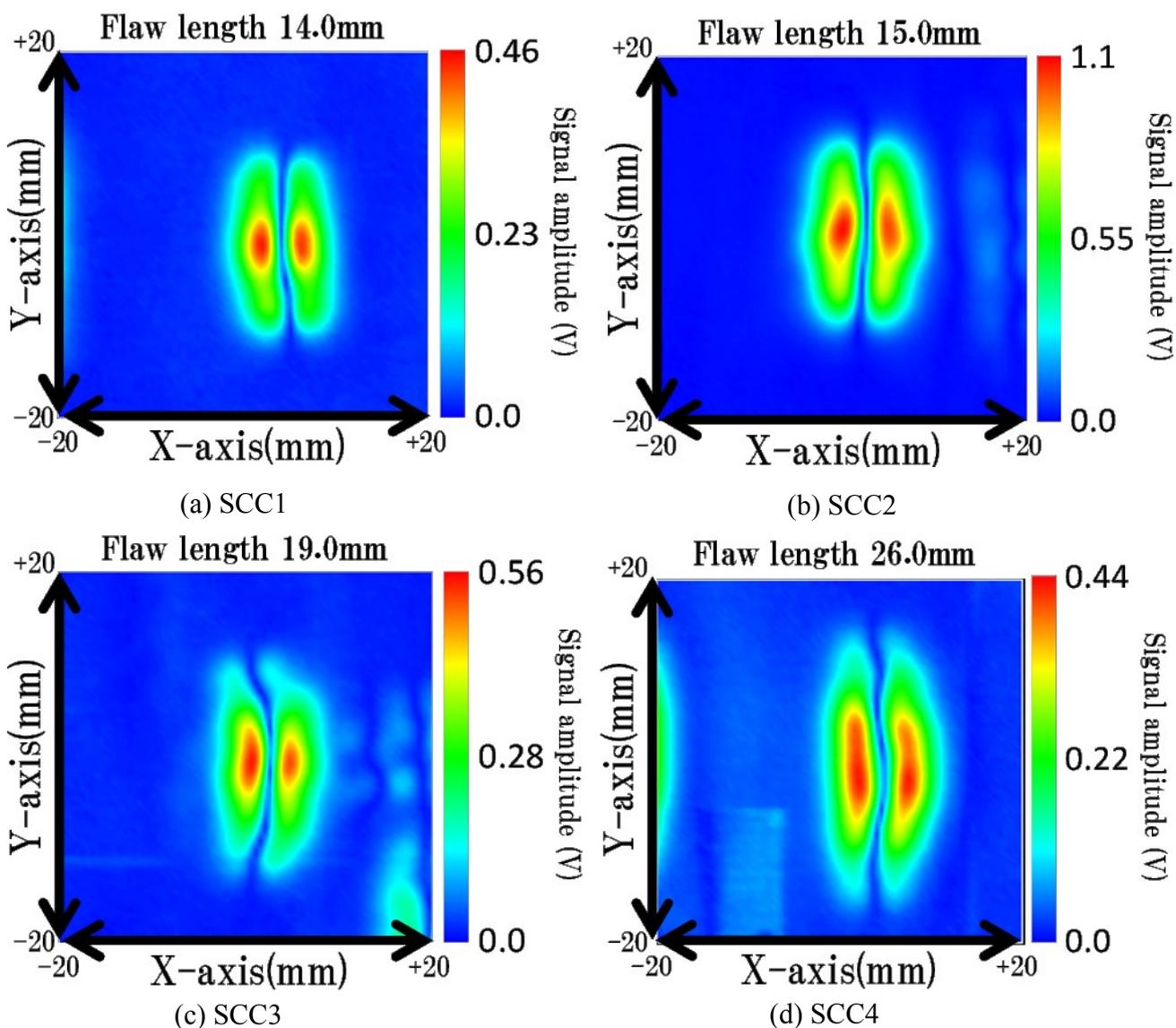


図 3.26 SCC の信号振幅の擬似カラー画像

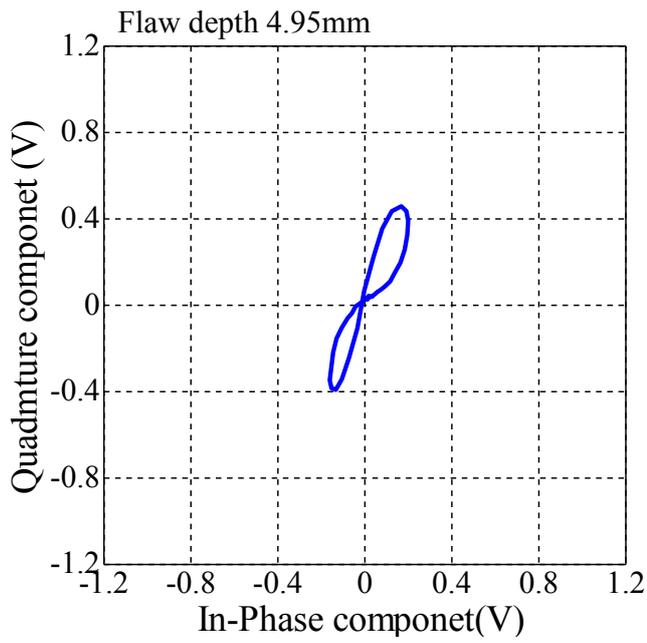
3.4.3 SCC の深さ評価

図 3.27 に SCC の信号パターンを示す。最大きず深さは $SCC2 < 3 < 1 < 4$ の順に深い、信号パターンの大きさは $SCC4 < 1 < 3 < 2$ の順に大きく、今回用いた SCC の場合、最大きず深さが浅い SCC2 の信号が 1 番大きいという結果が得られた。これは、SCC1,4 はきずが 1 つなのに対して、SCC2,3 は複数のきずが隣接して存在している、最大きず深さが浅い SCC2,3 の方が SCC1,4 よりも信号が大きくなったと考えられる。また、信号パターンの傾きも最大きず深さと対応しないという結果が得られた。これは、きずの内部で断面接触していることが原因の一つだと考えられる。断面で接触がある場合、渦電流が接触部をながれ、きずの最深よりも浅い部分を通して流れてしまうので、信号パターンの傾きが進むと考えられる。また、深さが異なるきずが隣接している場合、浅いきずの信号と、深いきずの信号が得られるので、信号パターンが進むと考えられる。

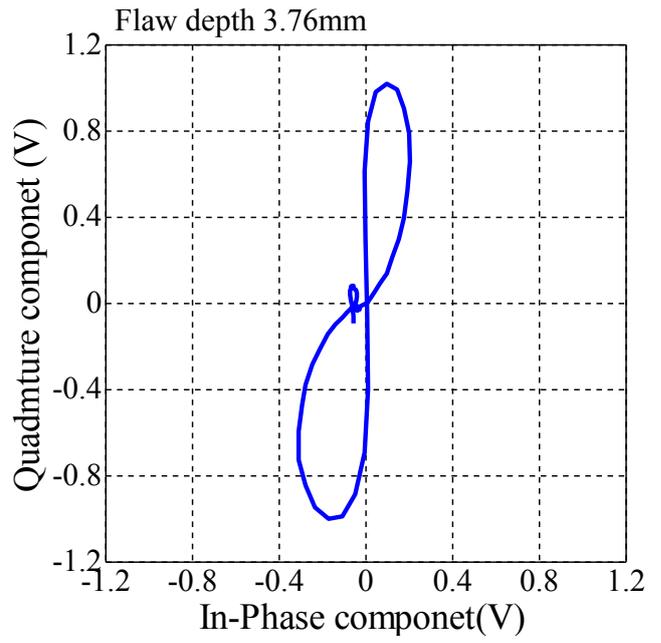
SCC の深さ評価に際して、EDM きずで得られた知見を基に、初めに 12dB 法によって SCC の長さ評価を行った。SCC の場合も TFC 同様、きずの左右両側で発生する信号の大きさが異なるので、左右のきず信号の内、信号振幅の最大値が大きい方で評価を行った。図 3.28 に SCC の信号振幅波形を示す。SCC の場合もきずが長くなると、12dB ドロップ指示長さも長くなる。図 3.29 に 12dB 法によって評価した SCC の長さに対する評価したきず長さを示す。SCC の長さに対して評価したきず長さは、SCC1,2 については精度高く評価できているが、SCC3,4 については評価精度が低く、SCC3 は-45%で評価される。詳細な原因については現在検討中である。

評価したきず長さを利用して、SCC の深さ評価を行った。信号パターンより得られた信号位相から、図 3.11 の補正曲線を用いて長さの影響の補正を行った。図 3.30 に SCC の最大きず深さに対する信号位相を示す。SCC の場合、補正前の信号位相は、最大きず深さに対してばらつきが大きい。信号位相の補正を行った結果、補正後の信号位相も検定曲線に対するばらつきが大きく、今回提案する手法では深さ評価が困難であることが明らかになった。また、補正後も信号位相がばらつくことから、長さや形状以外の要因が影響していると考えられる。

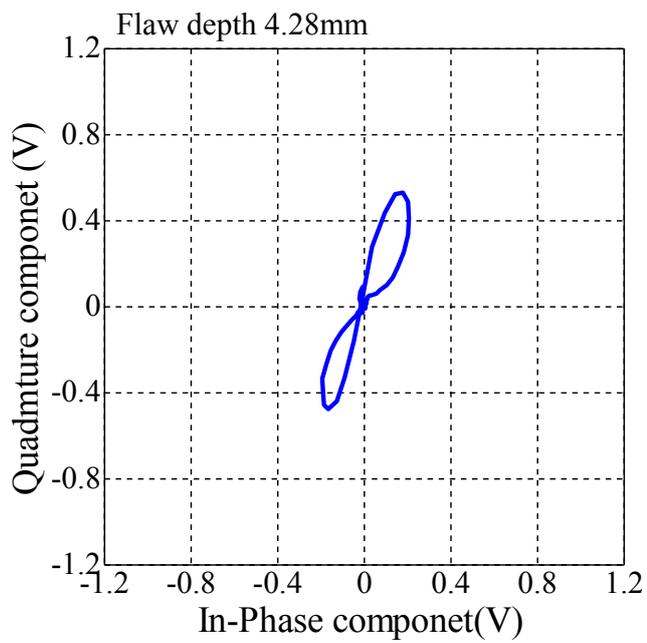
以上のことから、SCC の場合、明瞭なきずの検出が可能である。しかし、きず長さの評価精度が低い場合がある。また、補正後の信号位相のばらつきが大きく評価が困難であることが明らかになった。この要因として、今回用いた SCC が内部で断面接触していることや、複数のきずが隣接している影響で、最大きず深さに対する信号位相がばらつくのだと考えられる。



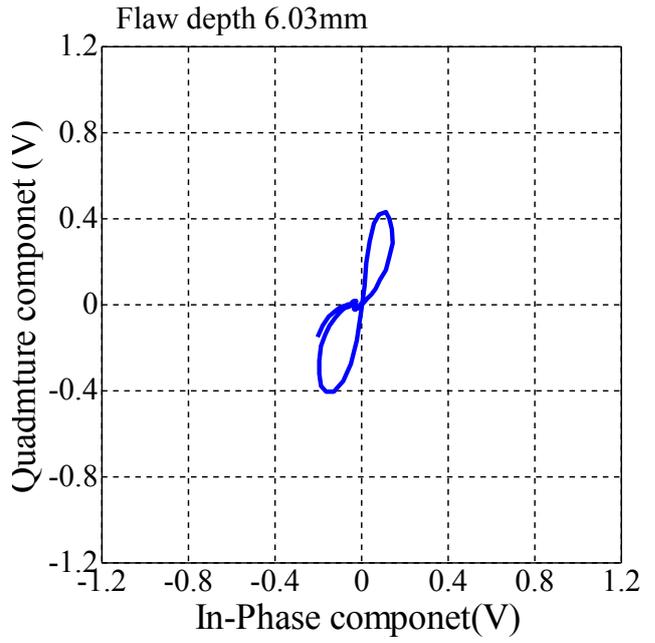
(a) SCC1



(b) SCC2



(c) SCC3



(d) SCC4

図 3.27 SCC の信号パターン

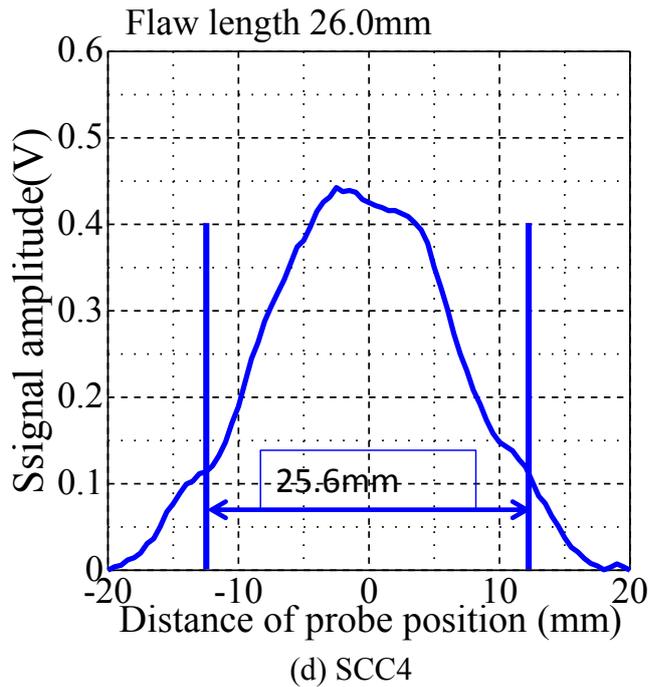
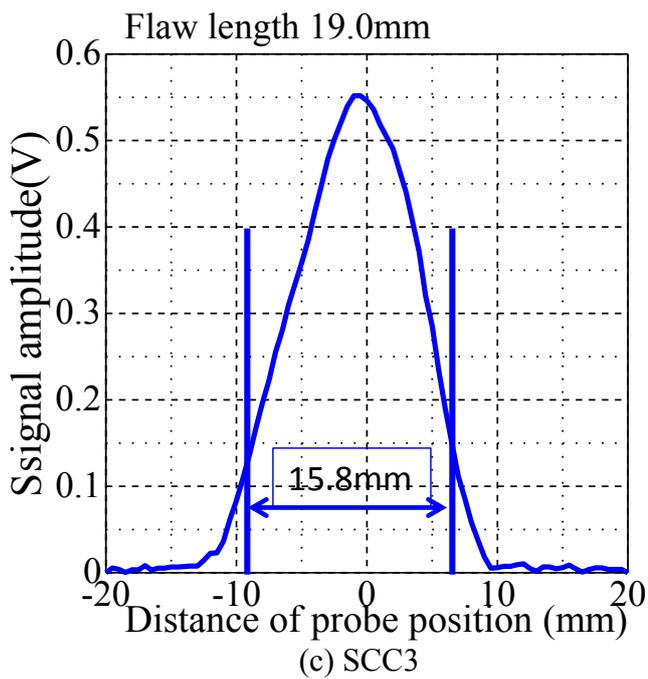
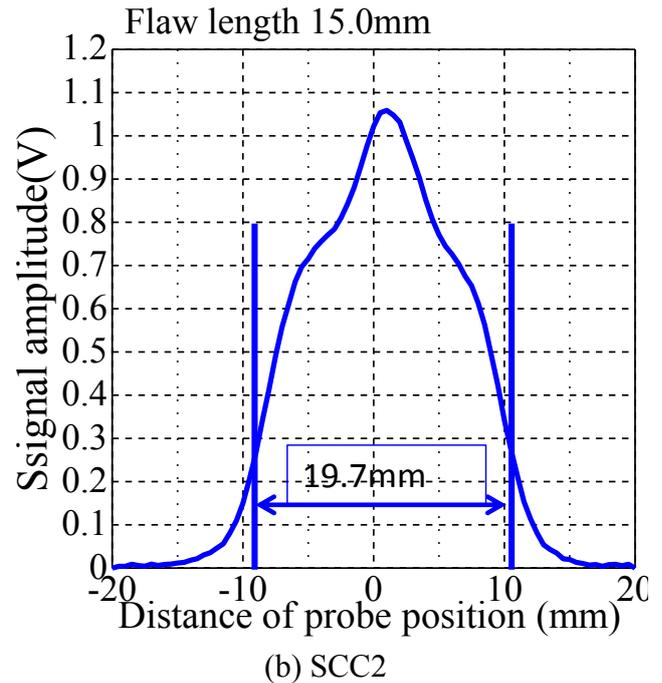
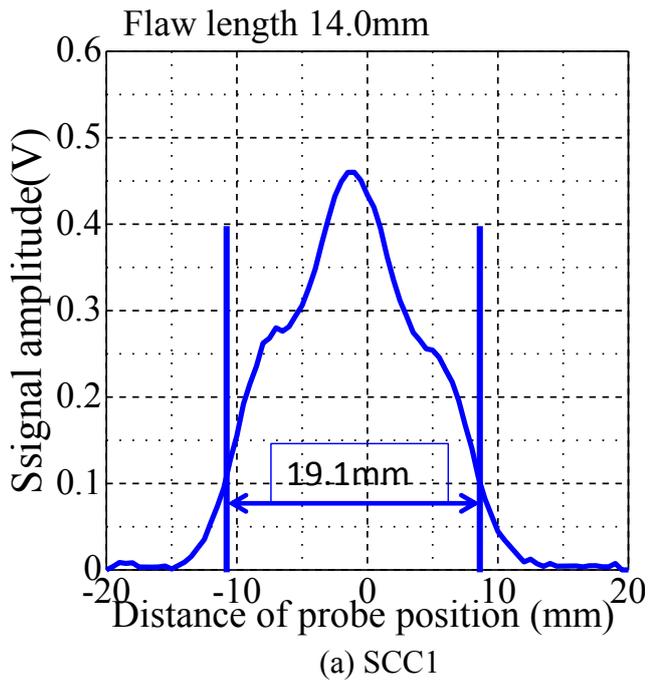


