

磁気探傷法への信号処理の応用と
きず評価システムの開発

2005年8月

横浜国立大学附属図書館



11620190

湯 旭

寄贈者：楊旭

11620190
磁気探傷法への信号処理の応用とき
ず評価システムの開発

3.17.5
10

磁気探傷法への信号処理の応用と きず評価システムの開発

2005年6月

楊 旭

横浜国立大学附属図書館



11620190

目 次

第1章 緒論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 石油タンクの構造と安全管理	3
1.3 非破壊検査技術	4
1.3.1 非破壊検査(NDI)と非破壊評価(NDE).....	4
1.3.2 非破壊検査技術と磁気探傷法	5
1.4 漏洩磁束探傷法	7
1.4.1 漏洩磁束探傷法の基本	7
1.4.1.1 磁気探傷法の分類	7
1.4.1.2 きず信号の検出	8
1.4.1.3 磁化システム	9
1.4.1.4 信号の A-D 変換	10
1.4.2 漏洩磁界の解析方法	11
1.4.2.1 有限要素法による漏洩磁束密度の解析.....	12
1.4.2.2 磁気双極子モデル	13
1.4.2.3 表面下に存在するきずの漏洩磁界の解析.....	14
1.4.3 Far-side 漏洩磁束探傷法の概要	16
1.5 デジタル信号処理	17
1.5.1 ノイズの発生と信号処理フィルタ.....	17
1.5.1.1 ノイズの発生	17
1.5.1.2 時間平均と集合平均	18
1.5.1.3 平均値フィルタ	18
1.5.1.4 メディアンフィルタ	19
1.5.2 デジタル信号処理の概念	20
1.5.3 離散時間信号と高速フーリエ変換.....	20
1.5.4 ウェーブレット解析	22
1.6 きずの定量的評価手法	25

1.7	ニューラルネットワーク	26
1.8	本研究の目的と構成	28
	第1章の参考文献	
第2章	差分方式の信号処理法による裏面きずの簡易的評価	41
2.1	第2章の概要	41
2.2	Far-side 漏洩磁束探傷システムの概要	41
2.2.1	試験片と実験方法	41
2.2.2	実験結果及び考察	42
2.2.3	永久磁石磁化器の検討	43
2.3	差分方式の信号処理方法の検討	44
2.3.1	差分方式の信号処理方法	44
2.3.2	信号雑音処理	45
2.3.3	円形、矩形きずの評価	45
2.3.4	角度を有するきずの評価	46
2.4	信号処理によるきず信号検出感度の向上	47
2.5	第2章の結論	48
	第2章の参考文献	
第3章	ウェーブレット解析法によるきず検出精度の向上	67
3.1	第3章の概要	67
3.2	有限要素法による磁場解析	67
3.3	探傷システムの改良	69
3.3.1	採用した探傷システムと試験片	69
3.3.2	実験方法及び実験結果	70
3.4	ウェーブレット解析法を用いた信号処理手法の検討	71
3.5	きずの定量的評価	73
3.5.1	人工きずの評価	73
3.5.2	実腐食への適用	74
3.6	第3章の結論	76
	第3章の参考文献	
第4章	磁気補助材を利用したきず信号の増幅	97
4.1	第4章の概要	97
4.2	磁気補助材のきず信号増幅効果	97
4.3	有限要素法による最適な磁気補助材の検討	98
4.3.1	有限要素法における解析モデル	98
4.3.2	解析結果及び考察	99

4.4	実験による最適な磁気補助材の検討.....	100
4.4.1	試験片及び実験方法.....	100
4.4.2	実験結果及び考察.....	101
4.5	第4章の結論.....	102
	第4章の参考文献	
第5章	ニューラルネットワークを用いたきずの定量的評価.....	117
5.1	第5章の概要.....	117
5.2	NNによるきずの定量的評価.....	117
5.2.1	NNに入力する実験データ.....	118
5.2.2	本研究でのNNの構成と学習.....	119
5.2.3	NNによる棒状試験片のきずの定量的評価.....	120
5.3	異なる検査システム及び検査対象物への適用.....	120
5.4	NNによる異なる検査条件でのきずの定量的評価.....	121
5.4.1	板状試験片における入力データと ΔB_y の補正.....	121
5.4.2	NNによる板状試験片のきずの定量的評価.....	123
5.5	第5章の結論.....	124
	第5章の参考文献	
第6章	結論.....	135

謝辞

第 1 章

緒論

第 1 章 緒論

1.1 本研究の背景¹⁻²⁾

日本では、石油は一次エネルギーの約 50%を占めており、プラスチックや合成繊維など石油化学製品の原料でもある、重要な資源である。エネルギーの安定供給のため、石油は平底円筒型の石油タンクによって大量に貯蔵されている。これらは、日本全国に広く分布しており、建設後数十年以上経過したものが多く、設計寿命の時期を迎えている。しかし、近年の日本の不況及び経済的状況のため立て替えることが困難であり、補修・修理によって延命を図っているのが実状である。

石油タンクは土壌基礎上に設置されるものが多く、このため、底板は腐食により減肉し易い。これらのタンクは、大量の危険物を貯蔵しているため、腐食や地震により破壊・漏洩が生じると火災や環境汚染などを引き起こす可能性がある。従って、石油タンクを安全且つ効率的に運用するための経済的な保安全管理技術が必要とされ、損傷部位を特定し、そのデータから寿命評価する非破壊検査技術が重要な役割を果たすようになる。

現在、石油タンク底板の腐食管理には超音波板厚計測法が専ら利用されている。超音波法は、測定精度の面で最も優れているが、この方法で得られるデータは離散的な定点データであり、広大なタンク底板に適用する場合、測定点の間隔を大きく取らざるを得ず、局部腐食部の最深部分を見落とす確率が高くなる。そのため、石油タンク底板の内面側からの有効な腐食管理のための非破壊評価システムが必要とされている。

近年、消防危第 93 号(2000 年 8 月 24 日)「特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査法に関する運用について」他関係法令・通達等により、コーティング上から板厚を広範囲に連続的に測定する新技術による検査法が認められつつある。また、消防庁は 2003 年 3 月 28 日付で「連続板厚測定方法による特定屋外貯蔵タンク底部の板厚測定に関する運用について」(消防危第 27

号)を通知した。従来の超音波厚さ計による定点測定、通知済みの超音波連続板厚測定(2002年1月、消防危第17号)とともに、今回新たに盛り込んだ低周波渦流探傷法、漏洩磁束探傷法および磁気飽和渦流探傷法からなる「電磁気法」を横並びで運用することになった。これによって、far-side 漏洩磁束探傷法を実石油タンク底板の検査に適用させることが可能になった。

Far-side 漏洩磁束探傷法(Far-side Magnetic Flux Leakage Testing)は、強磁性の試験体を何らかの手法で直流磁化し、試験体中に磁気的不連続部(きず)が存在すると、磁気抵抗差により一部磁束が外部へ漏洩し、これを適切な磁気センサで計測することによって、きずの位置、形状、サイズを評価する非破壊検査技術である。Far-side 漏洩磁束探傷法は測定速度が速く、連続的かつ二次元的な面データの採取が可能なもので、局部腐食の評価に適している。これを石油タンクの底板裏面腐食検査に適用することにより、検査期間を短縮つまり検査コストを削減でき、漏洩事故率の軽減、寿命予測の精度が向上することも期待でき、研究者らに注目されている³⁻¹²⁾。

最初、far-side 漏洩磁束探傷法はガス、液体を輸送するパイプラインのインライン内部の検査に使われている。この方法では、パイプラインの周りに壁に等間隔でいくつの永久磁石が配置され、パイプラインのセクションを飽和に磁化し、発生する腐食、刻み凹み等による金属の損失を含む欠陥の測定及び評価する有効な手段であった¹³⁻¹⁴⁾。

しかし、本手法を石油タンク底板に適用する場合における詳細な研究例は少なく、かつ直流磁化を用いるため広大なタンク底板は十分磁化されない。このことは腐食きず信号のS/N比を低下させ、腐食検出精度に影響を及ぼすことになる。従って、本手法を石油タンク底板の検査に本格的に実用化するために、適切な探傷条件や探傷装置の選定、開発するとともにきず検出と定量的評価精度の向上策について検討することが必要である。

1.2 石油タンクの構造と安全管理¹⁵⁻¹⁸⁾

数十立方メートルの小容量タンクでは、地上式、地下式、横置き円筒形、縦置き円筒形など各種の形式が採用されているが、容量が大きくなると鋼製の地上式縦置き平底円筒形が大部分を占める。平底円筒形石油タンクは大量の石油貯蔵用として最も一般的なものであり、最大級のタンクの直径は80~100m程度である。石油タンクは鋼製溶接構造であり、薄肉円筒殻の側板、円板形の底板、及び屋根から構成される。底板の外周部、側板直下の底板をアニュラー板と称し、幅1~2mのリング板構造となっており、側板と溶接接合されている。側板の板厚は下段から上段へ階段状に変化し、上段程薄くなる。