図 3.28 SCC の信号振幅波形

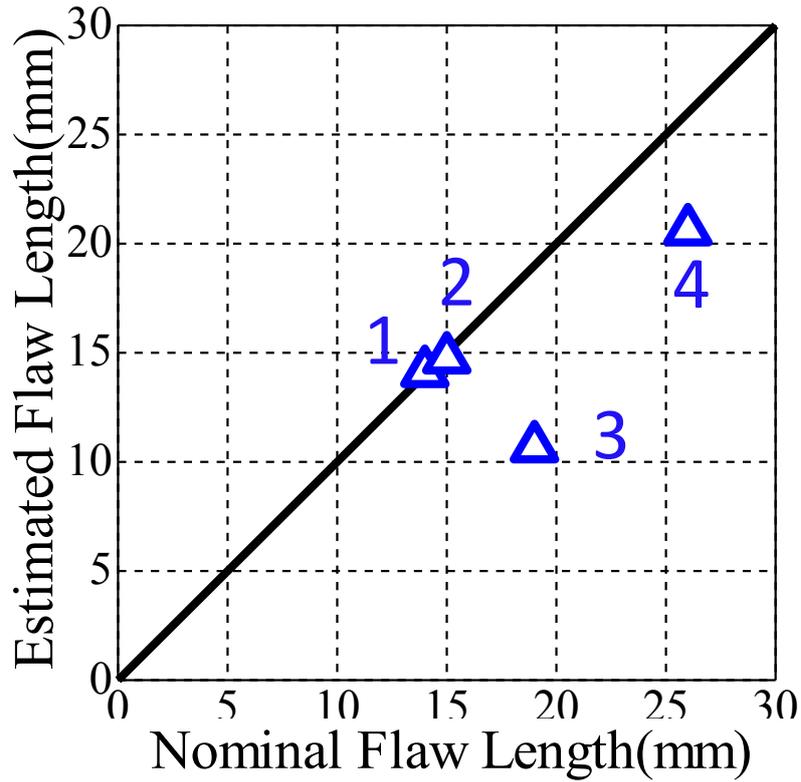


図 3.29 SCC の長さに対する
評価したきずの長さ

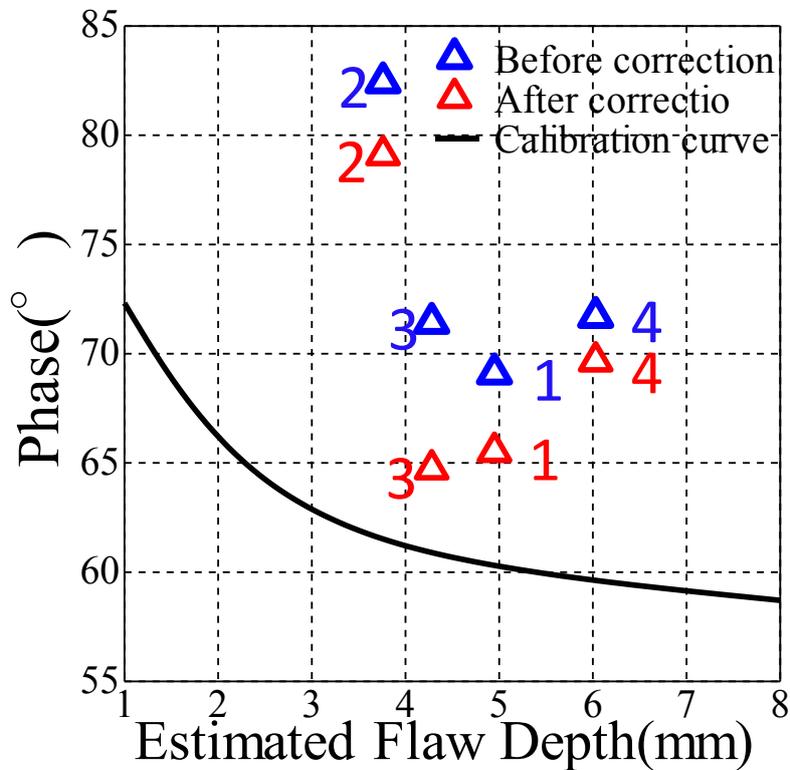


図 3.30 SCC の最大きず深さに対する信号位相

3.5 有限要素法を利用した検討

SCC の信号位相がばらつく原因として、表面図と破壊試験の観測結果から、断面接触やきずが複数存在していることなどが考えられる。そこで、SCC1~4 の特徴(きずの数と断面接触)を模した解析モデルを作成して数値解析を行い、信号位相にどのような影響を与えるか検討を行った。なお、A-φ法によって数値解析を行った。

3.5.1 有限要素法について

有限要素法とは「無限の自由度を持つ連続体を、ある指定された有限個の未知量を含む部分領域、あるいは要素の集合体を用いて近似し、工学問題を解く手法の一つ」とされる。つまり、複雑な形状・性質を持つ物体を、単純な形状・性質に小分割し、その一つ一つの要素の特性を、数学的な方程式を用いて近似的表現した後、単純な方程式を組み合わせ、全ての方程式が成立する解を求めることで全体の挙動を予測しようとするものである。図 3.31 に有限要素法の概要を示す。

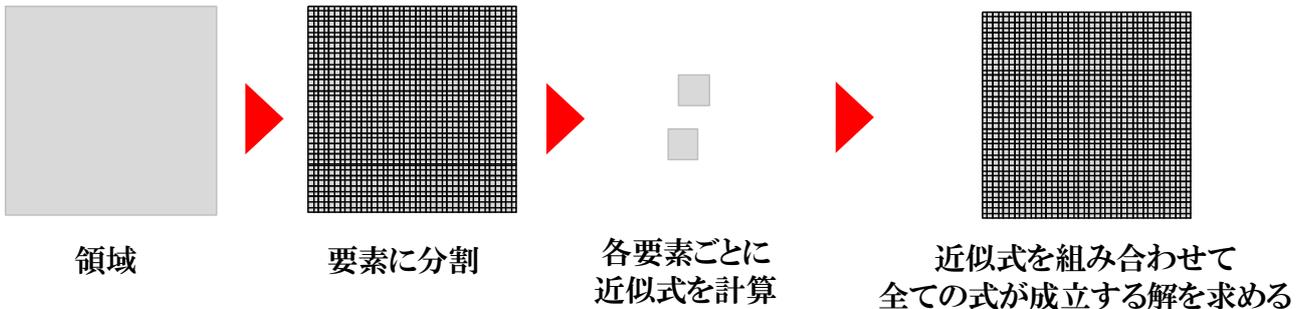


図 3.31 有限要素法の概要図

3.5.1.2 有限要素法の基礎方程式と離散化

渦電流解析では、変異電流を無視できるので、磁場解析の基礎方程式は、次式となる。

$$\nabla \times H = J \quad - (3.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad - (3.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad - (3.4)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad - (3.5)$$

なお、静磁場の場合は渦電流が流れないので基礎方程式は

$$\nabla \times H = J_0 \quad - (3.6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad - (3.4)$$

となる。J₀は強制電流密度である。

構成方程式を用いて未知ベクトル関数として電気スカラーポテンシャルφと磁気ベクトルポテンシャルAを導入して、ファラデーの電磁誘導法則と磁束密度の保存則を満足するように電界の強さEと磁束密度Bを次式のようにあらわす。

$$E = -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \quad - (3.7)$$

$$B = \nabla \times A \quad - (3.8)$$

また、(3.8)と構成方程式 $B=\mu H$ を用いると、ベクトル公式から(3.3)、(3.4)は恒等的に成り立つので、(3.2)、(3.5)を用いると A と ϕ の支配方程式が得られる。(3.7)、(3.8)を(3.2)に代入すると

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J \quad - (3.9)$$

このとき電流 J は入力電流と渦電流に分けられるので、渦電流はオームの法則を適用して

$$J = J_0 + \sigma E \quad - (3.10)$$

ここで σ は電気伝導率である。よって下式の支配方程式が得られる

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J_0 + \sigma \left\{ -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right\} \quad - (3.11)$$

$$\nabla \cdot \left\{ J_0 + \sigma \left\{ -\nabla\phi - \frac{\partial A}{\partial t} \right\} \right\} = 0 \quad - (3.12)$$

A :磁気ベクトルポテンシャル

J_0 :強制電流密度

ϕ :電気スカラーポテンシャル

μ :比透磁率

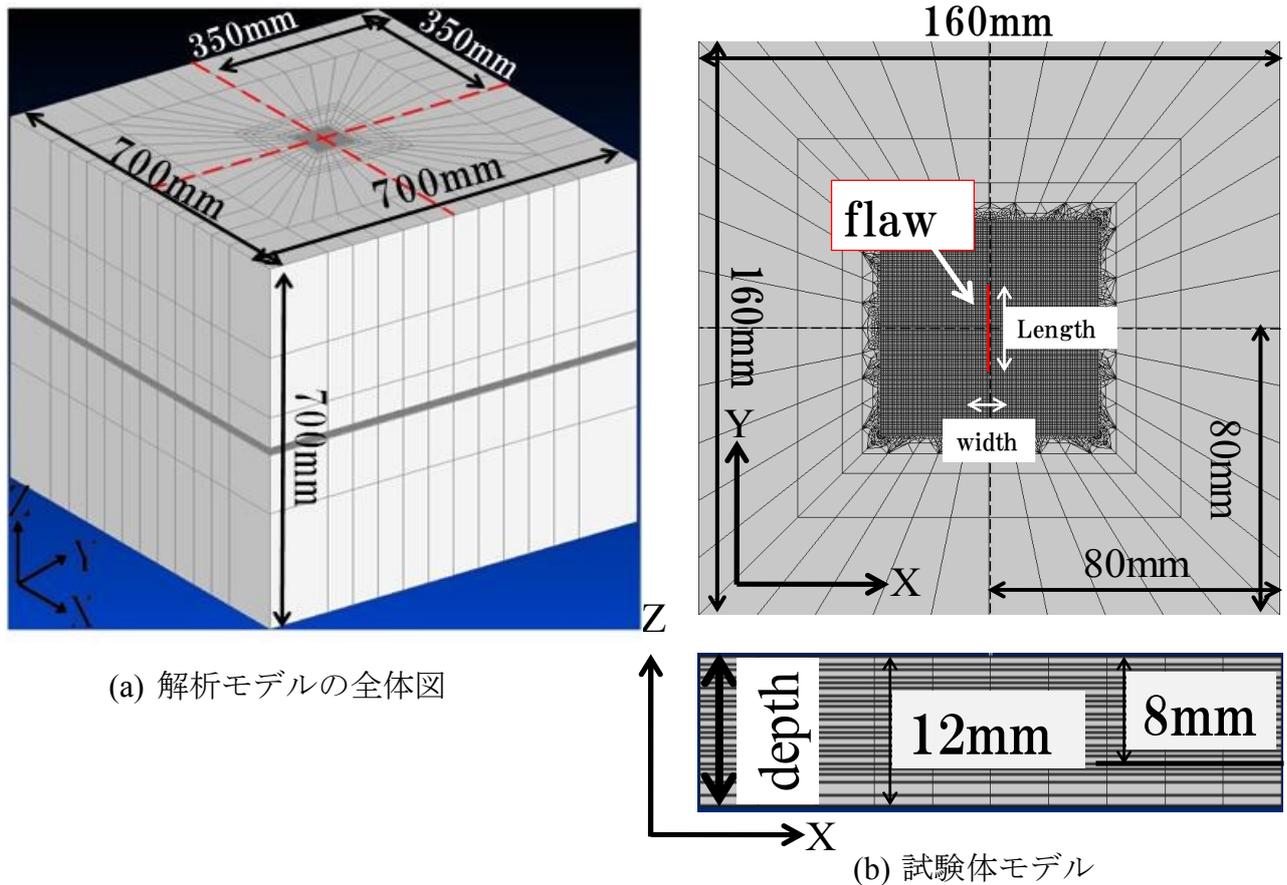
本研究では、株式会社エヌ・エス・ティの Femap を用いて三次元解析モデルを作製し、作製した解析モデルを PHOTO-Series を用いて有限要素解析を行った。

3.5.2 解析モデル

解析モデルは、試験体(きずモデル含む)、検出コイル及び励磁コイルの3つのモデルを作成した。

3.5.2.1 試験体モデル

図 3.32 に作製した試験体の解析モデルを示す。図 3.32(a)に解析モデルの全体図を示す。図 3.32(b)に試験体モデルを示す。試験体モデルは 700mm^3 の空気領域に覆われており、空気領域の中心部に試験体モデルを作成した。試験体モデルの寸法は $160 \times 160 \times 12\text{mm}^3$ とし、導電率は $1.35 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、比透磁率を 1 としている。空気領域は導電率を 0S/m 、比透磁率を 1 としている。なお、試験体モデルの寸法は実験で用いた試験体(図 3.1)を模している



(a) 解析モデルの全体図

(b) 試験体モデル

図 3.32 解析モデル

3.5.2.2 きずモデル

実験に用いた EDM きずと SCC の特徴(きずの数と部分接触)を模したきずモデルを試験体モデルに作成した。図 3.33(a),(b)に矩形型とお椀型のきずモデルの断面図を示す。EDM きずモデルの寸法を表 3.8 に示す。

図 3.34 (a)~(c)に SCC モデルの断面図を示す。SCC モデルは①隣接するきずの数②断面接触、といった2つの特徴の影響を検討するため、きず形状を矩形型とし最大きず深さを4mm、長さを25mm、きずの幅を0.1mm一定として単純化している。また、SCC2,3モデルのきずの間隔は0.015mmとしている。図 3.34 (a) はきずが1つで、深さ2mm以降で断面が見られる SCC1 と SCC4 の特徴を模している。図 3.34(b)は、最大きず深さが4mmで、深さ2mm以降で断面接触しているきずが2つ隣接している、SCC2 の特徴を模している。図 3.34 (c) は深さが異なるきずが5つ隣接している SCC3 を模している。それぞれの深さは、左から0.33,0.33,4.00,2.66,1.00mmとした。なお、図中の白色部は接触なし、黒色部は接触ありを示しており、黒色部には試験体の導電率の5%を付与して断面接触を模した^{16),18)}。

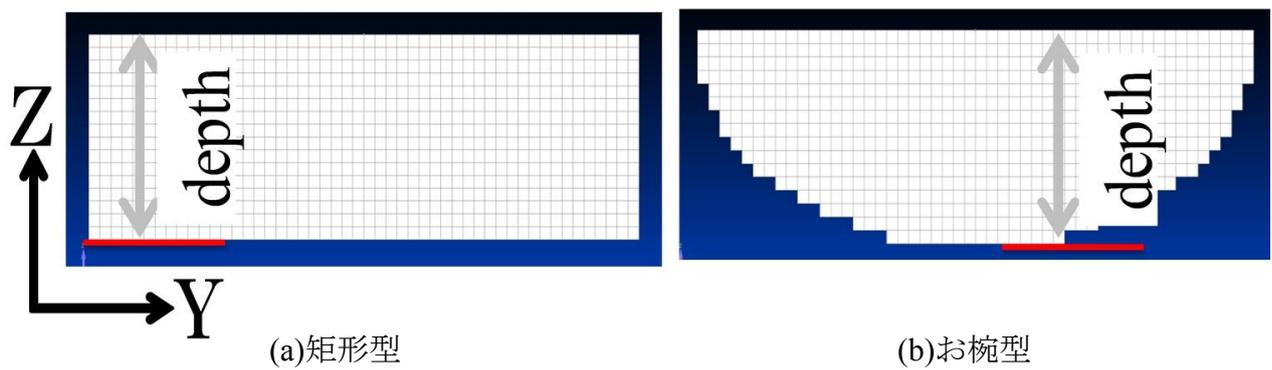


図 3.33 EDM きずモデルの断面図

表 3.8 EDM きずモデルの寸法

Unit(mm)

Flaw model number	length	depth	width
Rectangle1	25.0	1.0	0.4
Rectangle2	25.0	2.0	0.4
Rectangle3	25.0	4.0	0.4
Rectangle4	25.0	8.0	0.4
Rectangle5	10.0	4.0	0.4
Rectangle6	15.0	4.0	0.4
Bowl	25.0	8.0	0.4

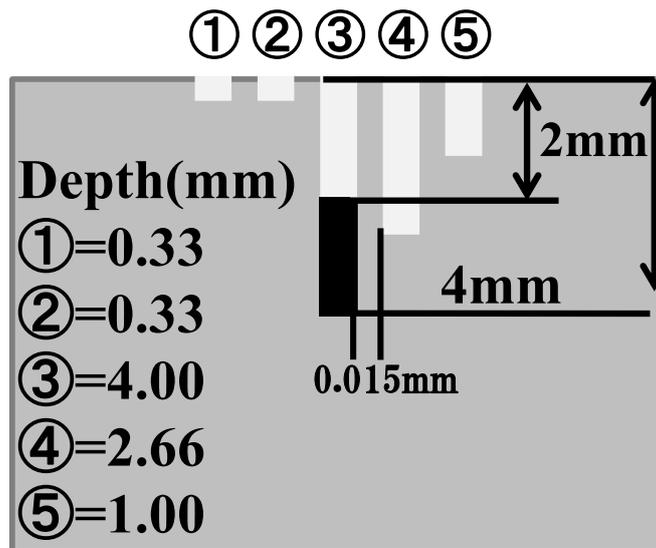
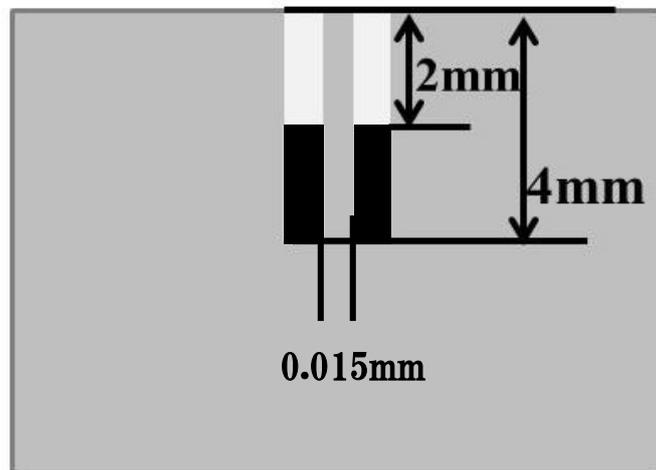
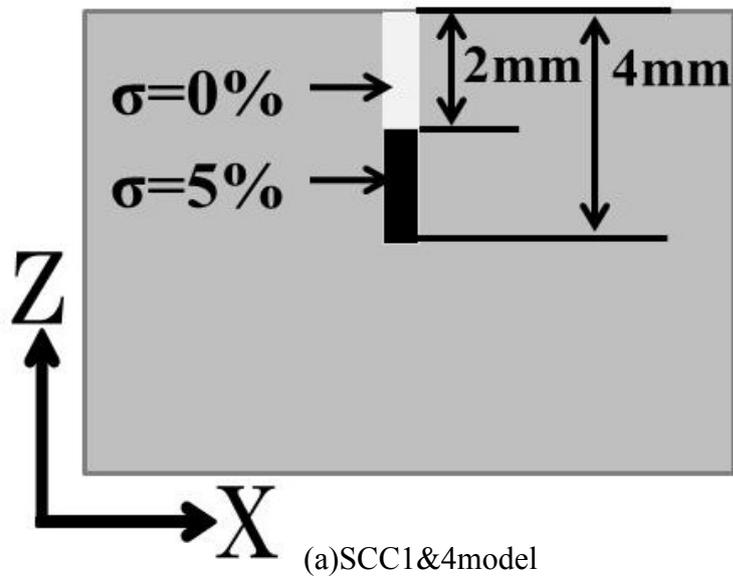