底板の最小厚さは、旧法基準で3.2mm以上の鋼板、現行基準でタンク容量が1,000kl以上10,000kl未満の場合9mmで、10,000kl以上の場合12mmと規定されている。アニュラー板は中央部底板より厚くなり、現行基準によると側板板厚の60%以上、12mm~21mmである。

底板は腐食が生じやすく、1997年の基準改正により、10,000kl以上の特定屋外タンク貯蔵所については原則5年毎の開放(保安検査10年毎、内部点検5年毎)、1,000kl以上10,000kl未満の特定屋外タンク貯蔵所については、原則10年毎の開放(内部点検)が義務付けられ、タンク本体の異常の有無が定期的にチェックされ必要に応じ補修を行うようになった。その際底板の補修や取替え、基礎の不等沈下の修正が実施される。また、消防法の改正で1995年1月1日より、10,000kl以上のタンクの開放周期が延長されることになった。

定期保安検査、臨時保安検査及び内部点検に係わる検査、点検項目の内、底板及びアニュラー板共に、超音波厚さ計による定点測定が行われており、設計板厚の80%を越えることが要求される。

1.3 非破壊検査技術¹⁹⁻²⁰⁾

非破壊検査(Nondestructive Inspection)技術は、非破壊評価(Nondestructive Evaluation)、または非破壊試験(Nondestructive Testing)とも呼ばれる。近年、各種の材料やシステムで、微小な損傷も検出できることが要請され、より重要な技術になった。

1.3.1 非破壊検査(NDI)と非破壊評価(NDE)

従来の非破壊検査だけでなく、検査から余寿命評価まで行う定量的非破壊評価(Quantitative NDE)あるいは単に非破壊評価と呼ばれる新しい考え方が1970年代に入って出現した。その背景には1960年代に発展した破壊力学の影響がある。

非破壊検査とは材料の物理的特性による各種の手法で、検査対象物を破壊せずに対象物中の割れ、ボイド、介在物、異方性、剥離などを調べることをいう。破壊しないという条件から、検査対象物をそのまま使用或いは販売できるものと考えられる。一方、検査とは、異常の有無、大きさ、形状及び位置、性状(きず、割れ、ボイド、介在物などの何であるか)について調べることである。また、製品に対して、異常が発見された時、そのまま使用してよいか否かの判定を下さねばならない。このとき、判定するための合否判定基準が必要である。従来までの非破壊検査は検査技術の水準が十分でなかったため、主として異常の有無の検出に止っていた。その原因として、異常の大きさや位置が正確に捕えられなかったことと、製品の使用の可否を判定する明確な基準が無かったためである。

近年、パソコンの低価格化、高性能化は従来のデータ処理方法を一変させた。収集速度の増大と大容量化、デジタル化は、従来オシログラフ上の波形としてしか捉えられなかった測定結果をデジタル化、画像化し、さら

には一連の波形から従来求められなかった各種の情報を読みとれるようになった。このようなコンピュータ技術の発展と多くの周辺技術の進歩を大幅に取り入れることにより非破壊検査技術は近年非常に進展し、検査レベルとして異常の大きさと位置を正確に検出できるようになってきた。一方、検出したきずが材料の強度に及ぼす影響に対して、破壊力学が新たに出現し、繰返し荷重を受けた材料中のきずにき裂が生じ、これが進展する様子を予測し、最終的には部品や部材の寿命(残存寿命)をある程度予想することができるようになった。このように検査技術の進歩と検査合否判定基準の基礎となる学問の出現によって、非破壊検査技術は単なる欠陥検出技術から検査結果の判定も含む非破壊評価法へと進展する可能性が開かれた。

定量的非破壊評価は広い意味では、きずの特性決定のほかに材料や構造の応力状態や材質変化、使用環境条件などの計測技術や破壊のメカニズムの解明に基く破壊評価法の確立なども含む、幅広い、新しい非破壊評価法として理解されている。このような広範囲のコンセプトとなったため、定量的非破壊評価は非破壊検査技術、固体力学、材料科学、電気工学、応用物理、計算機科学などの多くの学問分野に跨る新しい科学技術となった。

非破壊検査から非破壊評価への発想の転換は大きな前進であり、欠陥を強度に及ぼす影響、部品や構造物の残存寿命推定に寄与するため、非破壊検査技術の精度向上による欠陥の位置や大きさなど特徴の定量化が必要とされる。

1.3.2 非破壊検査技術と磁気探傷法

非破壊試験とは単なる欠陥検出手法を意味しており、即ち物理的な原理に基づく各種の試験法のことである。現在、主に利用されている非破壊試験方法には、放射線透過試験(Radiographic Testing)、超音波探傷試験(Ultrasonic Testing)、磁粉探傷試験(Magnetic Particle Testing)、渦流探傷試験(Eddy Current Testing)、浸透探傷試験(Penetrant Testing)等があり、それぞ

れの非破壊検査を利用する目的に応じ、最も適した非破壊試験方法及びその適用方法を選んで実施する必要がある。

一方、磁気探傷法とは、強磁性の被検体を何らかの手法で磁化し、被検体中に磁気的不連続部(きず)が存在すると、その部分の透磁率が急変するため、磁気抵抗差により一部磁束が被検体外部へ漏洩し、不連続部の近くの物体表面に漏洩磁束が生じる。これを幾つかの方法で計測、評価することによって、磁気的不連続部(きず)の位置、形状、サイズを検知する非破壊技術である。

強磁性体の表面または表面付近に欠陥などの不連続部があると、その部分の磁気抵抗が正常な部分に比較して非常に増加するので、磁束が欠陥部の空間に漏洩する。磁化が飽和以下の弱い場合の強磁性体の透磁率は空気の数百倍以上なので、強磁性体中は非常に磁束を通し易い。従って、強磁性体表面に欠陥があっても、磁化の強さが弱い際は、磁束は空間にほとんど漏洩せず欠陥の横や下を迂回して流れる。また、強磁性体の磁化がある程度以上強くなると、透磁率が低くなるので、磁性体内の迂回路の磁気抵抗は徐々に大きくなり、空間に漏洩する磁束も次第に多くなっていく。磁化が飽和点に近くなると、磁性体内の迂回路の磁気抵抗は増大し、欠陥部の空間を貫通して通る回路の磁気抵抗との差が少なくなる。従って、空間に漏洩する磁束は急激に増加し、欠陥のない正常な部分に漏洩する磁束も急増する。また、強磁性体を磁化した場合、漏洩磁束は欠陥部だけにあるのではなく、コイルの中で磁化した強磁性体の両端部や磁石で磁化した場合の鉄心の接触した部分には多くの漏洩磁束が存在するようになる。さらに、飽和磁化以上の強い磁場を与えた場合や、透磁率および断面積の急変部がある場合や、他の強磁性体を接触させた場合にも磁束が漏洩する。

磁気探傷法は他の非破壊検査方法と比べ、探傷手順が比較的簡単で、経済性に優れ、表面開口きずだけでなく、表面近傍に存在するきずにも高感度で検出することができ、かつ高価な測定装置が必要ないという理由で、普及している。特に漏洩磁束探傷法では、きずの存在のみならず、そのサイズを定量的に知ることのできる利点をもつ。さらに、装置、補助材料、検査技術に多くの改良が加えられ、各種の漏洩磁束探傷装置は自動化され

て、検査員の技能によらない客観的な検査結果が得られ生産ラインには欠くことのできないものとなっている。

磁気探傷法の検出感度は、表面に開口したきずに対しては非常に高いが、表面下のきずに対してはきずが内部に存在するほど検出が困難になり、きず検出感度は、試験品の表面状態(表面の粗さ、塗装などの被膜の厚さ)、試験品の磁気特性と有効磁界の強さ、きずの方向と磁化の方向、磁界の波形などに依存し、探傷装置の選定と開発及びきずの定量的評価、きずのサイズと漏洩磁界との関係の解明等種々問題も多い。

1.4 漏洩磁束探傷法

1.4.1 漏洩磁束探傷法の基本

1.4.1.1 磁気探傷法の分類²¹⁾

磁気探傷法を磁化方法により分類すると、軸通電法、電流貫通法、ヨーク法及びコイル法がある。磁化電流の種類は直流と交流がある。漏洩磁束の検出方法により分類すれば、磁粉探傷法、電磁誘導法、磁電変換素子法(磁界測定探傷法)及び磁気テープ法(磁気記録探傷法)などがある。