図 3.34 SCC モデルの断面図

3.5.2.3 Θプローブの解析モデルと解析条件

図 3.35 にΘプローブの解析モデル(以降は、Θプローブモデル)を示す。Θプローブモデルは、励磁コイルモデルの外径を 9mm、内径を 7mm、巻線断面積を 1mm²とし、検出コイルモデルは縦 7mm、横 6.8mm、巻線断面積 1mm²とした。

解析条件は、電流密度を 1.3×10^7 A/m²、試験周波数を 100kHz、リフトオフを 0.5mm の条件で解析を行った。なお、Θプローブモデルの寸法は実験で用いたプローブを模している。

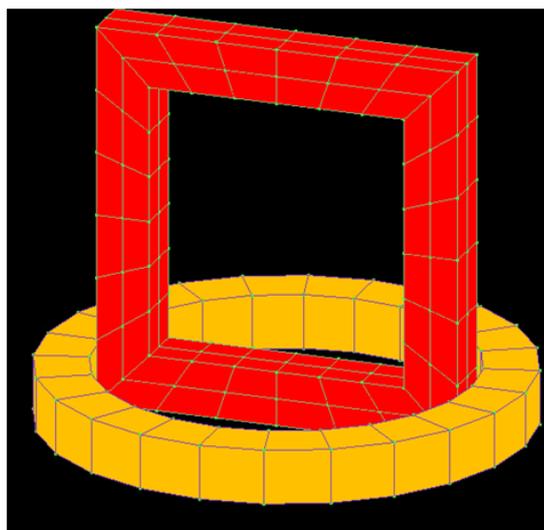


図 3.35 Θプローブの解析モデル

3.5.3 解析結果

3.5.3.1 EDM きずモデルのきず検出特性

EDM きずモデルを用いて、きずの深さ、長さ及び形状が異なる場合について解析を行った。検討項目と EDM きずモデルの寸法を表 3.9 に示す。

表 3.9 検討項目と EDM きずモデルの寸法

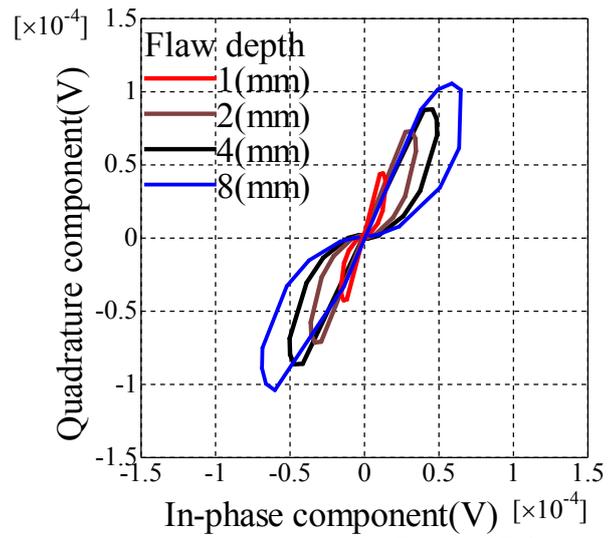
検討項目	深さ(mm)	長さ(mm)	幅(mm)	形状	角度(°)
きずの深さが異なる場合	1.0	25.0	0.4	矩形	0.0
	2.0				
	4.0				
	8.0				
きずの長さが異なる場合	4.0	10.0	0.4	矩形	
		15.0			
		25.0			
きずの形状が異なる場合	8.0 (最大深さ)	25.0	0.4	矩形	
				お椀	

解析によって得られた EDM きずモデルの信号パターンを図 3.36 に示す。図 3.36(a)にきずの深さが異なる場合の信号パターンを示す。きずが深くなると、信号パターンは大きくなり、パターンの傾きが遅れる。

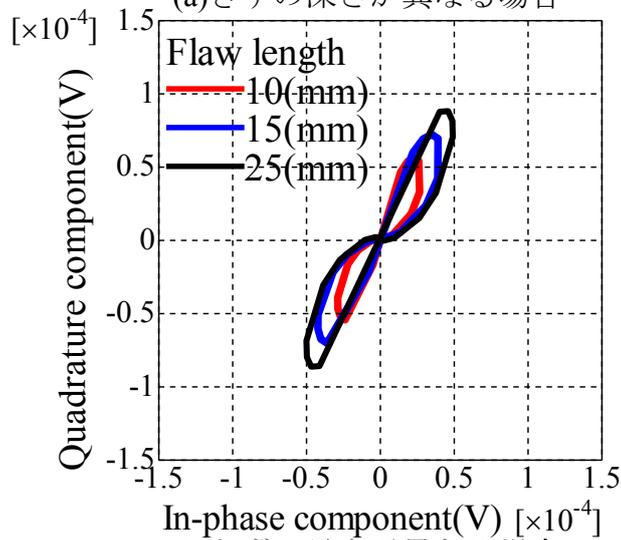
図 3.36(b)にきずの長さが異なる場合の信号パターンを示す。きずが長くなると、信号パターンが大きくなり、パターンの傾きが進む。

図 3.36(c)にきずの形状が異なる場合の信号パターンを示す。きずの寸法が同じで形状が異なる場合、矩形型と比べてお椀型は小さいので、信号パターンは小さくなり、信号パターンの傾きが僅かに進む。

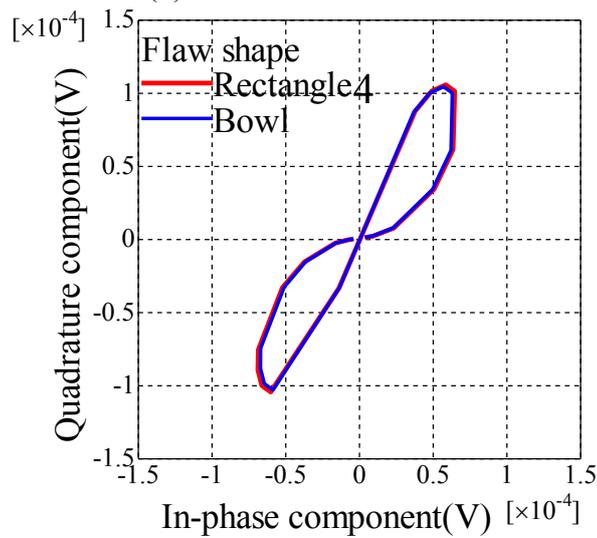
図 3.37 に EDM きずモデルの最大きず深さに対する信号位相を示す。実験結果と解析結果とで信号パターンや信号位相の変化の傾向によい一致が得られた。なお、解析で得られた信号は、単巻コイルの起電力であり、検出コイルの巻き数などの条件は換算していない。



(a)きずの深さが異なる場合



(b)きずの長さが異なる場合



(c)きずの形状が異なる場合

図 3.36 EDM きずモデルの信号パターン

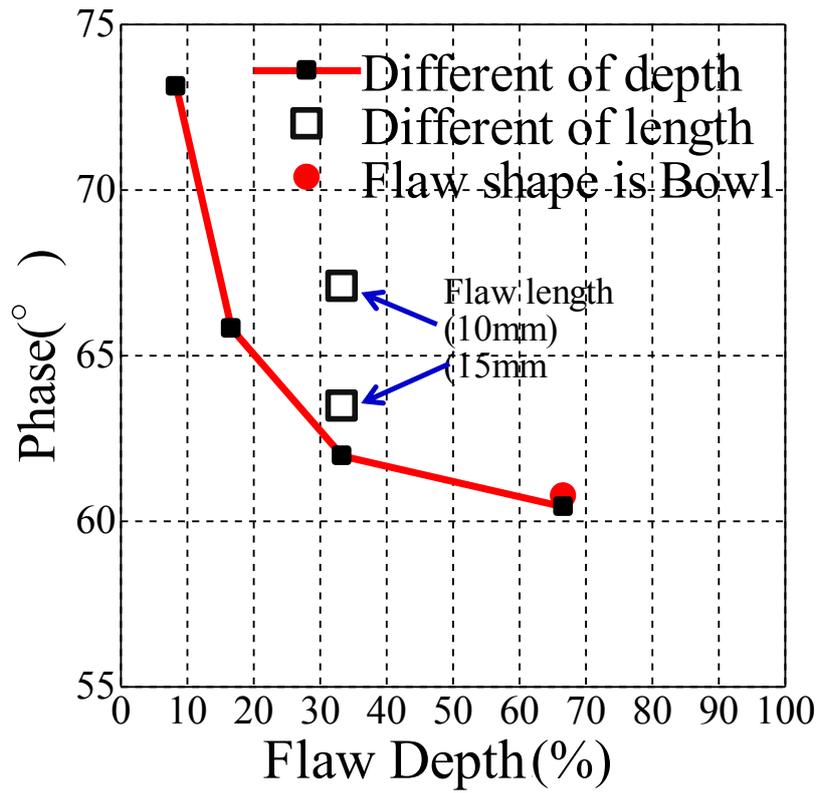


図 3.37 EDM きずモデルの最大きず深さに対する信号位相

3.5.3.2 SCC モデルの深さ評価

実験で用いた SCC の特徴を模した SCC モデルを用いて、信号位相にどのような影響があるか検討を行った。図 3.38 に SCC モデルの信号パターンを示す。なお、図中の赤線は EDM きずモデルの Rectangle3(深さ 4.0mm、長さ 25mm、幅 0.4mm)の信号パターンである。

図 3.38(a)に SCC1&SCC4 モデルの信号パターンを示す。Rectangle3 と比べて断面接触がある場合、信号パターンは小さくなり、パターンが僅かに進む。

図 3.38(b)に SCC2 モデルの信号パターンを示す。2 つのきずが隣接し、断面接触がある場合、Rectangle3 と比べて信号パターンは大きくなり、パターンの傾きは進む。

図 3.38(c)に SCC3 モデルの信号パターンを示す。5 つのきずが隣接し、断面接触がある場合、Rectangle3 と比べて信号パターンは大きくなり、パターンの傾きは進む。

以上のことから、断面接触及び、きずが複数存在する場合、接触がなく単一のきずと比べて信号パターンの大きさが異なり、パターンの傾きは進むことが明らかになった。Rectangle4 モデルと比べて、SCC1&4 モデルの信号パターンが小さくなるのは、接触部を渦電流が流れるので、接触が無い場合と比べて小さく浅いきずとみなせる。したがって、得られるきず信号パターンが小さくなると考えられる。なお、SCC2 及び 3 モデルの場合、断面接触があるが、きずが複数隣接しているので、単一のきずである Rectangle3 モデルと比べてきず信号が大きくなると考えられる。信号パターンの傾きが進む原因については、断面接触がある場合、接触部を渦電流が流れ、最大きず深さよりも浅い部分を流れるので、得られるきず信号パターンの傾きが進むと考えられる。

図 3.39 に最大きず深さに対する信号位相を示す。図中の黒線は EDM きずモデルから求めた検定曲線である。各 SCC モデルの信号位相は検定曲線よりも進んでいることがわかる。また、検定曲線と比べて、SCC1&4<SCC3<SCC2 モデルの順で信号位相が大きくなっている。これは傾向は、実測結果の図 3.26 の補正前の SCC1<SCC3<SCC2 の順で信号の信号位相が大きいという傾向と一致している。以上のことから、きずの断面接触やきずが複数隣接することが信号位相に影響を与える一因であることを明らかにした。なお、実測で得られた SCC の信号位相(図 3.30)と解析で得られた信号位相(図 3.39)とでは定量的な値が一致していない。これは、実際の SCC の表面や断面形状が複雑なのに対して、解析ではモデルの単純化のために直線的な割れとしてモデル化していることや、接触部の導電率を均一としたことが要因だと考えている。

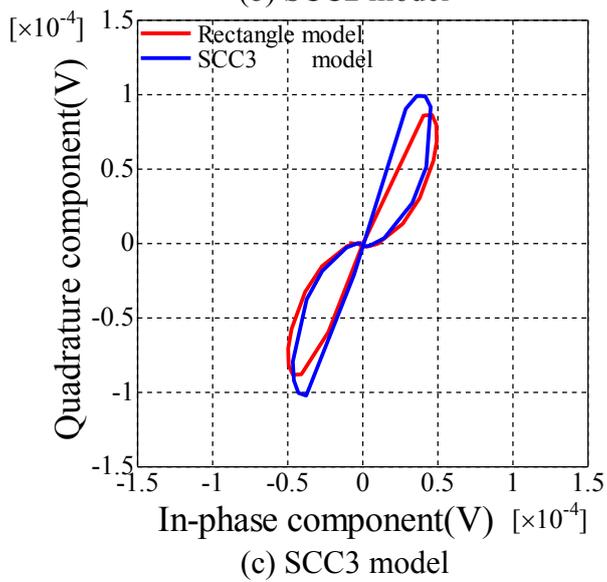
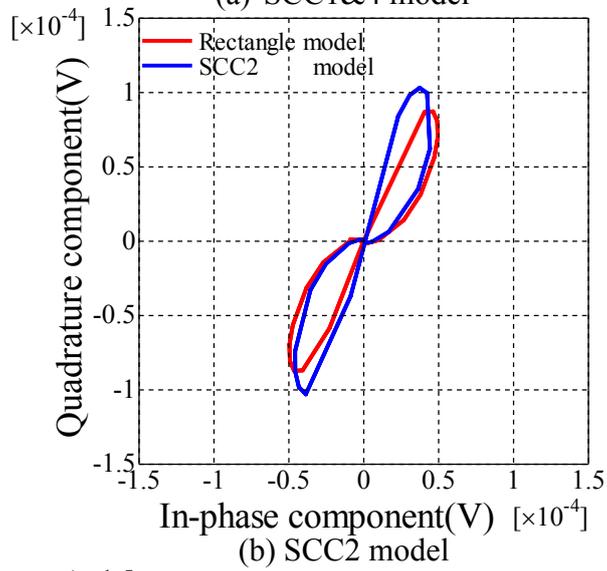
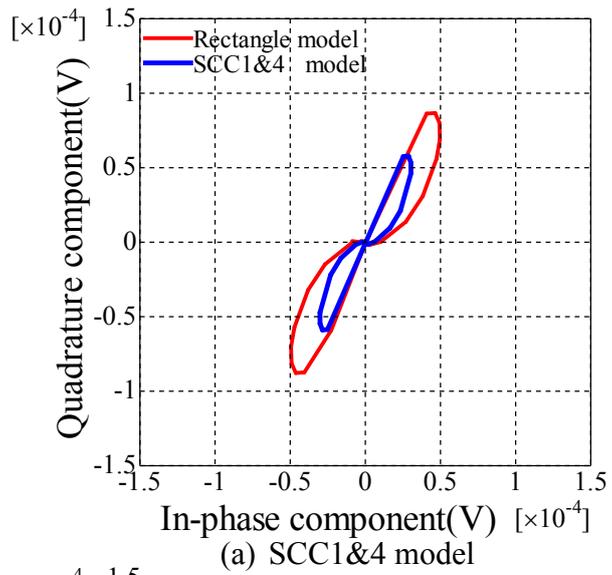


図 3.38 SCC モデルのきず信号パターン

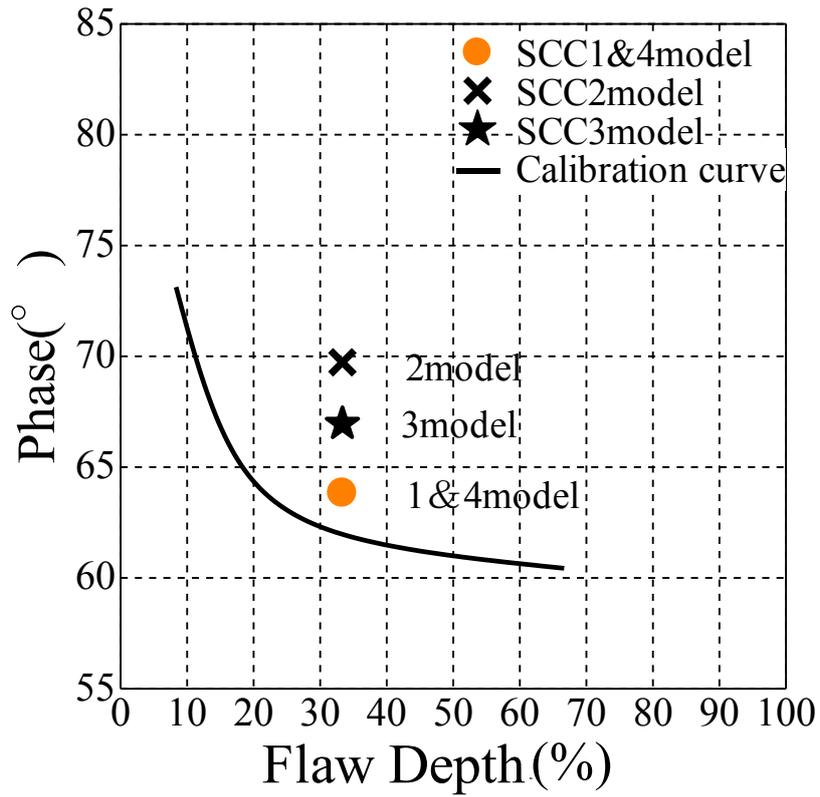


図 3.39 SCC モデルの最大きず深さに対する信号位相

3.6 まとめ

第3章では、EDM きずに対して Θ プローブを適用したきずの検出と評価方法の検討を行い、得られた知見から SCC 及び TFC の検出及び深さと長さの評価を行った。以下に本章の結果について示す。

3.6.1 Θ プローブを適用した EDM きずの検出と評価方法の検討

- 1) ステンレス鋼材にきずの深さ、長さ、幅、形状が種々異なる EDM きずを施し、 Θ プローブを適用したきず検出を行い、基礎的なきず検出特性を明らかにした。
- 2) きず信号の位相は、きずの幅や角度 ($\pm 10^\circ$ 以内) の影響はほとんど受けず、きずが深くなると位相が遅れる。また、きずの形状と深さが同じでも、励磁コイルの外径 9mm に対して、きずの長さが 25,15,10mm と短くなると、位相が進む。また、きず形状がお椀型の場合、同寸法の矩形型と比べて僅かに位相が進むことが明らかになった。
- 3) 信号位相を利用したきず深さの評価を行う場合、得られた信号位相から長さや形状の影響を補正する必要がある。そこで、きず長さの評価方法として新たに 12dB 法を提案し、きず長さの評価を行った。
- 4) 12dB 法によって、EDM きずの長さの評価した結果、励磁コイルの外径に対してきずの長さが 10mm の場合は実際のきず長さに対して+12%の範囲で評価が可能であり、きずの長さが 15mm 以上であれば $\pm 7\%$ の範囲で評価可能である。
- 5) きずの長さや形状の影響を補正した信号位相によってきず深さの評価を行った結果、検定曲線と比較して $\pm 0.5\%$ の範囲で評価が可能であり、きず長さが 10mm の場合、+2.5%で評価が可能である。

3.6.2 Θ プローブを適用した TFC の検出と評価

- 1) TFC に対しても、SN 比高く、明瞭にきずの検出が可能である。
- 2) 12dB 法によって TFC の長さ評価を行った結果、励磁コイルの外径(9mm)に対してきずの長さが 11.7mm の場合+20%で評価可能であり、きずの長さが 14.4mm 以上であれば+7%の範囲で評価可能である。
- 3) きずの長さや形状の影響を補正して、TFC の深さ評価を行うと、検定曲線に対して $\pm 2.5\%$ の範囲で評価可能である。したがって、 Θ プローブを用いることできず深さの推定が期待できる。なお、定量的な評価は困難である。

3.6.3 Θ プローブを適用した SCC の検出と評価

- 1) SCC に対しても、SN 比高く、明瞭にきずの検出が可能である。
- 2) 12dB 法によって SCC の長さ評価を行った結果、SCC1,2 については精度高く評価できたが、SCC3,4 については精度低く評価される結果となった。評価精度が低い原因については現在検討中である。
- 3) 補正前の信号位相のばらつきが大きいため、補正後の信号位相も検定曲線に対するばらつきが大きく、SCC の場合深さ評価が困難である。
- 4) SCC の信号位相がばらつく一因を有限要素解析によって明らかにした。その結果、断面

接触やきずが複数隣接していることが信号位相に影響を与える一因であることを明らかにした。

以上のことから Θ プローブを適用することで、SCC や TFC のような複雑なきずに対しても精度高く検出することが可能である。TFC のように内部での断面接触や複数のきずが隣接していないきずの場合、得られるきず信号を利用することで、きず深さの推定が期待できる。SCC のように、内部での断面接触や複数のきずが隣接している複雑なきずの場合、きず長さの評価精度が低い場合がある。また、きず深さの評価精度が低いので更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 野中 善夫,西水 亮,河野 尚幸,江原 和也 : BWR シュラウドサポート点検技術の開発,日立評論,Vol.89 No.02, pp.188-189, (2007.02)
- 2) B. Wincheski,J.P. Fulton, S.Nath, M.Namkung and J.W.Simpson : Self-nulling Eddy Current Probe for Surface and Subsurface Flaw Detection” , Materials Evaluation, 52(1),pp.22-26, (1994)
- 3) 3)K.Krzywosz : Latest Eddy Current Applications in the Nuclear Industry,13th International Conf. Nuclear & Pressure Vessel Industries, Kyoto, Japan, pp.61-65, (1995)
- 4) 4)G.L.Burkhardt,J.L.Fisher,J.S.Stolte,S.R.Kramer and K.L.Cobble: NDE of Aging Aircraft Structure Using Orthogonal-axis Eddy Current Probes, Review of Progress in QNDE,Vo1.16,pp.1021-1027, (1997)
- 5) 5)星川 洋,小山 潔 : 回転渦電流を利用した渦流探傷プローブ,日本 AEM 学会誌,3(3), pp.36-42, (1995)
- 6) 星川 洋,小山 潔 : きず深さの評価を目指したリフトオフ雑音が小さい渦電流探傷上置プローブの提案,非破壊検査 53(5),pp.288-293, (2004)
- 7) 星川 洋,小山 潔,三橋 宗太郎 : 一様渦電流プローブによる磁性体の渦電流探傷と漏洩磁束探傷について,非破壊検査,54(2),pp.84-90, (2005)
- 8) 8 福岡 克弘,橋本 光男 : マルチ化した一様渦電流プローブによる自然き裂の探傷評価,電学論 A,126,12,pp.1255-1261, (2006)
- 9) 遊佐 訓孝,橋爪 秀利, IikkaVirkkune, Mika Kemppainen : 渦電流探傷試験における熱疲労割れの数値モデリング,保全学 Vol.11,pp73-78,(2013)
- 10) Noritaka Yusa, Stephane Perrin, Kazue Mizuno and Kenzo Miya : Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations , NDT&E international 40,pp.577-583, (2007)
- 11) Yusa Noritaka, Hashizume Hidetoshi, Virkkunen Iikka and Kemppainen Mika : Numerical modeling of thermal fatigue cracks from the viewpoint of eddy current testing , 保全学 11,pp.73-78,(2012)
- 12) Jing Wang,Noritaka Yusa,Hongliang Pan,Mika Kemppainen,Iikka Virkkunen and Hidetoshi Hashizume : Discussion on modeling of thermal fatigue cracks in numerical simulation based on eddy current signals , NDT&E international 55,pp.96-101,(2013)
- 13) Noritaka Yusa, Ladislav Janousek, Zhenmao Chen and Kenzo Miya : Diagnostics of stress corrosion and fatigue cracks using benchmark signals,Materials Letters59,pp.3656-3659, (2005)
- 14) Noritaka Yusa, Stephane Perrin and Kenzo Miya : Eddy current data for characterizing less volumetric stress corrosion cracking in nonmagnetic materials, Materials Letters 61,pp.827-829, (2007)
- 15) Noritaka Yusa, Haoyu Huang, Kenzo Miya : Numerical evaluation of the ill-posedness of eddy current problems to size real cracks, NDT&E international 40,pp.185-191, (2007)
- 16) Noritaka Yusa, Stephane Perrin, Kazue Mizuno and Kenzo Miya :Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations, NDT&E international 40,pp.577-583, (2007)
- 17) Noritaka Yusa, Zhenmao Chen, Kenzo Miya, Tetsuya Uchimoto and Toshiyuki Takagi :Large-scale parallel computation for the reconstruction of natural stress corrosion cracks from eddy current testing signals, NDT&E international 36,pp.449-459, (2003)
- 18) 程 衛英,古村 一郎,芝 光晴,兼本 茂 : 渦電流探傷によるき裂面の部分接触を伴う応力腐食割れ

の深さサイジング :溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー vol.2 pp.19-26(2006)

- 19) 大島 賢一,橋本 光男 : 渦電流探傷試験における SCC の数値解析モデル化の検討, 日本 AEM 学会誌,10,(4), pp26-30, (2002)
- 20) 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新型上置プローブに関する研究,非破壊検査,50(11),pp.736-742, (2001)
- 21) 非破壊検査技術シリーズ渦電流探傷試験 I :社団法人日本非破壊検査協会 ,pp.85-86, (2003)
- 22) 日本電気協会 : 原子力発電所用機器における渦電流探傷試験指針,解 15

第四章 炭素繊維複合材のきず検出

4.1 背景

炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 以降は CFRP)は先進複合材料と呼ばれ、アルミニウムなどの従来用いられる金属に代わり得る軽量かつ高性能な材料の一つである。強化材として、炭素繊維に母材となる樹脂を含浸させて硬化させることによって作成され、CFRP はアルミニウム合金などの金属材料と比較して比剛性・比強度などに優れることから、航空宇宙分野でも用いられるようになった。また、繊維方向の割合を自由に設計できることから、金属のような等方性材料とは異なる異方性を有する設計が可能であり、代表的な積層構造として、織物、直交積層、擬似等方の3種類があげられる。CFRP は多くの長所を持つが、外部から強い衝撃を受けると、樹脂割れ、層間はく離、積層破断などの損傷が生じ力学特性が低下する問題があり、放射線透過試験や超音波探傷試験などの非破壊試験法が適用されている^{1)~6)}。しかし、これらの試験方法は試験時間が長いことや、接触媒体が必要といった問題点がある。

CFRP は炭素を含有することから、金属と比較して 10^{-4} ~ 10^{-6} 倍と低い導電性を有するので、渦電流探傷試験の適用が可能である^{7,8)}。渦電流探傷試験は、非接触で高速かつ簡便に試験を行えるので、CFRP の検査に適用すれば他の試験法にはないメリットを持つ。しかし、CFRP の導電率が低いことに加え、繊維方向に大きな導電性を有す異方性材料であることや、繊維配向やうねりに起因する雑音が大きいため、金属試験体と異なり、誘導される渦電流が小さく、検出信号の SN 比が低下するなどの問題がある。したがって、CFRP の検査に渦電流探傷試験を適用するには、雑音小さくきず検出性能の高い試験プローブが必要である。CFRP に対する渦電流探傷試験を適用した先行研究として、雑音を低減を目的とした差動渦電流プローブによる CFRP に人工的に施した欠陥の検出⁹⁾や CFRP に対する渦電流探傷試験に関する報告^{10,11)}がある。しかし、CFRP は繊維シートの積層方法などの違いにより各種存在するが、先行研究については各種 CFRP に誘導される渦電流の分布や実損傷を模したきずの検出に関する報告は見られない。また、雑音小さく SN 比高いきず検出が可能といった特長を持つ、星川・小山らによって開発された Θ プローブ^{12,13)}と呼ばれるプローブがある。このプローブであれば CFRP に対しても雑音小さく SN 比高いきず検出が期待できる。そこで、各種 CFRP に対する Θ プローブを適用したきず検出を行い、 Θ プローブの有効性について検討を行った。なお、CFRP に対する、渦電流探傷試験を適用した先行研究として、回転渦電流プローブを用いた電気特性の測定¹⁴⁾、電磁気試験を用いた欠陥の検出と評価¹⁵⁾、渦電流法を用いた CFRP ラミネートにおけるバルク導電率の特性評価¹⁶⁾、熱可塑性 CFRP の溶接部の剥離検出のための誘導加熱渦電流試験¹⁷⁾、多方向 CFRP の繊維うねりを可視化する渦電流法¹⁸⁾、線状励磁電流が CFRP 板上に配置された際の電磁場の解析解を用いた導電率測定に適した渦電流センサの設計¹⁹⁾などの報告がある。

本章では、以上の背景の下、初めに、電磁気特性の異方性を考慮した有限要素法により求

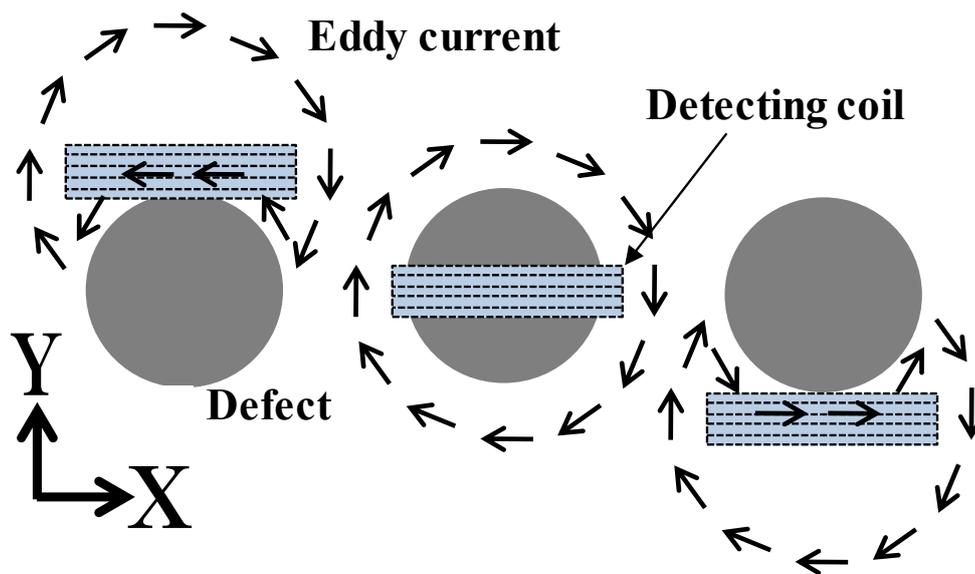
めた渦電流分布を示し、 Θ プローブによる各種 CFRP 板のきず検出に関する基礎的な検討結果について述べる。次に、人工的に衝撃を与えて作製したきず（以降、衝撃きず）の検出結果の検討を行い、CFRP 板に対する Θ プローブの有効性について検討を行ったのでその結果について述べる。

4.2 CFRP の探傷原理

はじめに、織物 CFRP の探傷原理を考える。織物繊維シートにおいて横方向繊維を X 軸方向、縦方向繊維を Y 軸方向とした場合に、シート面内では X 及び Y 軸方向に導電性を有する。また、積層構造であるので、薄い繊維シート間で繊維の部分接触などにより、積層方向である Z 軸方向にも導電性を有する²⁰⁾。これにより試験体にきずなどが無い場合には、渦電流は励磁コイルの巻線に沿って流れ、励磁コイルの中心に位置する検出コイルに鎖交する磁束の総和が零であれば、検出コイルに起電力が発生しない。したがって、きずが無い場合にはきず信号が発生しない。

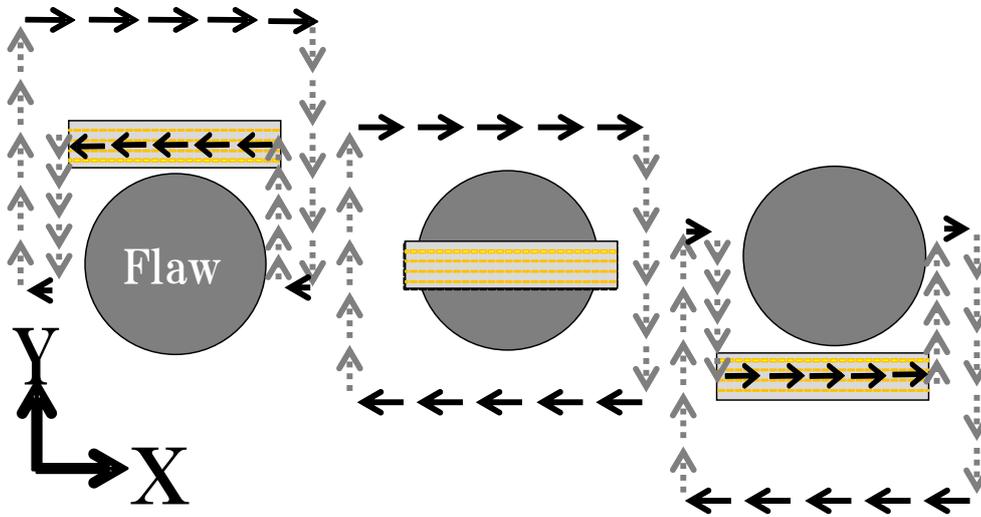
図 4.1(a)に織物 CFRP の探傷原理を示す。積層間にわたるきずが有る場合には、模式的に示す様に渦電流の流れがきずによって妨げられ、きず周辺の渦電流の流れが変わるので、変化した渦電流による磁束が検出コイルに鎖交し、きず信号が発生する。図 4.1(a)に示す様に検出コイルがきずの上側に位置する場合と下側の場合では、検出コイル巻線方向に流れる渦電流の向きが逆となるので、検出されるきず信号の極性は逆になる。なお、層間はく離や樹脂割れ、繊維シートのきずが小さいなど、渦電流の変化が小さい場合には検出が困難である。

図 4.1(b)、図 4.1(c)に直交積層 CFRP と擬似等方 CFRP の探傷原理を示す。一方向繊維シートを積層した擬似等方 CFRP や直交積層 CFRP においては、各層のシート面内では渦電流は繊維方向にのみ流れるが、シートの積層方向が 45° 又は 90° と異なっており、繊維シート間での部分接触などにより積層間にわたって閉ループを成す渦電流の流れが形成される。この積層間にわたって閉ループを形成した渦電流によってきず検出が行える。なお、積層間にわたって形成される渦電流であるので、織物 CFRP に流れる渦電流より、その強度は小さく流れ難い。