磁粉探傷法以外は、磁粉を用いず直接あるいは間接的に漏洩磁束を電気信号として取り出して探傷する方法であり、これらの探傷法をまとめて“漏洩磁束探傷法”という。従って、磁気探傷法には大別して、磁粉探傷試験法(Magnetic Particle Testing、MPT)と漏洩磁束探傷試験法(Magnetic Flux Leakage Testing、MFLT)の二つがある。両者は原理的に同一のきず検査技術である。

磁粉探傷法は最も簡単な方法であり、磁化している試験体に強磁性の微

粉末を散布し、それをきず近傍に生じた漏洩磁界に付着させ、きずを磁粉模様として、きずの場所を目視で見つけることができ、きずの存在、長さ、形状等を知ることができる。この際、磁粉模様の幅はきず幅より大きいものとなるので、微細な割れでも検出可能となる。磁粉探傷法は現在、その感度の高さと操作の簡易性により、最も広く普及している。しかし、磁粉探傷法は、きずの存在の有無に関しては非常に優れた検出性を有するが、それ以上の情報(きずの幅、深さ)を得ることはできない。即ち、きずの定量的評価を行うことが不可能である。特にきず深さは、構造物などの強度信頼性・余寿命評価などを支配する破壊力学的因子であるので、構造物の安全性を評価する際にきず深さの情報を得ることが重要となる。また、きず検出に大きく影響する磁粉の適用方法、きず指示の判断などが検査員の技量に依存すること及び、検査工程において探傷の自動化とデータの保存化等に問題がある。

一方、磁粉を用いる代わりに、適当な磁気感応素子(例えばホール素子、磁気抵抗素子、磁気ダイオード)や磁気テープなどを利用して、きずの漏洩磁束の分布と強度を定量的に計測し、これを直接電気信号に変換してきずを評価する方法が漏洩磁束探傷法である。これらの各方法において、漏洩磁束を検出する検出感度、S/N などによって性能が決定し、目的に応じて選択、使用されている。このように、磁気探傷試験法は鋼鉄材料の表面又は表面近傍にあるきずに対し、極めて検出感度が高く、また比較的簡単な方法であることから、一部現場では古くから使用されてきた。

1.4.1.2 きず信号の検出

Fig.1.1 はきず計測を行うためのシステム構成を示したものである。このようなシステムでは、まずきずによる漏洩磁束密度信号をセンサによって取りやすい電気量(アナログ信号)に変換し、検出する。センサから得られた出力信号は一般に微弱かつ現場の測定対象物と装置からのノイズが重畳

しているので、アンプと信号処理フィルタなどが必要である。また、アナログ信号をデジタル信号に変換し、パソコンに取り込み、次に、信号処理を行うことによって、測定信号から可能な限りノイズを除去する。その後、本来のきず情報が強調されるよう信号を変換もしくは加工した後、信号を解析し、きずを推定するものが一般的な定量的非破壊評価システムである。

探傷システムのきず測定及びきず評価の能力は、このシステムに採用されているハードウェアときず信号解析方法に依存する。ハードの選択はきず信号の検出感度に関係し、きず信号の検出及びきず評価精度において最も重要なものである。

1.4.1.3 磁化システム

試験体の磁化状態(磁化の強さと方向)は、磁化条件と測定対象物の材質、形状及び寸法に大きく左右される。従って、試験体の材質、形状及び寸法を考慮して、決定しなければならない。考慮すべき磁化の因子条件は、使用する探傷機器、磁化方法とその探傷部位、探傷器と試験体の相対位置、磁化電流の種類、磁化電流値、通電時間及び探傷有効範囲等である。

試験体材料のきずに対して精度良く測定、解析するために、以下の特徴を持つ磁場が生じる磁化システムが必要である。

- (1) できるだけ試験体材料を飽和磁化させ、きずの部分で磁束を有効に漏れ出させる。
- (2) 試験体材料中に磁束を均等に透過させることによって、漏洩磁束はきずのサイズと直線関係を持つ。
- (3) 漏洩磁束の測定は各部分と比較できるように、試験体材料の長さをわたって、磁束の透過する量は均一であること。

これは、永久磁石か電磁石によって達成することができる。電磁石には試験対象物中の磁束密度をコントロールできるという利点があるが、永久

磁石はそれ自身が磁気エネルギーを保有するため、外部からエネルギーを供給する必要がない。

検査すべき材料の形状は多種であり、これらの形状によっていろいろな方法で実施される。交流は表皮効果のため表面しか磁化しないため、材料の内部及び裏面側のきず検査の場合、直流が適している。また、通電しながら検査する連続法か、磁化を完了してから検査する残留法かによっても異なり、前者は残留磁気の小さな材料に、後者は大きいものに用いられる。

磁化方法には、基本的に軸通電法、直角通電法、プロッド法、電流貫通法、コイル法、磁束貫通法、極間法(ヨーク法)などに分類される。極間法は、試験品の一部または全体を電磁石または永久磁石の磁極間に置いて磁化させる方法で、磁気回路を強磁性体で閉ざすことができるので、反磁界が非常に少なく、効果的に磁化することができる。さらに、探傷面を焼損する危険がない。極間法では、電磁石の鉄心中に誘起した磁束(全磁束)を試験品中に投入することによって試験品を磁化させるので、試験品中の磁束密度は、電磁石の全磁束が多いほど、また試験品中の磁束の広がりがないほど高くなる。電磁石の全磁束は、鉄心材の飽和磁束密度と鉄心の断面積との積で定まり、電磁石のアンペア・ターン(電流の大きさとコイルの巻数)をいくら多くしても増加しない。試験品中の磁束の回路の断面積が鉄心の断面積より大きくなると、鉄心中の磁束は試験品中で広がって、試験品中の磁束密度は低くなり、十分な磁化が得られなくなる。この傾向は直流電磁石を用いた場合に著しい。交流電磁石の場合には表皮効果によって試験品中の磁束が表面に集中し、深さ方向に広がらないため、探傷範囲を表層部に限るならば必要な磁化が得られ易い。

1.4.1.4 信号の A-D 変換

A-D 変換とは連続的な信号をある時間間隔ごとに離散的な信号に変換、アナログ信号をデジタル信号に変化することである。アナログ信号をデ

デジタル信号に変換する際、変換にある時間が必要であるため、ある一定時間間隔ごとにしか変換できない。このような時間間隔をサンプリング時間と呼ぶ。これを短くし高速にサンプリングすることで、元の連続信号に近い形で取り込むことができる。しかし、サンプル速度を速くするとデータ数が膨大になり、その処理に時間が長くなり、必ずしもよくない。逆にサンプリングを長くすぎると、元信号の情報が失われてしまう。

パソコンに信号を取り込む場合、できるだけサンプリング数を少なくし、かつ元のアナログ波形の情報を失わないようにする必要がある。このときの基準を与えるのがサンプリング定理である。

入力波形成分の中での最大周波数を f とし、サンプリング時間間隔を t_s とする。このとき元の波形を再現できるためには、サンプリング時間間隔は、

$$t_s \leq 1/2f \quad (1.1)$$

を満たさなければならない。これは“サンプリング定理”というものである。A-D 変換する際、サンプリング定理を満たすように離散化しないと信号波形が全く違う信号に変換してしまう可能性がある。

また、上式のサンプリング間隔より長い間隔で A-D 変換した場合、 $1/(2t_s)$ より高い周波数 f_k をもつ成分は、 $(f_k - 1/(2t_s))$ の周波数の成分に化け、高い周波数成分が低い周波数成分として現れる。このような現象を Aliasing 現象と呼ぶ。Aliasing 現象を避けるためには、信号の上限の周波数を決め、上限を超える周波数成分を除去するローパスフィルタを施し、そのあとに A-D 変換する必要がある。

1.4.2 漏洩磁界の解析方法

漏洩磁束探傷法は様々な工業製品の品質保証のために広く使用されるようになってきた。その基礎となるものはきずによる漏洩磁界の分布である。漏洩磁界の分布の解析方法としてはいくつかの方法が提案されているが、主

なものとしては有限要素法と磁気双極子モデルによる解析方法がある。また、磁気双極子モデルによる解析は磁界の強さに着目したものであり、有限要素法による解析は磁束密度に着目したものである。

1.4.2.1 有限要素法による漏洩磁束密度の解析

代表される数値解析方法として、有限要素法が広く使用されている²²⁻²⁸⁾。有限要素法は解析領域のミクロな解析が可能で、局所的な磁束の乱れも計算する事ができる。特に、磁束線の分布図等を視覚的に捉えやすく描くことができる特徴がある。さらに、複雑な形状に対しても、適合しやすいなどの特徴があるため、従来の方法で解けられない複雑な場の問題も有限要素法を用いて解析できるようになった。二次元あるいは軸対称な三次元問題の解析には極めて有効である。

電磁場は、以下の Maxwell 方程式によって表される。

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1.5)$$

ここで、 B 、 H 、 D 、 E 、 J はそれぞれ、磁束密度、磁界強度、電束密度、電界強度、電流密度である。また、 ρ は電荷密度である。 B 、 H 、 D 、 E 、 J の間には次の関係がある。

$$B = \mu H \quad (1.6)$$

$$D = \epsilon E \quad (1.7)$$

$$J = \sigma E \quad (1.8)$$

ここで、 μ , ε , σ はそれぞれ透磁率、誘電率、導電率である。

一般的に、静磁界の場合、上述の方程式のうち、変位電流と呼ばれる項（式(1.2)右辺第2項）が無視できるため、次の(1.9)、(1.10)式で変換したのち、いくつかの数学的操作を経て、Maxwell方程式は(1.11)、(1.12)となる。

$$B = \nabla \times A \quad (1.9)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi \quad (1.10)$$

$$\nabla \times \left(\frac{\nabla \times A}{\mu} \right) = \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi \right) \quad (1.11)$$

$$\nabla \cdot \sigma \left(-\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi \right) = 0 \quad (1.12)$$

ここで、 A 、 ϕ はそれぞれ磁気ベクトルポテンシャル、電気スカラーポテンシャルである²⁹⁾。また、有限要素法は、解析領域を三角形、四角形などの単純な形状に分割し、その挙動を変分法に基づいて磁気ベクトルポテンシャルの近似解を求める方法である。

1.4.2.2 磁気双極子モデル

漏洩磁界を数式化するため磁気双極子モデルが提案され、そのモデルに基づいて空間漏洩磁界を表す近似解析解が求められている³⁰⁻³⁵⁾。

Fig.1.2 に示すように x 、 y 平面を材料表面とし、 y 方向に無限長の欠陥を考え、 $(x, 0, z)$ 点の x 方向及び z 方向の磁界を求める。欠陥の幅を $2a$ 、深さを d とする。欠陥には簡単のため、一様密度の磁気双極子が分布するとする。これは材料内を一様な磁束が $B = \mu H$ で通過しており、その一部がきず

により防げられたとき、その面に表われる磁荷量によって双極子ができたものとする、磁界の強さの水平及び垂直成分は下式により与えられる。ただし、 m は単位面積当たりの磁荷量である。

$$H_x = m \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^d du \frac{x-a}{\{(x-a)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} - m \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^d du \frac{x+a}{\{(x+a)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} \quad (1.13)$$

$$= 2m \left(\tan^{-1} \frac{z+d}{x-a} - \tan^{-1} \frac{z}{x-a} - \tan^{-1} \frac{z+d}{x+a} + \tan^{-1} \frac{z}{x+a} \right)$$

$$H_z = m \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^d du \frac{z+u}{\{(x-a)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} - m \int_{-\infty}^{\infty} dy \int_0^d du \frac{z+u}{\{(x+a)^2 + y^2 + (z+u)^2\}^{3/2}} \quad (1.14)$$

$$= m \left\{ \log \frac{(x-a)^2 + (z+d)^2}{(x-a)^2 + z^2} - \log \frac{(x+a)^2 + (z+d)^2}{(x+a)^2 + z^2} \right\}$$

1.4.2.3 表面下に存在するきずの漏洩磁界の解析³⁶⁻⁴⁰⁾

前節までの方法は、表面きずに関するものが多く、表面下きずの漏洩磁界についての研究はまだ十分に進められてない。しかし、当研究グループにより新たに提案された等価線状磁化電流双極子モデルに基づいて近似的に解析できる。

この解析方法は表面下にきずが存在する強磁性体を均一の磁界中に置き、きず表面の境界と材料表面の境界による鏡像の影響を考慮して、きず漏洩磁界を解析的に求める方法である。また、この解析方法の特徴は半径の小さいまたは狭い溝状きずに対して精度が良いだけでなく、従来の球状きずモデルと二重線状双極子モデルによる解析法とは異なり、半径が大きい球状きず及び幅が広い溝状きずにも精度がよい解析ができており、得られた結果は実測値と定性的に一致し、比較的簡単な数式で表現できている。さらに、楕円球状きずに対しても解析し、近似度が高い解析式を導いている。

表面下に埋蔵したきずまたは裏面に開口したきずの表面の漏洩磁界 (far-side 漏洩磁界) について、電流双極子モーメントときず形状との関係を

解明するとともに、2つの境界面(きず表面と強磁性体材料表面)による磁気鏡像係数を解析中に取り入れ、近似度の高い解析解を得ている。

高さ d 、幅 g 、長さが無限大の溝状の裏面開口きずに関する漏洩磁界は、極性が逆な正負二つの無限に長い線状の双極子を溝上部と下部に置き (Fig.1.3 の図 B)、それが作り出す空間磁界とみなして計算できる。材料の表面下に存在し、長さ無限の溝状きずの漏洩磁界問題にもこの双極子モデルを適用し、モデル化できる。すなわち、Fig.1.3 の図 A に示すようにきず高さが d 、幅が g 、きず埋蔵深さが h 、 z 軸(紙面に垂直な軸)に沿って無限長の溝状きずであれば、図 B の双極子モデルで近似する。下式が導いた等価線状磁化電流双極子モデルにおける漏洩磁界の理論式である。なお、 H_x 、 H_y はそれぞれ漏洩磁界の水平成分及び垂直成分を指し、 I_2 は溝状きずに対する等価電流であり、 m_2 は溝状きずに対する磁気鏡像係数である。

$$H_x = \int_{-g/2}^{g/2} \frac{m_2 I_2}{2\pi g d} \left\{ \frac{y+h}{(x-x_0)^2 + (y+h)^2} - \frac{y+h+d}{(x-x_0)^2 + (y+h+d)^2} \right\} dx_0$$

$$= \frac{m_2 I_2}{2\pi d g} \left\{ \tan^{-1} \frac{d(x+g/2)}{(x+g/2)^2 + (y+h)(y+h+d)} - \tan^{-1} \frac{d(x-g/2)}{(x-g/2)^2 + (y+h)(y+h+d)} \right\} \quad (1.15)$$

$$H_y = \int_{-g/2}^{g/2} \frac{-m_2 I_2}{2\pi g d} \left\{ \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2 + (y+h)^2} - \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2 + (y+h+d)^2} \right\} dx_0$$

$$= -\frac{m_2 I_2}{4\pi g d} \log \frac{\{(x-g/2)^2 + (y+h)^2\} \{(x+g/2)^2 + (y+h+d)^2\}}{\{(x-g/2)^2 + (y+h+d)^2\} \{(x+g/2)^2 + (y+h)^2\}} \quad (1.16)$$

$$I_2 = \frac{(\mu-1)(d+g)dg}{(d+g)\mu + (1-\mu)d} H_0 \quad (1.17)$$

$$m_2 = 2 + \frac{g^2}{6h(h+d)} \quad (1.18)$$

1.4.3 Far-side 漏洩磁束探傷法の概要

近年、石油タンク底板或いは土壤埋設配管の土壤基礎側の孔食、減肉といった比較的な開口径の大きなピット状のきずに対する内面側からの有効な非破壊検査技術が強く要望されている。通常、磁気探傷法はきず開口側に漏れる磁場(near-side 漏洩磁場)を測定するので、きず開口の反対側に漏れる磁場を測定する far-side 漏洩磁束探傷法を確立する必要がある。

Far-side 漏洩磁束探傷法とは、試験体の裏面側に開口したきずによる内面側空間への漏洩磁界の分布と強度を定量的に調べ、裏面きずサイズや残存肉厚量を評価する NDT 技術である。Fig.1.4に示すように強磁性体を磁化した際にきずが存在すると漏洩磁束が発生する。通常、漏洩磁束探傷法では、交流磁化を用いきず開口側に比較的強く洩れる near-side 漏洩磁束を測定するが、タンク底板等の裏面側の腐食の場合では、土壤及び基礎等があるため直流磁界を用い被験体の裏面側に開口したきずによる内面側空間への漏洩磁界、つまり far-side 漏洩磁界を測定する。

漏洩磁束探傷法のきず信号検出感度は、表面に開口したきずに対しては非常に高いが、裏面又は内部に存在するきずに対しては著しく低くなる。Far-side 漏洩磁束探傷法は、微弱な far-side 漏洩磁界を精度良くとらえて、きず評価を行わなければならない。対象となるきずに対する適切な探傷装置の選定と開発及びきず信号の信号処理手法には種々改善すべき問題も多い。

通常、漏洩磁束探傷法(Near-side MFLT)は、1970年代から急速に発展、実用に供されるようになり、強磁性部材の保守検査や鋼材の品質管理に多用されている一般的な磁気探傷法の一つである。一方、far-side 漏洩磁束探傷法は原理的に磁気的不連続部を検出するものであるため、局部腐食のような比較的狭い領域の減肉部の評価、検知に適している。Far-side 漏洩磁束探傷法は、Nd-B-Fe 系の強力な永久磁石が作製され磁気感応素子が安価になり始めた、1990年代頃からいくつかの研究例が見られるが、通常、漏