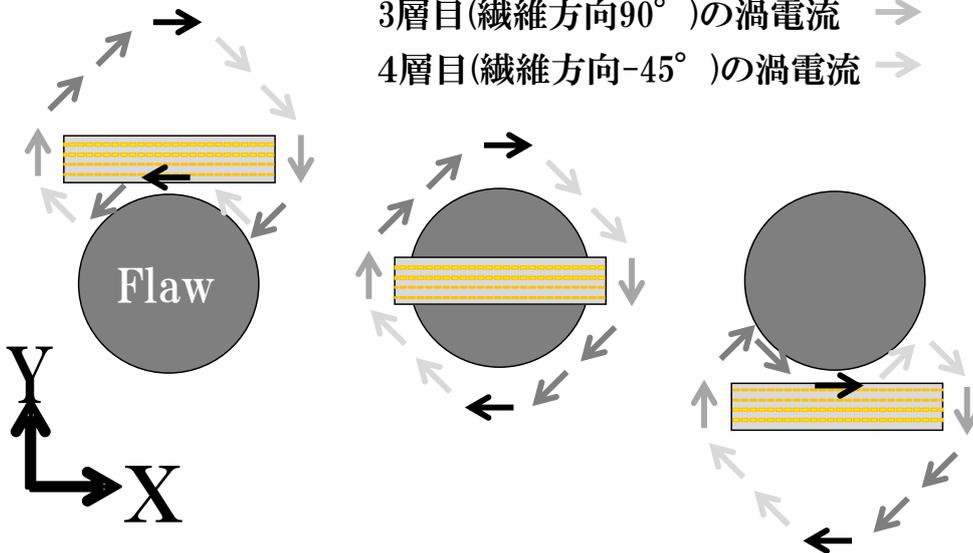
(a)織物 CFRP

1層目(繊維方向 0°)の渦電流 \rightarrow
 2層目(繊維方向 90°)の渦電流 \dashrightarrow



(b)直交積層 CFRP

1層目(繊維方向 0°)の渦電流 \rightarrow
 2層目(繊維方向 45°)の渦電流 \rightarrow
 3層目(繊維方向 90°)の渦電流 \rightarrow
 4層目(繊維方向 -45°)の渦電流 \rightarrow



(c)擬似等方 CFRP

図 4.1 CFRP の探傷原理

4.3 有限要素解析による渦電流分布の検討

A- ϕ 法による有限要素法により、渦電流の解析を行った²¹⁾。円形励磁コイルを含む解析モデルの形状寸法や試験周波数などは、後述の実験条件と同じである。試験体モデルは厚さ0.2mm板を15枚積層したモデルとし、円形励磁モデルは内径7mm、外径9mmとした。各厚さ0.2mm板の電磁気特性は、比透磁率を $\mu_{rx}=\mu_{ry}=\mu_{rz}=1.0$ とし、導電率を、織物CFRPを模した解析では15枚全てで $\sigma_x=\sigma_y=7700[\text{S/m}]$ 、 $\sigma_z=48[\text{S/m}]$ とし、直交積層CFRPを模した解析で 0° 方向シートでは $\sigma_x=7700[\text{S/m}]$ 、 $\sigma_y=\sigma_z=48[\text{S/m}]$ 、 90° 方向シートでは $\sigma_y=7700[\text{S/m}]$ 、 $\sigma_x=\sigma_z=48[\text{S/m}]$ とした。また、擬似等方CFRPを模した解析で 0° 及び 90° 方向シートは直交積層CFRPと同値、 $\pm 45^\circ$ 方向シートについては $\sigma_z=48[\text{S/m}]$ 、 σ_x, σ_y を繊維方向の導電率である $7700[\text{S/m}]$ の $1/\sqrt{2}$ の値とした。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は各方向の導電率を表す。これら導電率は実測値を用いた。なお、実際のCFRPでは、同じ繊維方向であっても繊維配向の不均一性やうねりなどで導電率は均一ではない、また、各シート間の部分接触などによる導電率も均一ではないが、解析では同一シート内の繊維間の導電率と積層方向の導電率を均一としている。

4.4 有限要素法による解析結果

図4.2に織物CFRPを模したモデルの1層目の渦電流分布を示す。図中の円形破線は励磁コイルを示す。励磁コイルの巻線に沿って渦電流が誘導され、励磁コイルの巻線近傍の渦電流密度が大きいことがわかる。図4.3に直交積層CFRPを模したモデルの 0° 方向シートと 90° 方向シートの渦電流分布を示す。図4.4に擬似等方CFRPを模したモデルの $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 方向シートの渦電流分布を示す。直交積層CFRP及び擬似等方CFRPの各層共に励磁コイル巻線の接線方向で繊維方向に渦電流が分布していることがわかる。各図のスケールバーは、渦電流密度の解析値である。織物CFRPを模した解析での渦電流密度の最大値は $4385[\text{A/m}^2]$ であり、直交積層CFRPを模した解析では $2724[\text{A/m}^2]$ であった。織物CFRPでの渦電流は、直交積層CFRPに比べ最大値で約1.61倍大きい。図4.5に正規化インピーダンスを示す。横軸は正規化抵抗、縦軸は正規化リアクタンスである。図から織物CFRP (Cloth)、擬似等方CFRP (Quasi-isotropic)、直交積層CFRP (Cross-layered)の順で空心時 (“in the air”)からの変化が大きく、正規化インピーダンスが小さくなる。このことから、織物、擬似等方、直交積層CFRPの順で導電率が大きくなるので、織物CFRPが最も渦電流が強く、流れ易いことがわかる。

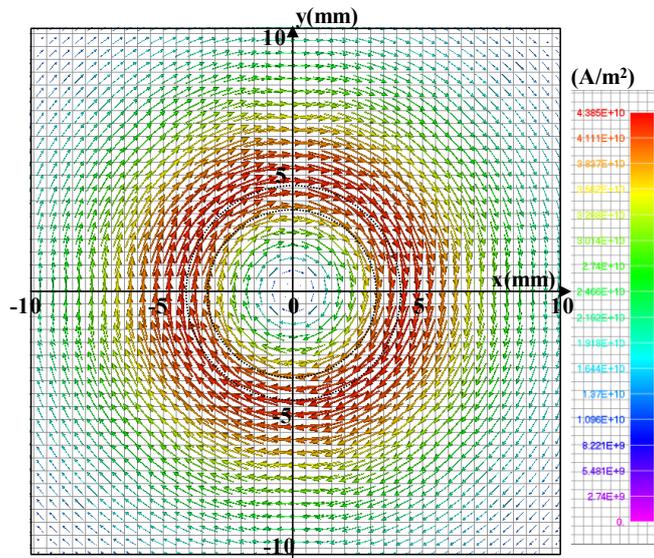
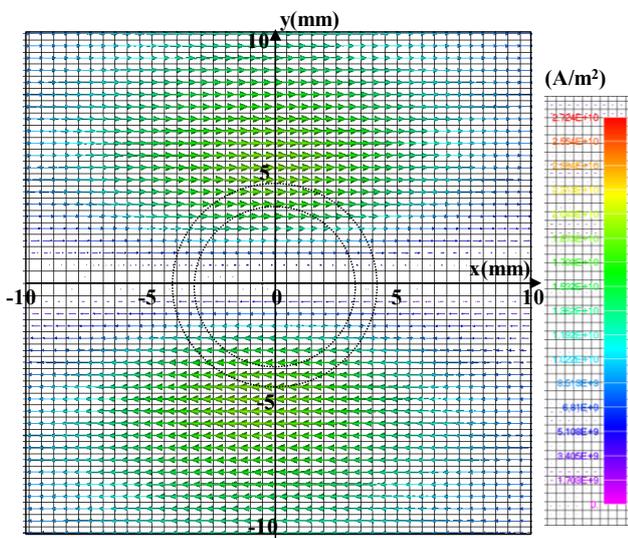
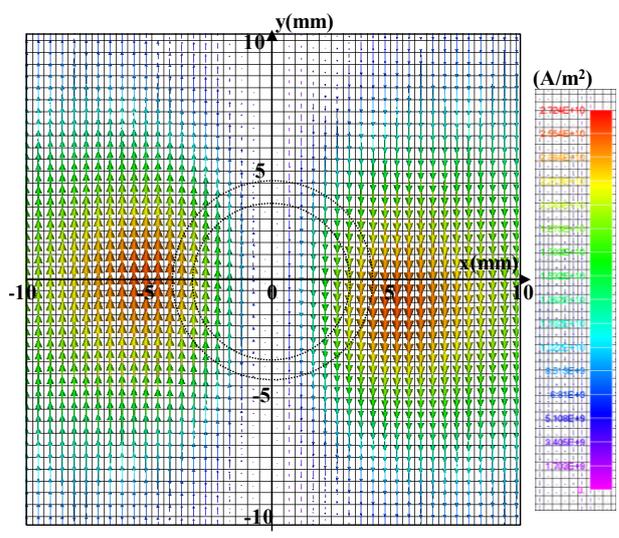


図 4.2 織物 CFRP の渦電流分布
(1 層目)



(a) 0° 方向(1 層目)



(b) 90° 方向(2 層目)

図 4.3 直交積層 CFRP の渦電流分布

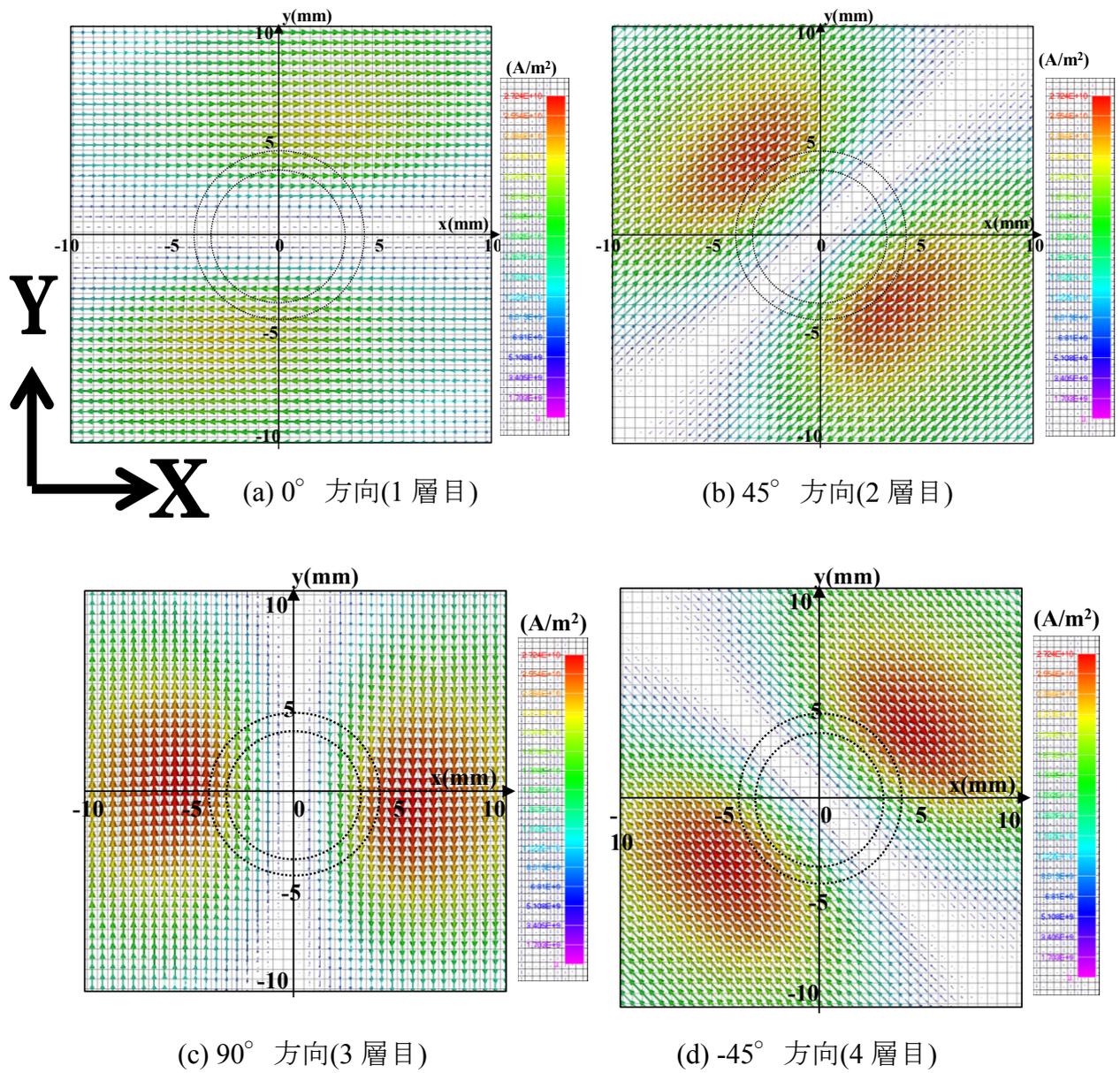


図 4.4 擬似等方 CFRP の渦電流分布

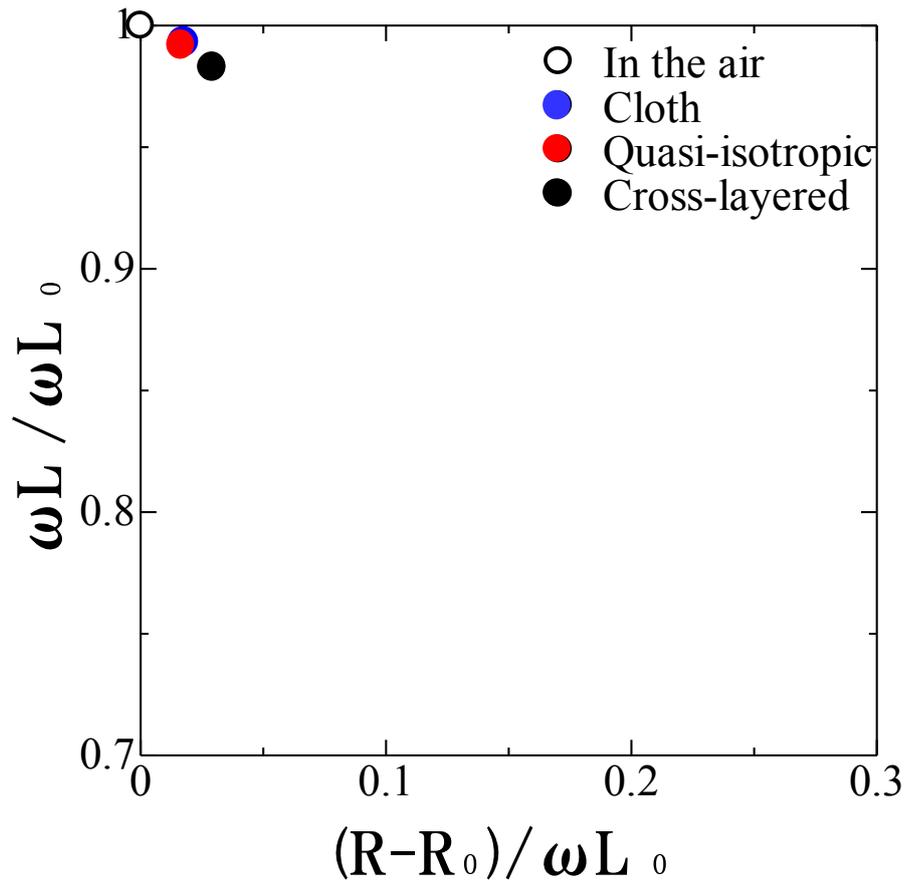


図 4.5 励磁コイルの正規化インピーダンス

ωL : コイルのリアクタンス

ωL_0 : 空心時のコイルのリアクタンス

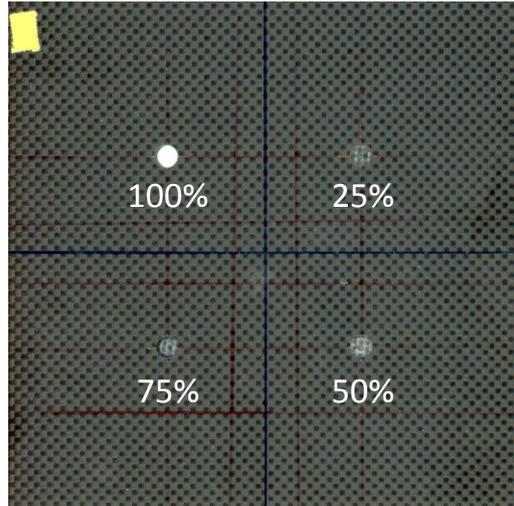
R : 抵抗

R_0 : コイルの巻線抵抗

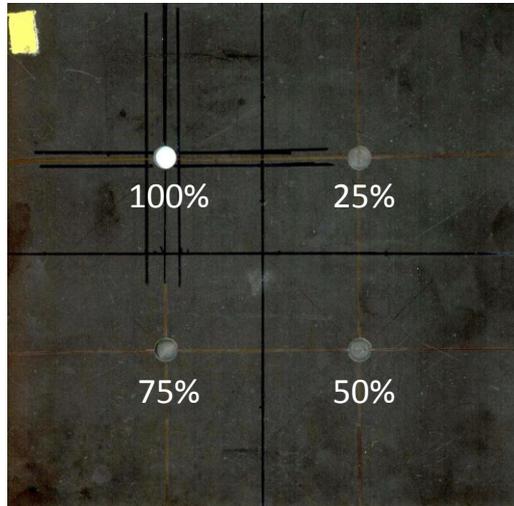
4.5 実験方法

4.5.1 CFRP 試験体

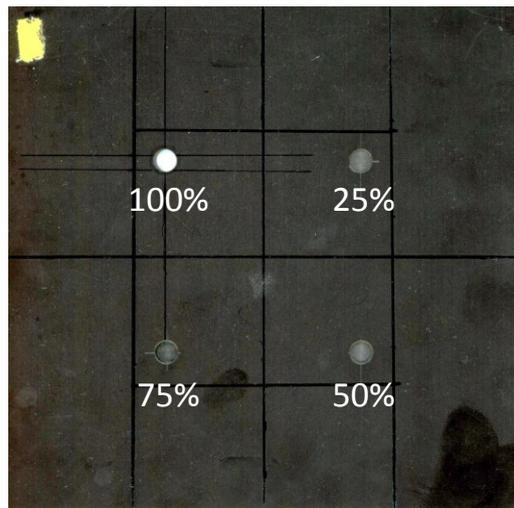
熱硬化性のエポキシ樹脂を含浸させて成形加工した、0.2mm 厚の織物繊維シートを 15 枚積層した厚さ 3mm の織物 CFRP 板と 0.2mm 厚の一方向繊維シートを 45° 毎に 15 枚積層した厚さ 3mm の擬似等方 CFRP 板、90° 毎に 15 枚積層した厚さ 3mm の直交積層 CFRP 板を試験体とした。3 種類の試験体の寸法は縦横 160×160mm である。はじめに、 Θ プローブによる CFRP のきず検出の基礎実験として、既存報告⁹⁾を参考にして人工平底穴(以降は平底穴)を施し模擬きずとした。図 4.6 に平底穴を施した CFRP 試験体の表面図を示す。図中の数字% は試験体の厚さに対するきずの深さである。平底穴の寸法は外径を 7mm とし、板厚に対して深さ 25%, 50%, 75%, 100%とした。次に、試験体上に先端径 3mm の治具を置きその上に重さ 1kg の鉄球を落下させ、鉄球の跳ね返り及び 2 度打ち無く人工的な衝撃きずを作製した。鉄球を落下させる高さを 250mm, 500mm, 750mm, 1000mm としたので、加えたエネルギーは 2.45J, 4.9J, 7.35J, 9.8J と換算できる。図 4.7 に、織物 CFRP に作製した衝撃きずの表面写真を示す。なお、4 つの模擬きず及び衝撃きずの間隔は、上下左右 60mm である。図 4.8 に、きず部の中心を原点とし Y 軸方向のきず部位の板厚面 (YZ 面) の放射線透過画像を示す。今回は、Y 軸方向に切断しているため板厚面は YZ 面のみの観測である。衝撃エネルギーが 2.45J と 4.9J では表面近傍にきずが集中しており、それぞれ表面から 0.23mm、0.7mm 程度進展している。7.35J と 9.8J では裏面まできずが伸展していることがわかる。