洩磁束探傷法に比べ研究が進んでいないのが現状である。

1.5 デジタル信号処理

1.5.1 ノイズの発生と信号処理フィルタ

検査システムの感度が高ければ微小な信号でも検知できるようになるが、入力信号に混入するノイズが増加することにより、検査システムの検知能力は低下する。しかし、ノイズが減少し、検査システムの信号とノイズ比(S/N)を向上させることによって、検査システムの検知能力を増大させることができる。

1.5.1.1 ノイズの発生

ノイズには、検査システム自体から発生するものと検査システムの外部から発生・混入するものがある。内部ノイズとは、信号源の内部抵抗 R から熱ノイズ電圧が発生し、信号電圧に直列に加わるものである。この検査システム自体から発生するノイズ電圧を小さくするためには内部抵抗の小さいセンサなどを使用する必要がある。一般的に、検査システムのセンサからの出力電圧は小さいので、外部からの誘導ノイズの影響を受けやすい。従って、検査システムのセンサの出力線及び装置間の信号線などではできるだけ短かくし、かつこれによる磁束の相互影響が小さくなるようにすることが必要である。さらに、検査システムのセンサと装置等には静電遮蔽と磁気遮蔽を行うことも必要である。

通常、測定信号波形には様々な要因からノイズ成分が混入している。こ

これらの発生源によってノイズの性質は大別することができ、ノイズを除去する際、この性質に関する情報は各種信号処理のパラメータ(例えば平滑化点数、フィルタ関数など)の選択基準になる。この際、ノイズの除去と同時に必ずしも信号も多少除去されてしまう可能性があり、ノイズを完全に除去することはできない。従って、ノイズの性質によって適切なフィルタリング方式を選択する必要がある。

1.5.1.2 時間平均と集合平均

多くの計測において、ノイズ処理の基本となるのは時間平均と集合平均である。時間平均は一つの波形を対象とした、充分長い時間での平均であり、集合平均は全く同じ条件で発生した多数の波形におけるある時刻での平均である。

時間平均は一つの波形 $X_1(t)$ のある時間 $t(0, T)$ について、

$$\overline{X_1} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X_1(t) dt \quad (1.19)$$

と表され、集合平均は多数の波形 $X_k(t)$ のある時刻 t_1 について、

$$\hat{X}(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k(t) \quad (1.20)$$

と表される。

1.5.1.3 平均値フィルタ

平均値フィルタはある点 (i, j) を中心とした任意の矩形領域の各点の信号

強度の平均値を求めて、新しい信号強度 $f(i, j)$ とする方法である。たとえば (i, j) を中心とした 3×3 の領域の場合は、九個の二次元出力信号 $g(i, j)$ に対して次式のように与えられる。

$$f(i, j) = g(i, j) \times M(i, j) \quad M(i, j) = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

しかし、このフィルタでは、中心 (i, j) の出力信号の強度も、まわりの八個の出力信号の強度も同じ重み 1 を使用しているため出力信号がぼやけてシャープさを失ってしまう傾向にある。そこで、注目する点 (i, j) からの距離が増加するに従い重み係数を減少させて、次のように構成すると、シャープさを失うという欠点を多少は補うことができる。

$$M(i, j) = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

この平均値フィルタは、領域内の出力信号の強度値を平均化してしまう、高周波成分を除去する性質をもつため、低周波通過型のフィルタとして作用する。

1.5.1.4 メディアンフィルタ

平均値フィルタに対して、 3×3 領域内の九個の信号を強度の高い順に並べてその中央、すなわち 5 番目の信号の強度を、中心の位置の強度値とするフィルタをメディアンフィルタと呼んでいる。このフィルタはノイズ除去と同時に平均値フィルタと比べて、信号強度が急激に変化しているエッジ情報が保存されるという特徴を持っている。

1.5.2 デジタル信号処理の概念

デジタル信号処理(Digital Signal Processing, DSP)はアナログ信号をデジタル集積回路或はパソコンを用いて代数的演算により処理する方式である。DSP 技術が普及する以前、アナログ信号はアナログ回路によって処理され、数種類のアナログ素子の特性を巧みに利用していた。これに対し、アナログ信号をパソコンで処理する場合には、時間軸上も振幅軸上も離散的処理を行うことを前提として、要求された機能を数式に展開し、デジタル数値の代数的演算を行うことになる。この場合、アルゴリズムの簡略化は種々工夫されるとしても、数式そのままを忠実に実行することが基本となるので、演算回数は膨大なものとなる。これは最近の LSI 技術の進歩によって、これが可能となってきたのである。

DSP の応用分野は、アナログ信号を扱うほとんどの分野に広がり、種々のシステムを実現する上での基本的共通技術となっている。デジタル信号処理の理論は、離散時間信号・システムの解析手法を基礎として 1960 年代に骨格が形成され、1970 年代に肉付けされたデジタルフィルタの設計理論、高速フーリエ変換(FFT)を中心とする信号変換の理論及び適応処理の理論が中核である。

1.5.3 離散時間信号と高速フーリエ変換

信号は時刻パラメータが連続、離散であるかによって分類することができる。時刻パラメータ t が連続的である時、連続時間信号(Continuous-time Signal)といい、連続時間信号の振幅も連続的である時、アナログ信号という。これに対して、時刻パラメータ t が離散的である時、離散時間信号(Discrete-time Signal)といい、離散時間信号の振幅値も離散的である時、デジタル信号(Digital Signal)という。

連続時間信号(アナログ信号)は適当な条件の下で、離散的な時刻の信号値で表現できる。実際に、パソコンで信号のスペクトルを求める時には離散的な時刻の信号値のみが利用でき、また、必要となるスペクトル値も離散的な周波数点で十分であることが多い。この際、離散的な時刻の信号値と離散的な周波数点のスペクトル値の関係を与えるのは離散フーリエ変換である。

離散フーリエ変換(DFT)は当初定義どおりの形のままで計算されると、高速の計算機を用いても、相当の計算時間が必要となり、実用性がきわめて乏しいものであった。ところが、1965年、クーリー(Cooley)およびチューキー(Tukey)はこの計算に含まれる乗算回数を激減させる方法を見だし、DFTの実行時間を2桁程度短縮させることに成功した。この方法は高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform, FFT)と呼ばれ、最近のデジタル信号処理の発展と実用化において重用な役割を果たした。

クーリーおよびチューキーによるFFTは、DFTの実行に必要な複素乗算回数を減少させることによって計算の高速化を図っている。しかし、データ数の制限やデータの並び換え及び行列の分解が必要であった。従って、データに対して新しい制限を与え、FFTの新しい分解を考えることによって新しいFFTアルゴリズムが得られる可能性がある。そのような一例としてウイノグラード(Winograd)のFFTがある。このアルゴリズムでは、データ数が互いに素である整数の積となる場合を取り扱う。まず、データ数が少ない場合のアルゴリズム($N=2,3,\dots,9,16$)を定式化しておく。データ数が大きい場合はこれらの組み合わせとしてアルゴリズムが構成され、複素乗算回数はデータ数 N 程度であり、クーリー、チューキーのFFTよりも高速である。

1.5.4 ウェーブレット解析⁴¹⁻⁴²⁾

フーリエ解析は波形解析で良く用いられている手法であり、任意の波形を正弦波・余弦波の和で表現するものである。時間領域波形をフーリエ変換すると横軸を周波数、縦軸を高調波の振幅で表すいわゆる周波数スペクトラムが得られる。通常の波形解析は、この周波数スペクトラムを観察し、波形の高調波含有率を吟味する。

有限エネルギーをもつアナログ信号を考えれば、そのフーリエ変換は信号のスペクトル情報を与える。フーリエ解析の利点は、波形を高調波成分に分解するため、波形の歪みを高調波成分の含有率で定量的に評価できる点にある。しかし、フーリエ解析は問題をすべて周波数領域に変換して議論するため、時間領域の情報が失われてしまう欠点がある。また、フーリエ解析する際、時間領域全域における元信号の情報が必要となり、ある時刻の近傍で元信号を変化させると、その影響はすべてのスペクトル情報に及ぶ。

波形解析において、高調波の周波数と振幅から高調波の原因となる時間領域の波形を探す必要がある。しかし、フーリエ解析では直接に高調波の原因となる時間波形を探すのは困難である。また、本質的なノイズ対策は特定の高調波成分を減小させることではなく、パルスを取り除くことである。

このため、フーリエ変換をある特定の波形が含まれる区間だけ行い、時間領域と周波数領域の両情報を同時に観察する方法、すなわち窓関数付きフーリエ変換や短時間(Short Time)フーリエ変換などの工夫がなされている。この中で、パルスの存在する区間だけで、部分的なフーリエ変換する方法であるガボール変換がある。これは時間一周波数解析の立場から、時間を局所化するための窓関数(ガウス関数、式(1.23))

$$g(t-b) \quad , \quad g_a(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} e^{-\frac{t^2}{4a}} \quad (1.23)$$

を導入したものである。ここで、 $a > 0$ は定数であり、パラメータ b は窓関

数を平行移動するために使われた。窓関数を平行移動することにより全時間領域をカバーすることができる。

波形信号 $f(t)$ のガボール変換は式(1.24)で表せ、 $f(t)$ のフーリエ変換を $t=b$ の回りに局在化させたものである。

$$\begin{aligned} (G_b^a f)(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} (e^{-i\omega t} f(t)) g_a(t-b) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(t) (e^{-i\omega t} g_a(t-b)) dt \end{aligned} \quad (1.24)$$

また、 $f(t)$ のガボール変換の集合 $\{G_b^a f : b \in R\}$ は $f(t)$ のフーリエ変換を分解し、その局所的なスペクトル情報を与えるものである。

$$\int_{-\infty}^{\infty} (G_b^a f)(\omega) db = \hat{f}(\omega) \quad (1.25)$$

しかし、これらの変形フーリエ変換法では、Fig.1.5 に示すように時間一周波数の窓関数のサイズが固定し、時間情報を増やすと周波数の精度が失われ、逆に周波数精度を向上させると時間情報が失われる。つまり、不確定性が存在し、ガボール変換の応用範囲を狭めてしまった。

信号処理するための波形解析を行い、高周波数をもつ現象を捜す場合、狭い時間の窓が必要であり、低周波数部分を深く分析する場合、広い時間の窓が必要である。このように時間と周波数領域に跨った解析が必要で、この要望に答える一つの方法として提案されたのがウェーブレット (Wavelet) 解析である。

ウェーブレット変換とは、信号波形からマザーウェーブレット (Mother Wavelet) と呼ばれている波形と相似な波形だけを抽出する、一種のフィルタのようなものである。マザーウェーブレット $\varphi(t)$ は既存のもの、及び自分で定義したものを使用することができる。ただし、下式を満足しなければならない。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) dx = 0 \quad (1.26)$$

この式は、 $\varphi(t)$ は波形が有界(サポートコンパクト)で振動的でなければならないことを意味している。マザーウェーブレット $\varphi(t)$ をスケール(伸縮)、トランスレート(平行移動)することによって、ウェーブレットと呼ばれる一セットの基礎関数になり、信号を解析する。式を $\varphi(t) \rightarrow \varphi(t/a)$ とすれば、マザーウェーブレットの幅が a 倍され、マザーウェーブレットを横に伸ばしたり、押し縮めたりするスケールになり、周期(周波数)を変化させることができる。また、式を $\varphi(t) \rightarrow \varphi(t-b)$ とすれば、マザーウェーブレットの中心位置を t 軸上で左右に動かすトランスレートになり、任意の時間の相似な波形を取り出すことができる。マザーウェーブレットはこの二つの操作を組み合わせて使われることで、任意の時間のマザーウェーブレットと相似な波形を見つけることができる。従って、 $\varphi(t)$ は $\varphi((t-b)/a)$ になる。

マザーウェーブレットはバンドパスフィルタとして考えることもでき、 Δf はバンドパスフィルタの帯域幅であり、 Δt は時間の分解能である。時間と周波数における分解能は任意には小さくすることができなく、下式のハイゼンベルグ不等式によって範囲が与えられる。

$$\Delta t \Delta f \geq 1/4\pi \quad (1.27)$$

このようなマザーウェーブレットは Fig.1.6 のように、原理的に高い中心周波数に対して窓は狭くなり、低い中心周波数に対して広がる時間 - 周波数の窓を持っている。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) f(t) dt \quad (1.28)$$

式(1.28)は $\varphi(t)$ と信号 $f(t)$ の積の積分を表している。 $\varphi(t)$ が信号 $f(t)$ の部分に似ているとき、その積分の値は大きいものとなるが、近似していないとき、その積分の値は小さいものとなる。従って、式(1.28)の意味は、スケール a と位置(時間)が適当であれば、正の領域だけに存在し、積分が大きくなる。適当でないと正と負の両方に値が存在し、積分はほぼ0となる。これに $1/\sqrt{a}$ を掛けたものがウェーブレット変換の定義式(1.29)である。

$$W(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{a}} \overline{\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)} f(t) dt \quad (1.29)$$

この $W(a,b)$ は、ウェーブレット係数と呼ばれ、マザーウェーブレット $\varphi(t)$ との相似性の強さを示す量であり、この作業のことをウェーブレット変換と言う。このウェーブレット変換を用いた信号の解析手法は、ある信号がいつ生じ、どの周波数であるかの二つの情報を与えられるため、特定の信号の存在する位置、いわゆるその局所性を検出するのに適している⁴³⁻⁴⁷⁾。

1.6 きずの定量的評価手法

材料の検査において、材料の性能に影響するきずの有無を検出するだけでなく、きずのサイズを精度良く評価できる探傷手法が求められている¹⁹⁻²⁰⁾。正しいきず寸法を測定するには、信号処理によって測定データから可能な限りノイズを除去し、本来のきず情報が強調されるよう信号を変換もしくは加工するした後、技術経験者が信号処理した信号を解析し、きずをサイジングするのが一般的な定量的非破壊評価手法であり、主成分分析法や多変量分析など手法が用いられている⁴⁸⁻⁴⁹⁾。これに対して、検査対象のモデリングを行うことによる、シミュレーションを用いた計算支援も含んだ、逆問題解析という高度な定量的評価手法がある。

検査信号から欠陥サイズを求める逆問題解析には大きく二つの手法がある。一つは、解析シミュレーションによる逆問題解析手法であり、順シミュレーションの入力きず情報に関するパラメータの最適化により定量的評価を行う手法である。検査モデルの順解析結果と検査データを直接比較し、検査データに適合するようモデルのパラメータを調節していくオンライン的な計算手法である。このような手法では、検査の計測時間とシミュレータの計算時間との整合性が合わない、検査対象物を厳密にモデル化することが困難などの問題があり、市販の汎用ソフトをそのまま適用するのは難

しい。

一方、ニューラルネットワークは検査データを用いてきずの推定を行う逆問題解析を解決するのに広く使用されている⁵⁰⁻⁵³⁾。これはきず形状とその検査データ、もしくはシミュレーションによる入出力データをニューラルネットワークに学習させ、検査データからきず形状、サイズへの逆写像を構築する手法である。これは多次元の補間(Interpolation)を書き直すことで、ニューラルネットワークノードに関連している伝達関数によって、ニューラルネットワークの入力と出力との任意の未知の非線形の関係を見つけてることができる。ニューラルネットワークは任意の非線形の入出力関係を容易に構築できるが、ニューラルネットワークの過学習による性能劣化、及び何を学習させるのかが実問題に依存する。また、検査であらゆるきず形状について実際に測定することは、試験片の製作と実測定上で不可能であり、多くの逆問題解析において、シミュレーション手法も援用される。

1.7 ニューラルネットワーク

ニューラルネットワーク(NN)は、数多くの生物の並列に機能する神経系から考えられた単要素(ニューロン)で構成されるものである。ここで、入力層、中間層、出力層から構成されるネットワークを Fig.1.7 に示す。NNでは特定の入力データがターゲット出力を導くように学習され、出力がターゲットと一致するまで、出力とターゲットの比較に基づいてNNの各ニューロンの結合の重みを調整する。また、この要素間の重みを調整すること及び伝達関数 $f(x)$ の種類を選択することによって、NNは多様な特定の機能を持たせることができる。

NNの学習(訓練)には二種類がある。バッチ型学習は入力データベクトルのすべての組(バッチ)に基づいて、重みを変更することで学習が進行する。一方、逐次型学習ではそれぞれの入力データベクトルが引き渡した後、必要ならばNNの重みを変更させる。そのため、逐次型学習は“オンライン”

または、“適応”学習とも呼ばれる。

NNへの入力、重み付けされた各単一入力の和(内積を使用)から構成され、NNの出力は、その入力と選択した伝達関数によって決まる。伝達関数にはNNの目的によって選択でき、有用なものが多数ある。学習ルールはNNの重みを修正するための手続きとして定義され、NNが特定の仕事をを行うように学習させる際適用され、NNの出力及びターゲットがどのようにニューロンの重みを影響するのかを決定している。入力がNNに適用されると、NNの出力はターゲットと比較され、学習ルールはNNの出力をターゲットと一致するために、NNの各ニューロンの重みを調整するために用いる。また、学習比は、この重みの毎回調整する量を決めているパラメータである。

一般的に、NNは以下の四つの手順に従って作業する

- (1) 学習データセット(入力、ターゲット)の定義
- (2) NNオブジェクトの作成
- (3) 学習データセットによるNNの学習
- (4) 新しい入力(テストデータ)を与えた際のNN応答(出力)のシミュレーション