(a)織物 CFRP



(b)直交積層 CFRP



(c) 擬似等方 CFRP

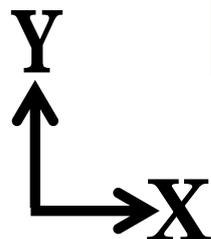
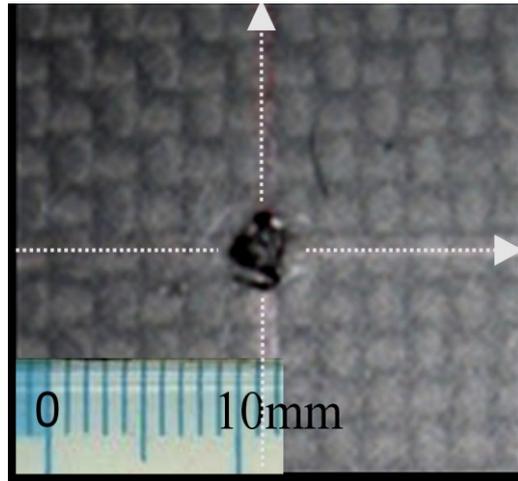
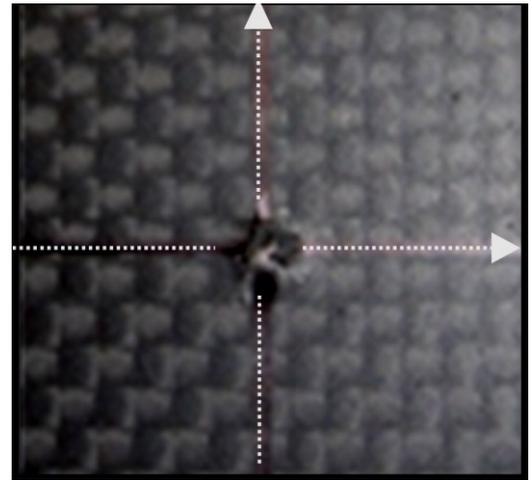


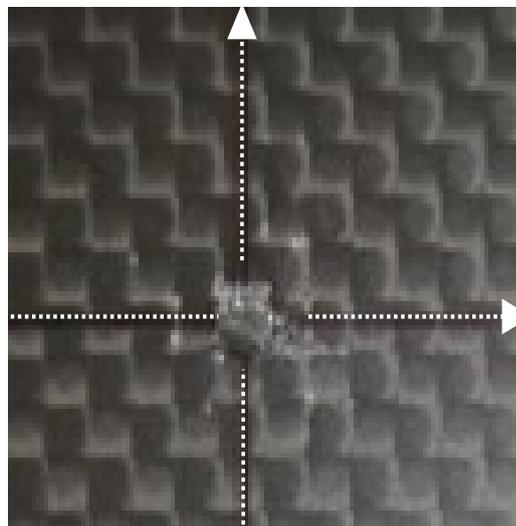
図 4.6 平底穴を施した CFRP の表面図



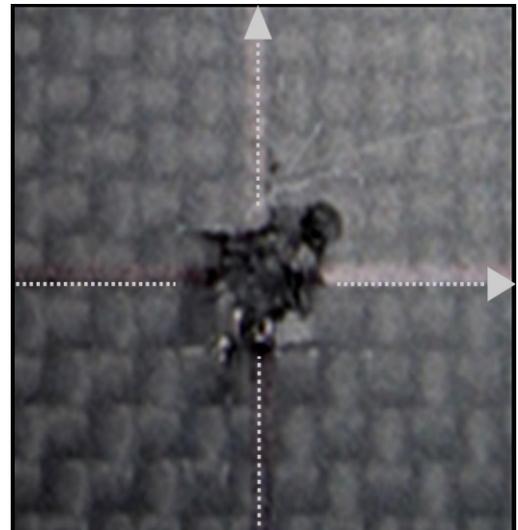
(a) 衝撃エネルギー2.45J



(b) 衝撃エネルギー4.9J



(c) 衝撃エネルギー7.35J



(d) 衝撃エネルギー9.8J

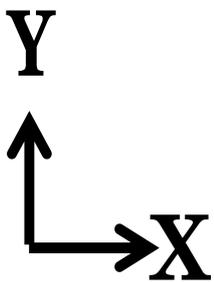
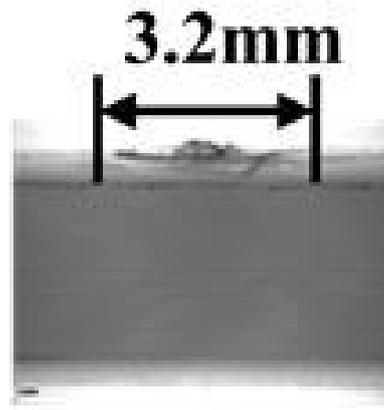
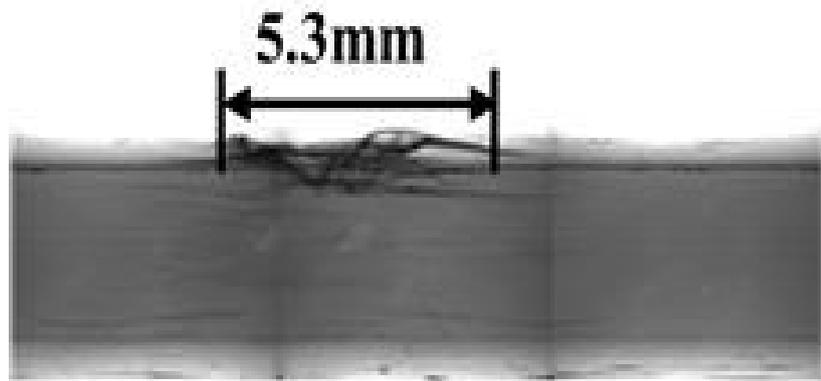


図 4.7 衝撃きずを施した織物 CFRP の表面図



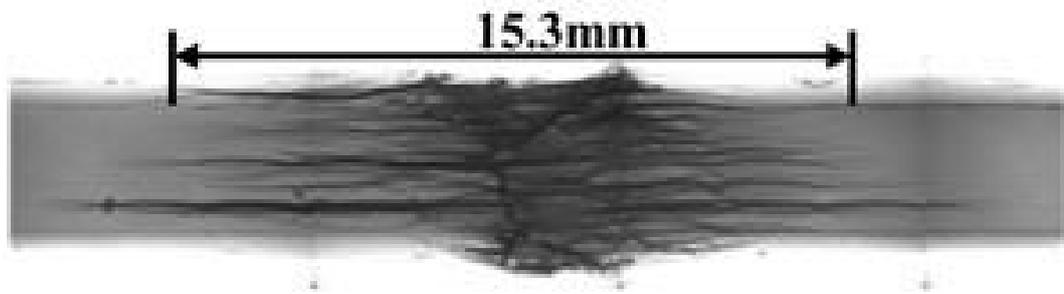
(a) 衝撃エネルギー2.45J



(b) 衝撃エネルギー4.9J



(c) 衝撃エネルギー7.35J



(d) 衝撃エネルギー9.8J

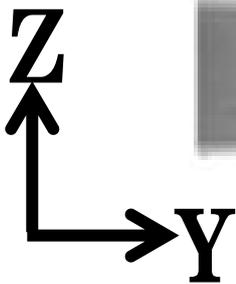


図 4.8 衝撃きずを施した織物 CFRP の断面図

4.5.2 Θプローブの寸法と実験条件及び方法

実験に用いたΘプローブの励磁コイルの寸法は、内径を7mm、外径を9mm、巻き線の太さを0.16mm、巻線断面積を 1mm^2 、巻数を70回とした。検出コイルでは、縦7mm、横7mm、巻き線の太さを0.09mm、巻線断面積を 1mm^2 、巻数を150回とした。

実験条件としてCFRPの導電率が低いので、誘導する渦電流を強くするために周波数を高く設定することとし、実験装置上限の2MHzとした。ΘプローブとCFRP板との距離を0.5mm一定として、プローブを2次元探傷を行った。

試験体の中心からXY軸方向ともに±50mmの範囲で2次元探傷を行う、探傷データは走査間隔0.5mm毎に取得した。なお、検出コイル巻線方向をX軸方向として探傷を行った。また、ΘプローブによるCFRPのきず検出の有効性の比較実験として、Θプローブの励磁コイルを用いて上置プローブによるきず検出も行った。

4.6 実験結果

4.6.1 正規化インピーダンス

有限要素解析によって得られた、織物 CFRP に比べ直交積層 CFRP の渦電流が流れにくく、誘導される渦電流が小さい、との知見を確認するために、各種 CFRP 板に対して Θ プローブの励磁コイルの正規化インピーダンスを試験周波数 2MHz で実測した結果を図 4.9 に示す。横軸は正規化抵抗、縦軸に正規化リアクタンスを示す。織物 CFRP、擬似等方 CFRP、直交積層 CFRP の順で空心時からの変化が大きいことから、織物 CFRP が最も渦電流が流れ易いことが明らかになった。これは、有限要素解析によって得られた知見と一致している。なお、正規化インピーダンスの数値が有限要素解析との結果が異なる。これは、実際の CFRP では、同じ繊維方向であっても繊維配向の不均一性やうねりなどによって導電率は均一ではなく、各シート間の部分接触などによる導電率も均一ではない。しかし、解析では繊維間の導電率と積層方向の導電率を均一としていることが原因で、解析結果と数値が一致しないのだと考えられる。

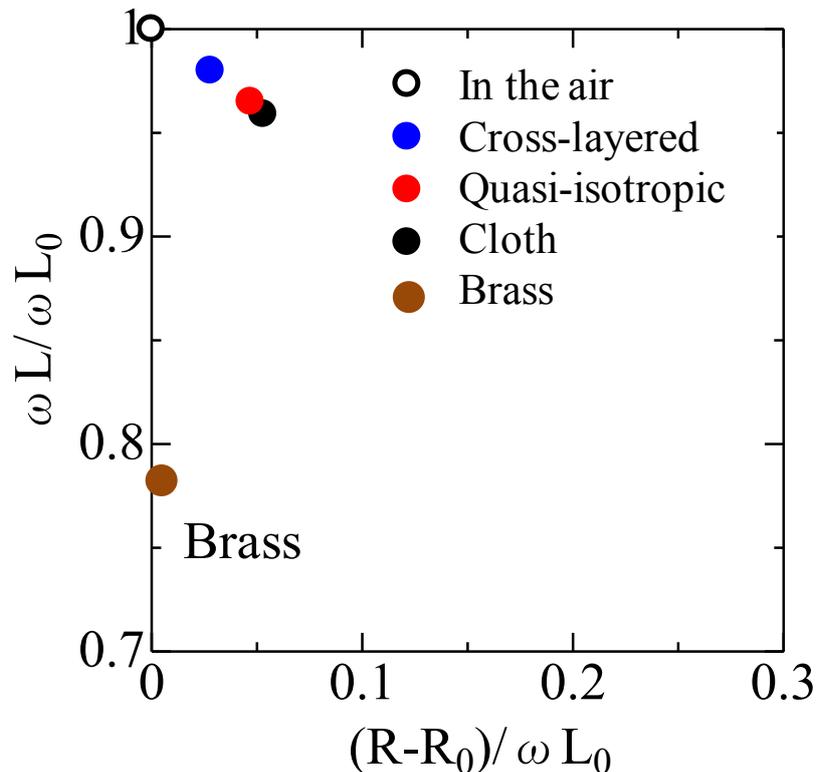


図 4.9 Θ プローブの励磁コイルの正規化インピーダンス

ωL : コイルのリアクタンス

ωL_0 : 空心時のコイルのリアクタンス

R: 抵抗

R_0 : コイルの巻線抵抗

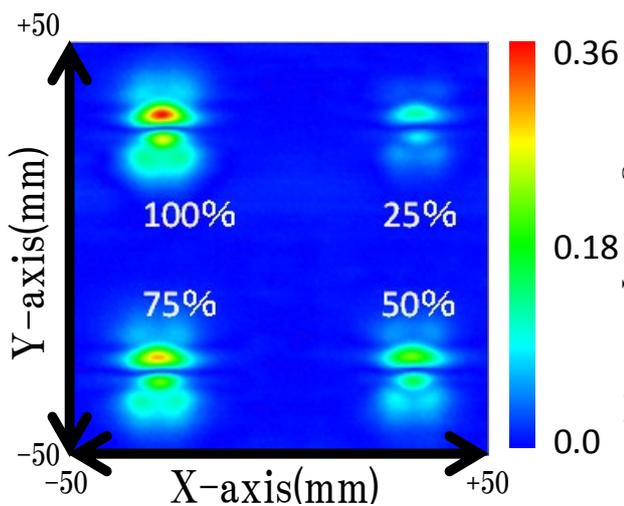
4.6.2 平底穴の検出結果

図 4.10 に深さが異なる平底穴の信号振幅の擬似カラー画像を示す。図中の数字%は平底穴の深さを表す。図 4.10(a)の織物 CFRP においては、雑音が小さく平底穴部位の上下で明瞭なきず信号が発生していることがわかる。図 4.10(b)の直交積層 CFRP においては、平行(0° 方向)に雑音が発生するものの平底穴部位の上下で信号が発生していることがわかる。図 4.10(c)の擬似等方 CFRP においては、検出コイル巻線方向 (X 軸方向) と平行(0° 方向)及び $\pm 45^\circ$ 方向に雑音が発生するが、平底穴部位の上下で信号が発生していることがわかる。なお、織物 CFRP に比べて直交積層及び擬似等方 CFRP の雑音が大きい。これは、直交積層及び擬似等方 CFRP の場合、検出コイルの巻線方向と平行または $\pm 45^\circ$ のシートに流れる渦電流が、繊維配向の不均一性やうねりなどに起因して、検出コイルの巻線方向を軸として非対称な流れを呈し雑音が発生すると考えられる。織物繊維シートの場合には、X 及び Y 方向に導電性を有するので、検出コイル巻線方向を軸としてほぼ対称な渦電流が流れるので、発生する雑音が直交積層及び擬似等方 CFRP と比べて小さくなると考えられる。

図 4.11 に織物 CFRP に対して上置プローブを適用した場合の信号振幅の擬似カラー画像を示す。平底穴部位の周囲できず信号が発生しており、その分布はほぼ上下左右対称になることがわかる。これは、織物繊維シートの場合 X 及び Y 方向に導電性を有するためだと考えられる。また、 Θ プローブの場合と比べ試験体中心部などのきずがない部位(図中黒枠部など)で雑音が発生していることがわかる。

図 4.12 には、図 4.10 の Y 軸方向のきず信号と雑音を複素電圧の平面上に示す。何れの CFRP においても、きず深さに応じた信号振幅と位相が得られる。また、きず信号と雑音の大きさを表 4.1 に示す。表 4.1 より、雑音は織物 CFRP<擬似等方 CFRP<直交積層 CFRP の順で大きく、きず信号は直交積層 CFRP<擬似等方 CFRP<織物 CFRP の順で大きい。織物 CFRP の信号振幅は、直交積層 CFRP の信号振幅の約 1.6 倍と大きく、解析で得られた渦電流密度比にほぼ近い振幅比を示した。解析や正規化インピーダンスなどが示す様に、直交積層 CFRP、擬似等方 CFRP、織物 CFRP の順で渦電流が流れ易く、渦電流密度に応じたきず信号振幅を得た。

図 4.13 には、深さに対する SN 比を示す。なお、図中の黒丸破線は、比較実験として行った従来の上置プローブによる織物 CFRP に対する SN 比を示す。 Θ プローブは、上置プローブより SN 比高くきず検出を行うことが可能である。また、直交積層 CFRP、擬似等方 CFRP、織物 CFRP の順に SN 比が高い。きず深さ 25%以上の平底穴に対して SN 比 2.0 以上で検出できている織物 CFRP や擬似等方 CFRP に対しては、 Θ プローブによる渦電流探傷の有効性が期待できる。



(a) 織物 CFRP

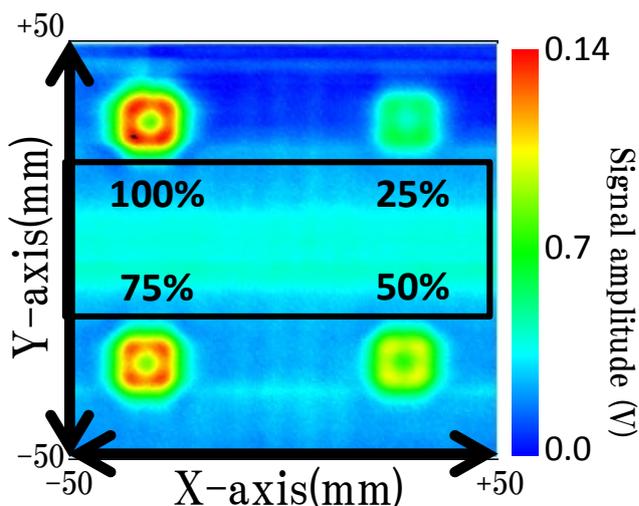
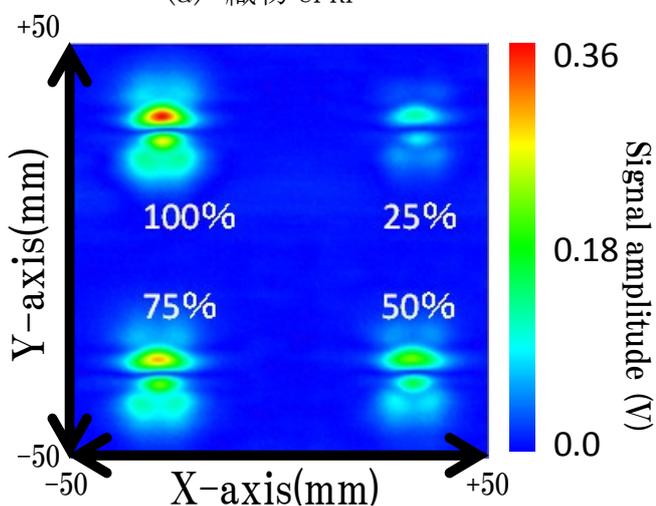
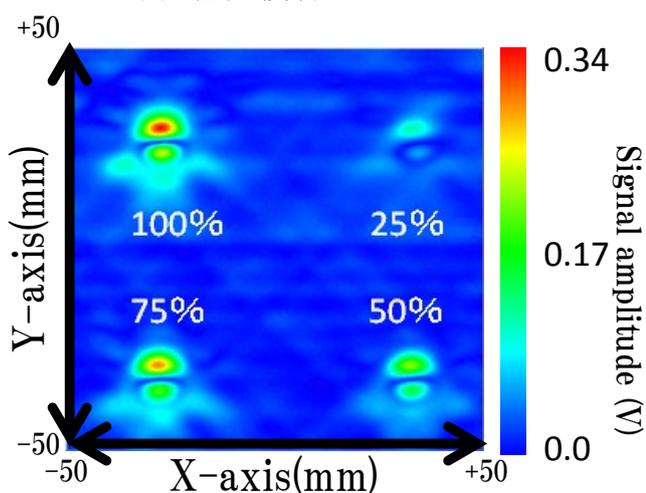


図 4.11 織物 CFRP に施した平底穴の信号振幅の擬似カラー画像(上置プローブ)

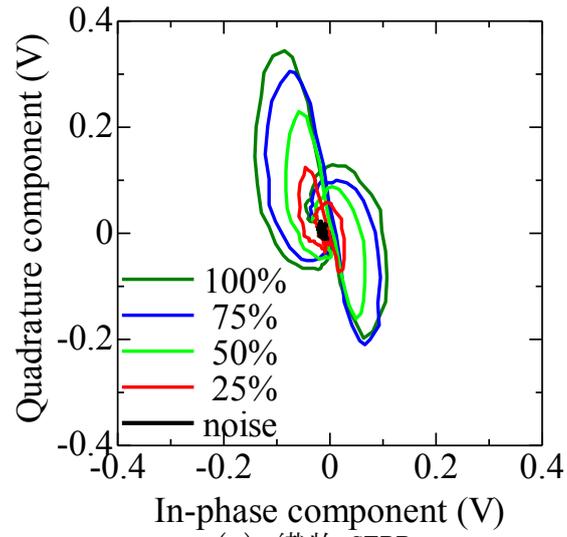


(b) 直交積層 CFRP

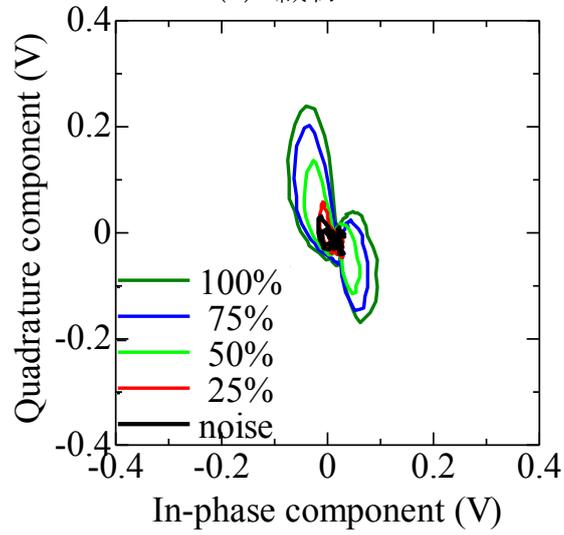


(c) 擬似等方 CFRP

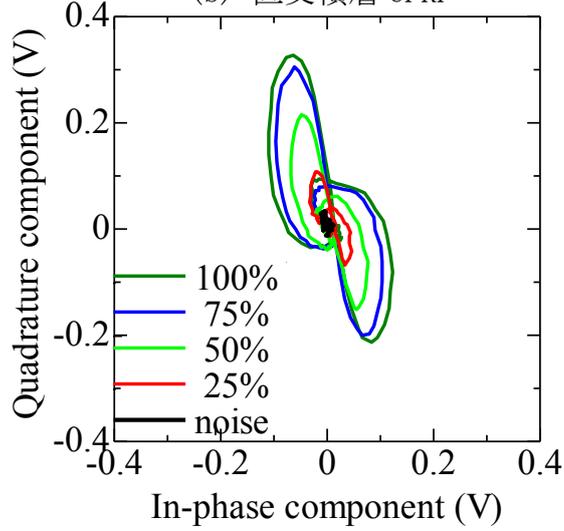
図 4.10 CFRP に施した平底穴の信号振幅の擬似カラー画像(Θ プローブ)



(a) 織物 CFRP



(b) 直交積層 CFRP



(c) 擬似等方 CFRP

図 4.12 CFRP に施した平底穴の
きず信号パターン

表 4.1 平底穴の信号振幅と雑音

CFRP	Noise(V)	Flaw signal amplitude(V)			
		25%	50%	75%	100%
cloth	0.028	0.132	0.245	0.346	0.371
quasi-isotropic	0.034	0.122	0.237	0.314	0.355
cross-layered	0.048	0.049	0.139	0.205	0.221

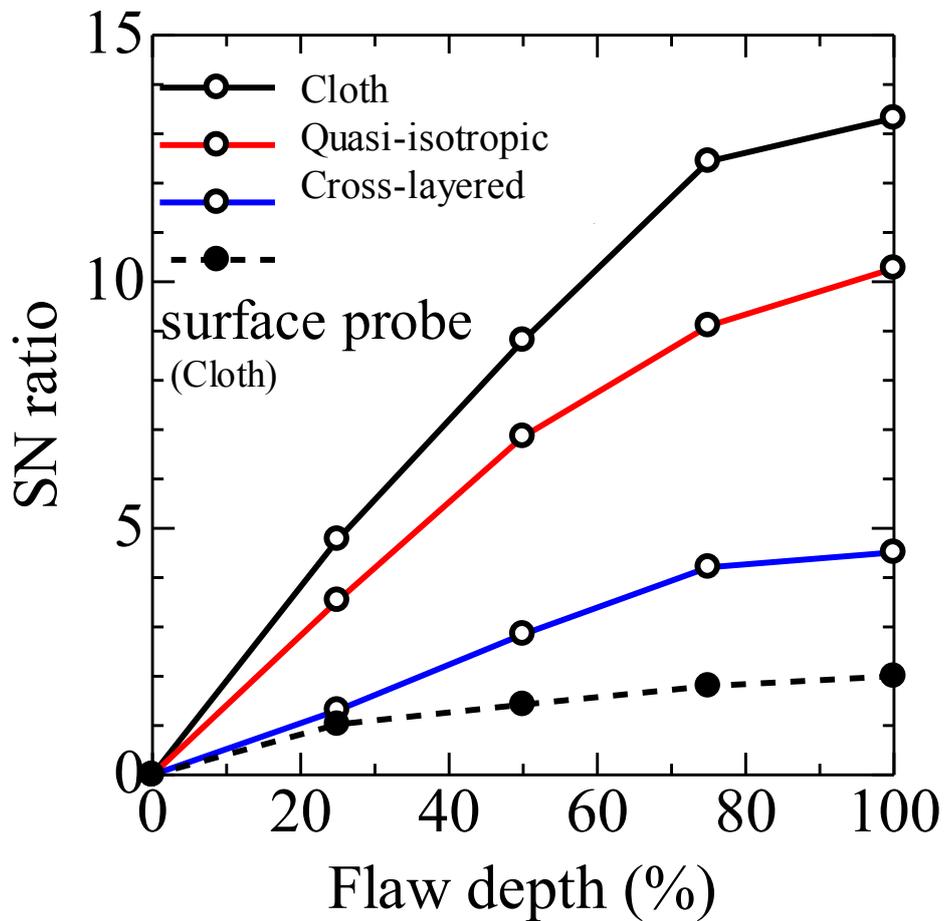


図 4.13 CFRP に施した平底穴のきず深さに対する SN 比

4.6.3 衝撃きずの検出結果

織物 CFRP に対する Θ プローブによる渦電流探傷の有効性を考察するために、衝撃きずの検出を行った。

図 4.14 には衝撃きずの信号振幅の擬似カラー画像を示す。わずかに雑音は発生するものの、平底穴同様きずの上下で信号が得られており、きず部位に明瞭な信号が得られた。なお、2.45J については他と比べると信号が小さい、これはきずの深さが浅いことが原因である。図 4.15 に、図 4.14 の信号振幅が最大となる点を通る Y 軸方向(図 4.14(d)白矢印の位置)のきず信号パターンを示す。また、表 4.2 に雑音の大きさ及びきず信号の振幅と SN 比を示す。衝撃エネルギーが大きくなるほど信号パターンが大きくなることがわかる。なお、2.45J については、きずの深さが浅いためか、4.9J 以上の衝撃きずと比べて S/N が小さいが、SN 比は約 1.9 以上あり、衝撃によるきずを検出可能であることを示す。

衝撃エネルギーが大きくなるにつれてきず信号が大きくなることが明らかになった。そこで、衝撃エネルギーときず信号の相関について検討を行った。検討を行う際に、初めに検出信号領域を求めた。検出信号領域は図 4.16 に示す、X 軸方向のきず信号の幅 l_{xm} と Y 軸方向のきず信号の幅 l_{ym} の積と定義した。なお、 l_{xm} と l_{ym} は信号振幅の最大値から 12dB 低下した信号振幅が得られる X 及び Y 軸方向のプローブ位置間の距離である。図 4.17 に衝撃エネルギーに対する正規化検出信号領域を示す。衝撃エネルギーが大きくなると検出信号領域が広くなることがわかる。また、衝撃エネルギー 4.9J を境に、それ以下であれば領域が狭く、以上であれば領域が広いことがわかる。この結果は、図 4.8 に示した放射線透過試験によって得られた断面図の、衝撃エネルギーが 4.9J 以下の場合きずが表層に集中しており表面きずも小さい、7.35J 以上の場合きずが裏面まで進展しており、表面きずも大きいという傾向と一致している。したがって、衝撃エネルギーが大きくなるときずが大きくなるので、きず信号も大きくなる。

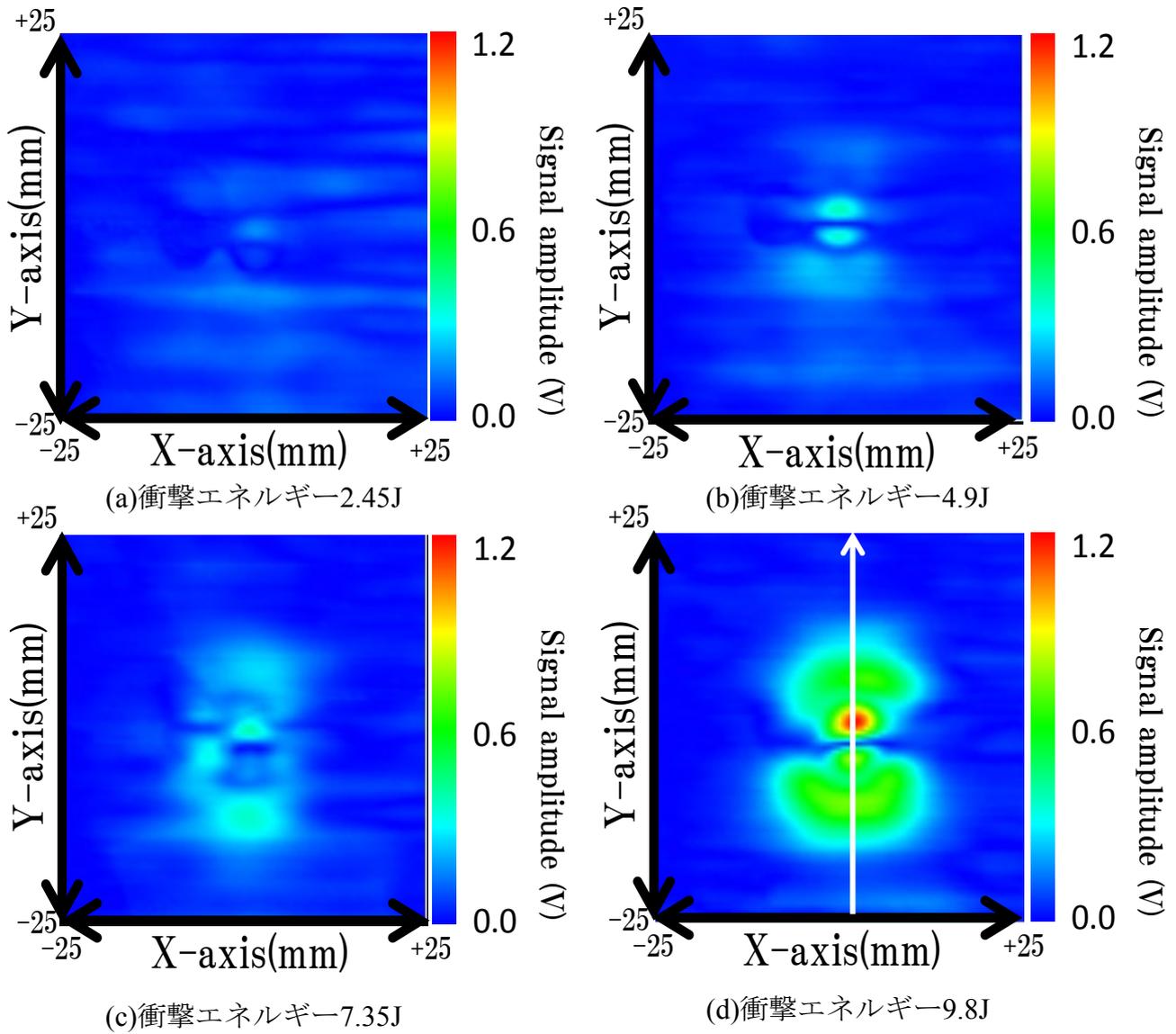


図 4.14 衝撃きずの信号振幅の擬似カラー画像

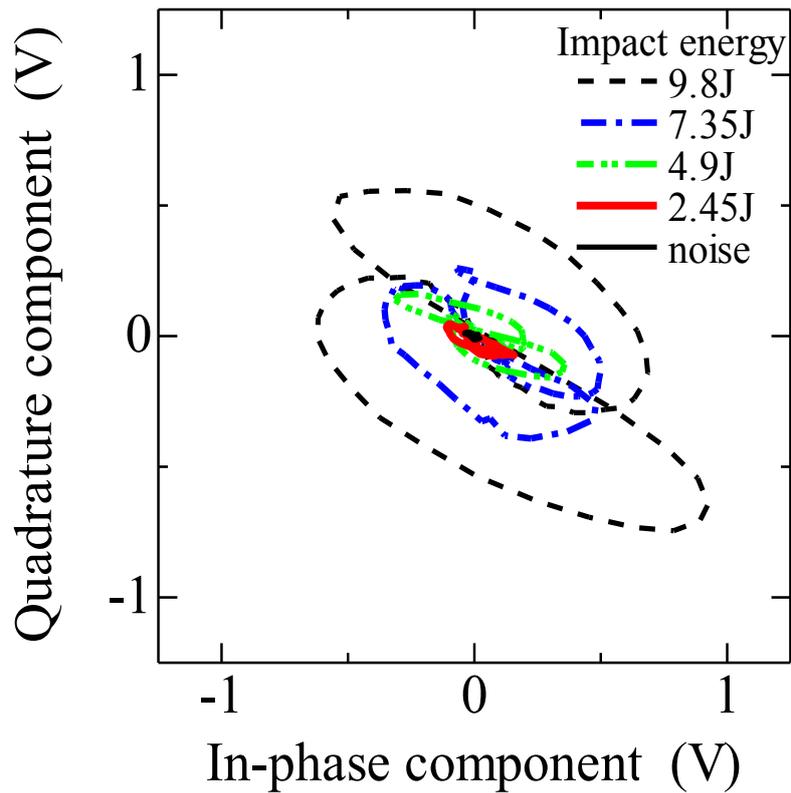


図 4.15 織物 CFRP に施した
衝撃きずの信号パターン

表 4.2 衝撃きずの信号振幅と SN 比

Noise(V)	Flaw signal amplitude(V) (SNratio)			
	2.45J	4.9J	7.35J	9.8J
0.082	0.153 (1.87)	0.365 (4.45)	0.471 (5.74)	0.941 (11.48)