NNの重みが一度初期化されると、NNの学習の準備が整い、NNは関数の近似(非線形回帰)、パターン認識、パターン分類など機能に対して学習させることができる。訓練プロセスは、適切なNNの挙動サンプル、つまり事前に用意したNNの入力とターゲット出力を必要とする。平均二乗誤差等NNのパフォーマンス関数を最小化する目的で、学習中にNNの重みは繰り返し調整される。また、学習比は重みの変化量を決定し、学習比が大きいと、重みの変化ステップも大きくなる。学習比が大きすぎると、計算は不安定になり、学習が収束できなくなり、学習比が小さすぎると、収束までの計算する時間が長くなる。

1.8 本研究の目的と構成

本研究は石油タンクの漏洩事故につながるような大きな損傷部位を粗探傷によって検知及び特定した後、この損傷部位近傍のみを他の精度の良い方法で定量的に評価するという概念¹⁾に基づくものである。当研究室では現在の超音波法による定点板厚計測の代わりに、far-side 漏洩磁束探傷法を底板の連続的な粗探傷に適用することを検討してきた。Far-side 漏洩磁束探傷法を本格的に実用的なものとするためには、適切な探傷条件や探傷装置の選定、開発、及びきず検出、評価精度の向上策の検討が必要となる。従って、“磁気探傷法への信号処理の応用ときず評価システムの開発”を目的として研究を進め、評価精度の目標値は板厚の 20%程度とした。

本研究では、実タンク上での検査を考慮して、ソフト、ハードの両面からきず検出、評価精度の向上策を検討した。具体的には、ソフト面からきず信号のノイズ処理と解析手法及びきずの定量的評価手法を検討し、ハード面からは実装置の検討とその作製及び磁気補助材を利用した物理的なきず信号の増幅方法を検討した。この際、漏洩磁束密度分布の有限要素法によるシミュレーションや理論解析を含め研究を行った。

本論文は、全 6 章から構成される。

第 1 章に、本研究の背景、既往の研究、検査対象物である石油タンクの構造と安全管理、磁気探傷法の基礎、きず信号のノイズ処理・解析の基礎理論、及び本研究の目的と構成等について記述した。

第 2 章では、実験用きず評価システムの実験装置を作製し、円柱状、溝状など単純な形状のきずを対象に far-side 漏洩磁界からきずが検出し得ること、きず深さ、開口幅といったきず形状が評価できることを示した。また、フィールドで問題となるバックグラウンドノイズに対し、その影響を受けにくい差分方式信号処理法をきず信号に適用した。さらに、far-side 漏洩磁界の水平成分の差分値(B_xDIF と定義する)を利用した定量的かつ簡易的なきず評価手法を提案し、空間微分法を併用することにより、精度の良い裏面きず評価が可能であることが示した。

第3章では、まず有限要素法によって、鋼板中の内部磁場及びきずによる far-side 漏洩磁界を理論的に解析した。この得られた結果に基づき far-side 漏洩磁束探傷法を現実のタンク底板に適用する場合の探傷システムを作製した。また、離散ウェーブレット解析法を用い測定信号のきず位置情報に影響を与えない信号処理手法としきい値の適用を試み、漏洩磁束密度の垂直成分(B_y)を用いたきずの評価法を検討した。さらに、実腐食に対しても同様な手法によってきずサイズの定量的評価が可能であることを示した。

第4章では、“磁気補助材”を利用して物理的に B_y 信号を増幅する方法を検討した。まず磁気補助材を用いた場合のきず信号の増幅効果を三次元非線形の有限要素法を用いて far-side 漏洩磁界を解析した。次に、磁気補助材の幅、厚さ、設置位置等の各パラメータの変化によるきず信号増幅効果を検討した。この解析結果を基に磁気補助材を組み込んだ探傷システムを実際に作製し、磁気補助材の有効性を実験によって証明し、解析結果で得られた知見と実験結果の検証を行った。

第5章では、さらにきずの定量的評価精度を高めるために、逆問題解析手法である NN を利用して、検査データからきずサイズの定量的評価手法を検討した。特にここでは測定条件が異なる現場での対応を視野に入れ、検査システムと検査対象物(板厚、コーティング量)が異なっても適用可能なものを目指した。具体的には、まず飽和磁化状態である棒状試験片の測定データを用いて、NN によるきずサイズの定量的評価を試み、その有効性を示した。次に、有限要素シミュレーションの結果を利用して、実測定データを補正する手法を検討した。この補正手法と設計・学習させた NN を石油タンク底板のような板状試験片の検査データに適用し、設計・学習した NN が高い実用性を持つことを証明した。

以上、各章で得られた知見を第6章で総括としてまとめた。

第 1 章の参考文献

1. 関根 和喜, 日向 直之: 石油タンクの保安全管理技術の現状と課題, 圧力技術, 35(6), pp.300-307, (1997)
2. 関根 和喜: 非破壊検査技術の現状と活用状況, 安全工学, 32(6), pp.391-398, (1993)
3. Z. You, D. Bauer: Combining eddy current and magnetic flux leakage for tank floor inspection, *Materials Evaluation*, Vol.52(7), pp.816-817, (1994)
4. E. Altschuler, A. Pignotti: Nonlinear model of flaw detection in steel pipes by magnetic flux leakage, *NDT& E International*, Vol.28(1), pp.35-40, (1995)
5. D. M. Amos: The truth about magnetic flux leakage as applied to tank floor inspections, *Insight*, Vol.38(10), pp.730-736, (1996)
6. D. M. Amos: Magnetic flux leakage as applied to aboveground storage tank flat bottom tank floor inspection, *Materials Evaluation*, Vol.54(1), pp.26-28, (1996)
7. K. Sekine, A. Iizuka: Improvement of the Magnetic Flux Leakage Signals for Far-side Defects of Ferromagnetic Specimens, *Journal of the JSNDI*, Vol.46(10), pp.748-751, (1997)
8. K. K. Tandon: MFL Tool Hardware for Pipeline Inspection, *MATERIALS SELECTION & DESIGN*, No.2, pp.75-79, (1997)
9. K. Hwang, S. Mandayam, S. S. Udpa, L. Udpa, W. Lord, M. Atzal: Characterization of gas pipeline inspection signals using wavelet basis function neural networks, *NDT& E International*, Vol.33(8), pp.531-545, (2000)
10. S. Mukhopadhyay, G. P. Srivastava: Characterization of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform, *NDT& E International*, Vol.33(1), pp.57-68, (2000)
11. S. H. H. Sadeghi, B. Toosi, R. Moini: On the suitability of induction coils for crack detection and sizing in metal by the surface magnetic field measurement technique, *NDT& E International*, Vol.34(7), pp.493-504, (2001)
12. M. Afzal, S. Udpa: Advanced signal processing of magnetic flux leakage data obtained from seamless gas pipeline, *NDT& E International*, Vol.35(7), pp.449-457, (2002)
13. F. Caleyó, J. L. González and J. M. Hallen: A study on the reliability assessment methodology for pipelines with active corrosion defects, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.79(1), pp.77-86, (2002)

14. Weihua Mao, Lynann Clapham and David L. Atherton: Effects of alignment of nearby corrosion pits on MFL, NDT& E International, Vol.36(2), pp.111-116, (2003)
15. 吉田 聖一: 多重円筒石油タンクの強度解析と設計システムの開発, 横浜国立大学博士論文, pp.2-15, (1994)
16. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 13 年度径年タンクの供用中のグローバル診断技術と開放検査の最適化に関する調査・研究委員会報告書, pp.3-52~3-57, (2002)
17. 石田 和雄: 石油タンクの構造安全性評価と耐震設計手法に関する研究, 横浜国立大学博士論文, pp.1-19, (2004)
18. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 13 年度径年タンクの供用中のグローバル診断技術と開放検査の最適化に関する調査・研究委員会報告書, pp.3-58~3-75, (2002)
19. 社団法人日本非破壊検査協会: 非破壊評価工学, pp.1-101, (1998)
20. 社団法人日本非破壊検査協会: 非破壊試験概論, pp.1-90, (1993)
21. 社団法人日本非破壊検査協会: 磁粉探傷試験 III, pp.130-149, (1998)
22. N. Maeda: Computer Simulation of Magnetic Particle Behavior, Materials Evaluation, Vol.51(4), pp.290-293, (1993)
23. U. Patel, D. Rodger: Calculation of Magnetostatic Field Around Far Side Defects For Nondestructive Testing, IEEE Trans. Magn., Vol.31(3), pp.2170-2173, (1995)
24. K. Wajima, K. Umetu, S. Naito, T. Ueyama: Improved Design of Magnetizer for Magnetic Powder Flaw Detection with AC Nonlinear Analysis, IEEE Trans. Magn., Vol.32(5), pp.4311-4313, (1996)
25. Y. Shin: Numerical Prediction of Operating Conditions for Magnetic Flux Leakage Inspection of Moving Steel Sheets, IEEE Trans. Magn., Vol.33(2), pp.2127-2130, (1997)
26. M. Katoh, K. Nishio, T. Yamaguchi: FEM study on the influence of air gap and specimen thickness on the detectability of flaw in the yoke method, NDT& E International, Vol.33(5), pp.333-339, (2000)
27. W. Mao, C. Mandache, L. Clapham, D. L. Atherton: The effect of bulk stresses on magnetic flux leakage signals, Insight, Vol.43(10), pp.688-691, (2001)
28. A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: The effect of plastic deformation on magnetic flux leakage signals in steel, Insight, Vol.43(5), pp.310-315, (2001)
29. 中田 高義, 高橋 則雄: 電気工学の有限要素法, 森北出版, pp.13-15, (1982)
30. C. Edwards, S. B. Palmer: The magnetic leakage field of surface-breaking cracks, J. Phys. D, Vol.19(4), pp.657-673, (1986)
31. D. Minkov, J. Lee, T. Shoji: Method for sizing of 3-D surface breaking flaws by leakage flux, NDT& E International, Vol.31(5), pp.317-324, (1998)
32. M. Saka, I. Sato, H. Abe: NDE of a 3-D surface crack using magnetic field induced by DC current flow, NDT& E International, Vol.31(5), pp.325-328, (1998)