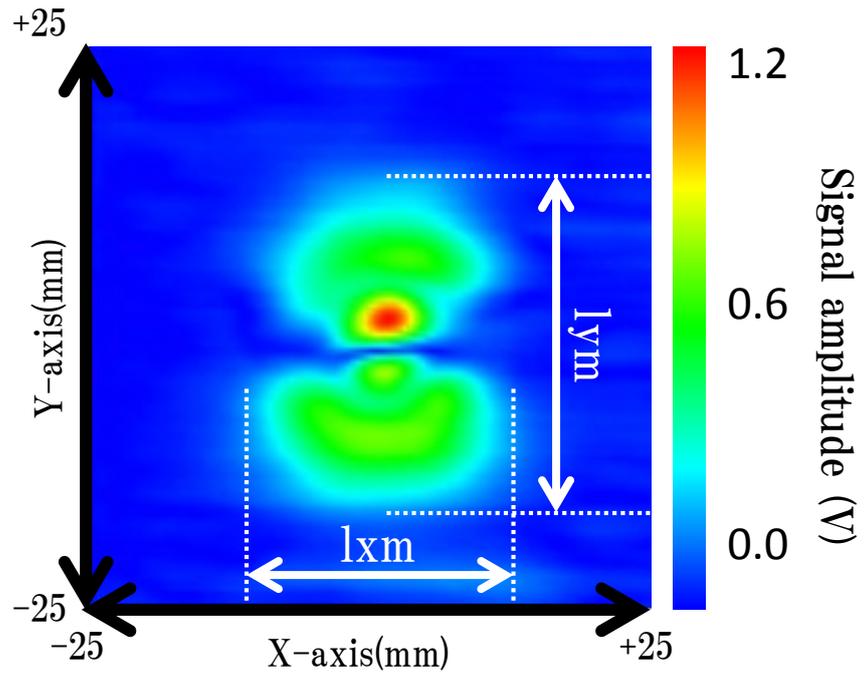


図 4.16 衝撃きずの信号振幅の擬似カラー画像
(衝撃エネルギー9.8J)

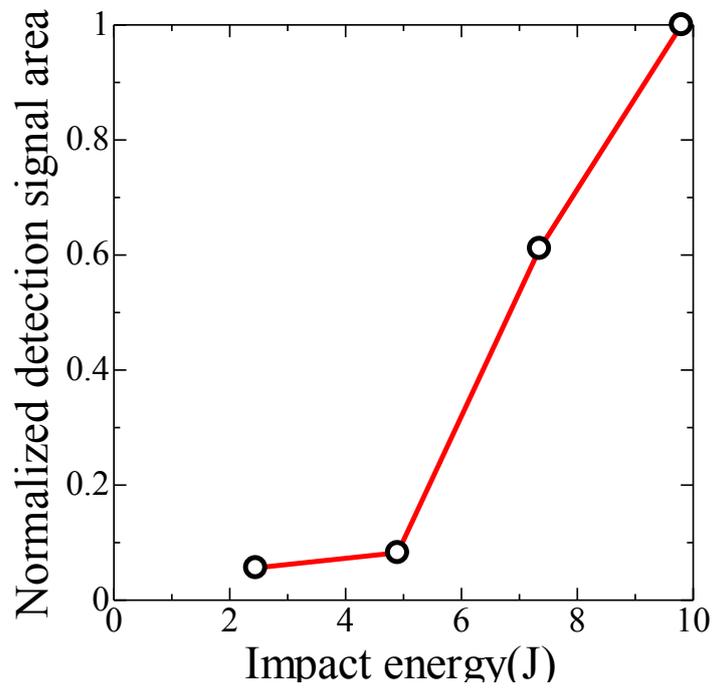


図 4.17 衝撃エネルギーに対する正規化検出信号領域

4.7 まとめ

有限要素解析によって CFRP に誘導される渦電流分布の検討を行い、得られた知見を基に Θ プローブを適用したきず検出を行った。以下にその結果を示す。

- 1) 有限要素解析によって渦電流分布の検討を行った。織物 CFRP の場合、励磁コイルの巻線に沿って渦電流が誘導され、他の CFRP に比べ渦電流が流れ易い。擬似等方 CFRP や直交積層 CFRP では、渦電流がシート面内において繊維方向に強く流れる。また、積層間にわたってループ形成される。その渦電流の密度は織物 CFRP に比べ小さいことを明らかにした。
- 2) 織物 CFRP では、繊維配向の不均一性やうねりなどに起因する雑音が小さく SN 比高ききず検出が可能である。擬似等方 CFRP では、繊維配向の不均一性やうねりなどに起因する雑音が発生するものの直径 7mm、深さ 25%以上であれば SN 比 2.0 以上を確保したきず検出が可能である。一方、直交積層 CFRP では、雑音が大きいが深さを有するきずであれば SN 比を保って検出可能である。
- 3) 織物 CFRP に施した衝撃きずの検出を行った結果、衝撃エネルギーが 2.45J 以上の人工的な衝撃きずを SN 比約 1.9 以上で検出でき、織物 CFRP に対する Θ プローブによる渦電流探傷が有効であることを示した。

以上のように、3 種類の CFRP 板に対して Θ プローブを適用することで、平底穴のきず検出が可能である。また、織物 CFRP であれば衝撃きずの検出も有効である。

今後、試験周波数やプローブ寸法などの検出特性への影響の検討などを行う予定である。また、擬似等方 CFRP に対する実損傷を模した衝撃きずの検出性の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) T.Sakagami and K.Ogura : New Flaw Inspection Technique Based on Infrared Thermal Images under Joule Effect Heating, JSME Int. Journal, A. 37(4), pp.380-388 (1994)
- 2) 松島正道 : CFRP の超音波探傷評価, 第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.23-26(2007)
- 3) 川島紘一郎, 安藤之人, 高橋雅和, 星野秀和, 小倉幸夫 : 水浸超音波画像と空気伝搬超音波法による複合材の非破壊評価, 第 9 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.27-30(2007)
- 4) 長瀬尚樹, 西川康博, 福島清 : 超音波による CFRP の欠陥評価, 第 10 回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, pp.1-4(2007)
- 5) J-R.Lee, J.Takatsubo, N. Toyama and D-H.Kang : Health Monitoring of Complex Curved Structure using an Ultrasonic Wavefield Propagation Imaging System, Measurement Science and Technology, 18, pp.3816-3824 (2007)
- 6) A.Yoshimura, R.Hosoya, J.Koyanagi and T.Ogasawara : X-ray Computed Tomography used to Measure Fiber Orientation in CFRP Laminates, Advanced Composite Materials, 25(1), pp.19-30 (2016)
- 7) A.R. Valleau : Eddy Current Nondestructive Testing of Graphite Composite Material, Materials Evaluation, 48(2), p.230-239 (1990)
- 8) M.P.DE Goeje and K.E.D. Wapenaar : Non-Destructive Inspection of Carbon Fiber-Reinforced Plastics using Eddy Current Methods, COMPOSITES, 23(3), pp.147-157 (1992)
- 9) K.Urabe, A.Saeki and M.Kawakami : Eddy Current Inspection of Fiber Fracture in CFRP, Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium, pp.2147-2152 (1993)
- 10) 小山潔, 星川洋, 小島剛基 : 電磁誘導非破壊試験による CFRP の損傷検出に関する基礎的検討, 第 1 回日本複合材料合同会議講演論文集, JCCM-1 (2010)
- 11) K.Koyama, H.Hoshikawa and G.Kojima : Eddy Current Nondestructive Testing for Carbon Fiber-Reinforced Composites, Journal of Pressure Vessel Technology, 135(4), pp.1-5 (2013)
- 12) 星川洋, 小山潔, 柄澤英之 : リフトオフ雑音の発生しない渦電流探傷試験新型上置プローブに関する研究, 非破壊検査, 50(11), pp.736-742 (2001)
- 13) H.Hoshikawa and K.Koyama : A New Eddy Current Probe with Minimal Liftoff Noise and Phase Information on Discontinuity Depth, Materials Evaluation, 61(3), pp.423-427 (2003)
- 14) R.Lange and G.Mook : Structural Analysis of CFRP using Eddy Current Methods, NDT&E International, 27(5), p.241-248 (1994)
- 15) X.E.Gros and W.Lowden : Electromagnetic Testing of Composite Materials, INSIGHT, 37(4), pp.290-293 (1995)
- 16) J. Cheng, H. Ji, J. Qiu, T. Takagi, T. Uchimoto and N. Hu : Role of Interlaminar Interface on Bulk Conductivity and Electrical Anisotropy of CFRP Laminates Measured by Eddy Current Method, NDT & E International, 68, pp.1-12 (2014)
- 17) K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki and Y. Suzuki : Detection of Delamination in Thermoplastic CFRP Welded Zones using Induction Heating Assisted Eddy Current Testing, NDT & E International, 74, pp.106-111 (2015)

- 18) K.Mizukami, Y. Mizutani, K. Kimura, A. Sato, A. Todoroki, Y. Suzuki and Y. Nakamura : Visualization and Size Estimation of Fiber Waviness in Multidirectional CFRP Laminates using Eddy Current Imaging, Composites : Part A, 90, pp.261-270 (2016)
- 19) 水上孝一, 水谷義弘, 轟章, 鈴木良郎 : 線状電流による炭素繊維強化複合材に誘導される渦電流の解析, 日本複合材料学会誌, 42(3), pp.98-106(2016)
- 20) X. Li, W Yin, Z. Liu, P. J. Withers and A J Peyton : Characterization of Carbon Fiber Reinforced Composite by Means of Non-Destructive Eddy Current Testing and FEM Modeling, Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing, pp.1-6 (2008)
- 21) 坪井始, 内藤督 : 実践数値電磁界解析法, 養賢堂, p.57 (1995)

第五章 総括

本研究ではステンレス鋼材及び炭素繊維複合材に対して、渦電流探傷上置プローブを適用したきずの検出と評価精度向上を指向した研究をまとめた。はじめに、EDM きずに対して、従来形の円形上置プローブと、原理的にリフトオフ雑音が発生しない新形の上置プローブである Θ プローブを適用した渦電流探傷試験を行い、きず検出特性の比較・検討を行い、 Θ プローブの優位性を明らかにした。次に、EDM きずから得られたきず信号からきずの評価方法の検討提案を行い、得られた知見に基づき、ステンレス鋼材における SCC と TFC の検出と評価を行った。また、炭素繊維複合材料である CFRP 板に誘導される渦電流分布を有限要素解析によって明らかにしたうえで、CFRP 板に施した平底穴と衝撃きずの検出を行い、 Θ プローブの有効性を明らかにした。本研究の結果以下のことが明らかになった。

5.1 上置プローブによる渦電流探傷試験

第二章では Θ プローブと従来の自己誘導形の円形上置プローブを適用し、きず検出特性の比較・検討を行った。

- 1) 従来の自己誘導形の円形上置プローブの場合、きず信号の大きさに対する雑音が大きく、SN 比が低い。また、雑音の影響できず信号の振幅と位相が安定しないので、きずの深さ評価への利用が困難である。
- 2) Θ プローブの場合、従来の円形上置プローブと比べて雑音が小さく、SN 比高く、信頼性の高いきず検出が可能である。また、表面きずの場合には、きずが深くなるときず信号パターンが遅れる。
- 3) Θ プローブの場合、きず信号が安定しているので、信号の振幅を評価に利用が可能である。また、きず信号パターンも安定しているので、パターンの傾きを利用したきず深さの評価が期待できる。

5.2 Θ プローブによるステンレス鋼材における SCC 及び TFC の検出及び評価方法の検討

第三章では、EDM きずに対して Θ プローブを適用したきず検出を行い、基礎的なきず検出特性ときずの深さおよび長さの評価方法の検討を行った。得られた知見を基に SCC および TFC に対して、 Θ プローブを適用した検出および評価を行った。

5.2.1 Θ プローブを適用した EDM きずの検出と評価方法の検討

- 1) ステンレス鋼材に施した EDM きずに対して、 Θ プローブを適用した場合、S/N 高く明瞭にきずの検出が行うことが可能である。
- 2) きず信号の位相は、きずの幅や角度 ($\pm 10^\circ$ 以内) の影響はほとんど受けず、きずが深くなると信号位相が遅れる。また、励磁コイルの外径 9mm に対して、きずの形状と深さが同じであっても、きずの長さが 25mm に対して 15,10mm と短くなると、信号位相が進む。また、きず形状がお椀型の場合、同寸法の矩形型と比べて僅かに信号位相が進むこ

とが明らかになった。

- 3) 信号位相はきずの長さの影響を受けるので、補正曲線を適用して、信号位相から長さの影響を補正する必要がある。そこで、今回新たに 12dB 法によるきず長さの評価方法を提案し、きずの長さ評価を行った。EDM きずの場合、励磁コイルの外径に対してきずの長さが 10mm の場合+12%の範囲で評価が可能であり、きずの長さが 15mm 以上であれば $\pm 7\%$ の範囲で評価可能である。
- 4) きずの長さや形状の影響を補正した信号位相によってきず深さの評価を行った結果、検定曲線と比較して $\pm 0.5\%$ の範囲で評価が可能であり、きず長さが 10mm の場合、+2.5% の範囲で評価が可能である。

5.2.2 Θ プローブを適用した TFC の検出と評価

- 1) TFC に対しても、SN 比高く、明瞭にきずの検出が可能である。
- 2) 12dB 法によって TFC の長さ評価を行った結果、浸透探傷試験によって得られた TFC の長さに対して評価したきず長さは、励磁コイルの外径(9mm)に対してきずの長さが 11.7mm の場合+20%で評価可能であり、きずの長さが 14.4mm 以上であれば+7%の範囲で評価可能である。
- 3) きずの長さや形状の影響を補正して、TFC の深さ評価を行うと、検定曲線に対して $\pm 2.5\%$ の範囲で評価可能である。したがって、 Θ プローブを用いることできず深さの推定が期待できる。なお、定量的な評価は困難である。

5.2.3 Θ プローブを適用した SCC の検出と評価及び有限要素解析を利用した検討

- 1) SCC に対しても、SN 比高く、明瞭にきずの検出が可能である
- 2) 12dB 法によって SCC の長さ評価を行った結果、実際のきず長さに対する評価したきず長さは、SCC1,2 については精度高く評価が行えているが、SCC3,4 については評価精度が低く、SCC3 は-45%で評価された。評価性が低下する原因については現在検討中である。
- 3) 補正前の最大きず深さに対する信号位相のばらつきが大きいので、補正後の信号位相も検定曲線に対するばらつきが大きく、深さ評価は困難である。
- 4) SCC の信号位相がばらつく一因を有限要素解析によって明らかにした。その結果、きずの断面接触やきずが複数隣接していることが信号位相に影響を与える一因であることを明らかにした。

5.3 炭素繊維複合材のきず検出

第四章では有限要素法によって CFRP に誘導される渦電流分布の検討を行い、得られた知見を基に Θ プローブを適用したきず検出を行った。

- 1) 有限要素解析によって渦電流分布の検討を行った。織物 CFRP の場合、励磁コイルの巻線に沿って渦電流が誘導され、他の CFRP に比べ渦電流が流れ易い。擬似等方 CFRP や直交積層 CFRP では、渦電流がシート面内において繊維方向に強く流れる。また、積層

間にわたってループ形成される。その渦電流の密度は織物 CFRP に比べ小さいことを明らかにした。

- 2) 織物 CFRP では、繊維配向の不均一性やうねりなどに起因する雑音が小さく SN 比高くきず検出が可能である。擬似等方 CFRP では、繊維配向の不均一性やうねりなどに起因する雑音が発生するものの直径 7mm、深さ 25%以上であれば SN 比 2.0 以上を確保したきず検出が可能である。一方、直交積層 CFRP では、雑音が大きいが深さを有するきずであれば SN 比を保った検出可能である。
- 3) 織物 CFRP に施した衝撃きずの検出を行った結果、衝撃エネルギーが 2.45J 以上の人工的な衝撃きずを SN 比約 1.9 以上で検出でき、織物 CFRP に対する Θ プローブによる渦電流探傷が有効であることを示した。

5.4 本研究で得られた知見

- 1) プラント構造物で発生する事例がある、応力腐食割れ及び熱疲労割れの検出に Θ プローブが有効である。
- 2) 熱疲労割れについてはきずの長さや深さの推定が期待できる。
- 3) 織物 CFRP、直交積層 CFRP 及び疑似等方 CFRP 板の表面きずの検出に Θ プローブが有効であり、織物 CFRP 板については衝撃きずの検出も可能である。

謝辞

「上置プローブを用いた渦電流探傷試験によるステンレス鋼材及び炭素繊維複合材のきず検出と評価に関する研究」は私が 日本大学大学院生産工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。本論文を作成するにあたり、多くの方々の協力、ご助言のおかげで無事書き上げられましたので、ここで感謝の気持ちを述べたいと思います。

日本大学生産工学部電気電子工学科教授・小山先生には指導教授として博士前期課程より7年間にわたり本研究の実施の機会を与えて戴きました。その遂行にあたって終始、不出来な私を懇切丁寧に根気強くご指導をいただきました。また、本論文作成時にも細部にわたり御指導および御助言いただき深謝いたします。

日本大学生産工学部電気電子工学科教授・小井戸先生、並びに日本大学生産工学部電気電子工学科教授・中西先生には副査としてご助言を戴くとともに本論文の細部にわたりご指導を戴き深謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、実験にご協力いただいた、平成 22 年度修了生 三木 健司、平成 23 年度卒業生 胡桃坂 真樹、平成 28 年度卒業生 玉田 修平、平成 28 年度卒業生 早津 大輔、ならびに平成 30 年度卒業生 鳥海 純一に深く感謝いたします。また、平成 23 年度、平成 24 年度、平成 25 年度、平成 26 年度、平成 27 年度、平成 28 年度、平成 29 年度、平成 30 年度の卒業研究生の皆様にも心より感謝いたします。

最後に、11 年間の学生生活をあらゆる面でご支援してくださいました両親ならびに親近の皆様にも心より感謝する次第であります。