33. J. Philip, C.B. Rao, T. Jayakumar, B. Raj: A new optical technique for detection of defects in ferromagnetic materials and components, *NDT& E International*, Vol.33(5), pp.289-295, (2000)
34. D. Minkov, J. Lee, T. Shoji: Improvement of the Dipole Model of a surface crack, *Materials Evaluation*, Vol.58(5), pp.661-666, (2000)
35. W. Zhong: Linear Magnetic Dipole of Finite Length and Magnetic Particle Testing, *Materials Evaluation*, Vol.59(8), pp.961-966, (2001)
36. Y. Zhang, K. Sekine, S. Watanabe: Magnetic leakage field due to sub-surface defects in ferromagnetic specimens, *NDT& E International*, Vol.28(2), pp.67-71, (1995)
37. V. Eshcherbinin, M. L. Shur: Calculation the effect of the boundaries of a product on the field of a cylindrical defect, *Defektoskopiya*, No.6, pp.30-36, (1975)
38. 張 耀邦: 漏洩磁束探傷邦に関する研究, 横浜国立大学博士論文, pp.176-206, (1994)
39. 田中 勝廣: 電磁気学計算法, 株式会社日本理工出版会, pp.28-34, (1995)
40. 後藤 尚久: なっとくする電磁気学, 株式会社講談社, pp.79-94, (1999)
41. 榊原 進: ウェーブレット ビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, pp.9-40, (1995)
42. 芦野 隆一, 山本 鎮男: ウェーブレット解析, 共立出版, pp.41-58, (1997)
43. S. Mandayam, L. Udpa, S. S. Udpa and W. Lord: Wavelet-based permeability compensation technique for characterizing magnetic flux leakage images, *NDT& E International*, Vol.30(5), pp.297-303, (1997)
44. S. Mukhopadhyay and G. P. Srivastava: Characterization of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform, *NDT& E International*, Vol.33, pp.57-65, (2000)
45. J. C. Lázaro, J. L. San Emeterio, A. Ramos and J. L. Fernández-Marrón: Influence of thresholding procedures in ultrasonic grain noise reduction using wavelets, *Ultrasonics*, Vol.40, pp.263-267, (2002)
46. R. Draï, M. Khelil and A. Benchaala: Time frequency and wavelet transform applied to selected problems in ultrasonics, *NDT& E International*, Vol.35(8), pp.567-572, (2002)
47. M. A. Rodríguez, J. L. San Emeterio, J. C. Lázaro and A. Ramos: Ultrasonic flaw detection in NDE of highly scattering materials using wavelet and Wigner-Ville transform processing, *Ultrasonics*, Vol.42, pp.847-851, (2004)
48. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 12 年度経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-80~3-104, (2001)
49. 笠井 尚哉, 関根 和喜, 丸山 裕章: Far-side 漏洩磁束探傷法による開口端に角度のあるきずの評価, 非破壊検査, 51 巻, 10 号, pp.657-666, (2002)
50. K. Hwang, S. Mandayam, S. S. Udpa, L. Udpa, W. Lord and M. Atzal: Characterization of gas pipeline inspection signals using wavelet basis function neural networks, *NDT& E*

International, Vol.33(8), pp.531-545, (2000)

51. M. S. Obaidat, M. A. Suhail and B. Sadoun: An intelligent simulation methodology to characterize defects in materials, Information Sciences, Vol.137, pp.33-41, (2001)
52. Balqies Sadoun: An efficient simulation scheme for testing materials in a nondestructive manner, Information Sciences, Vol.137, pp.43-51, (2001)
53. K. Passadis, T. Meydan and P. Beckley: Neural-network-based single-sided non-enwrapping power loss tester, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 254-255, pp.385-387, (2003)

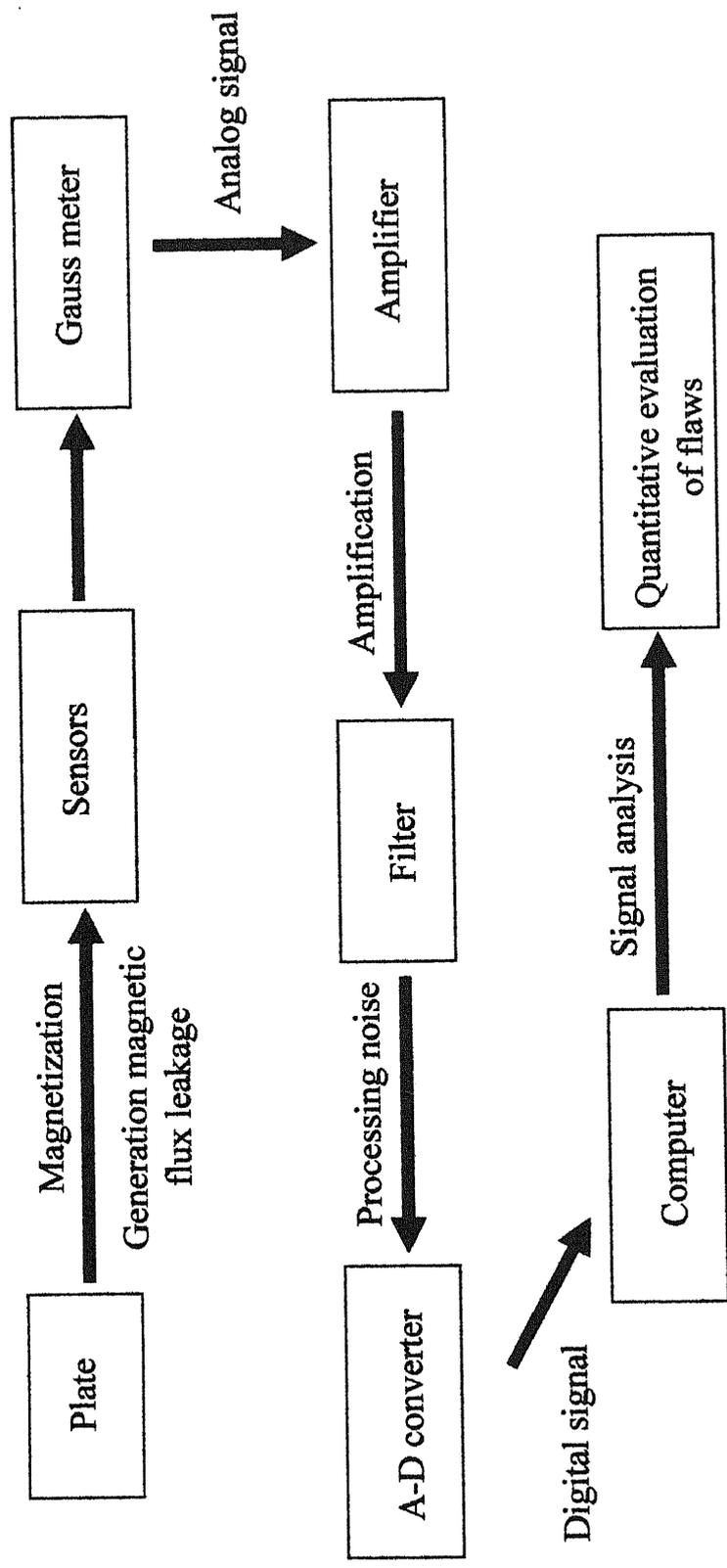


Fig.1.1 Flow of far-side magnetic flux leakage evaluation procedure

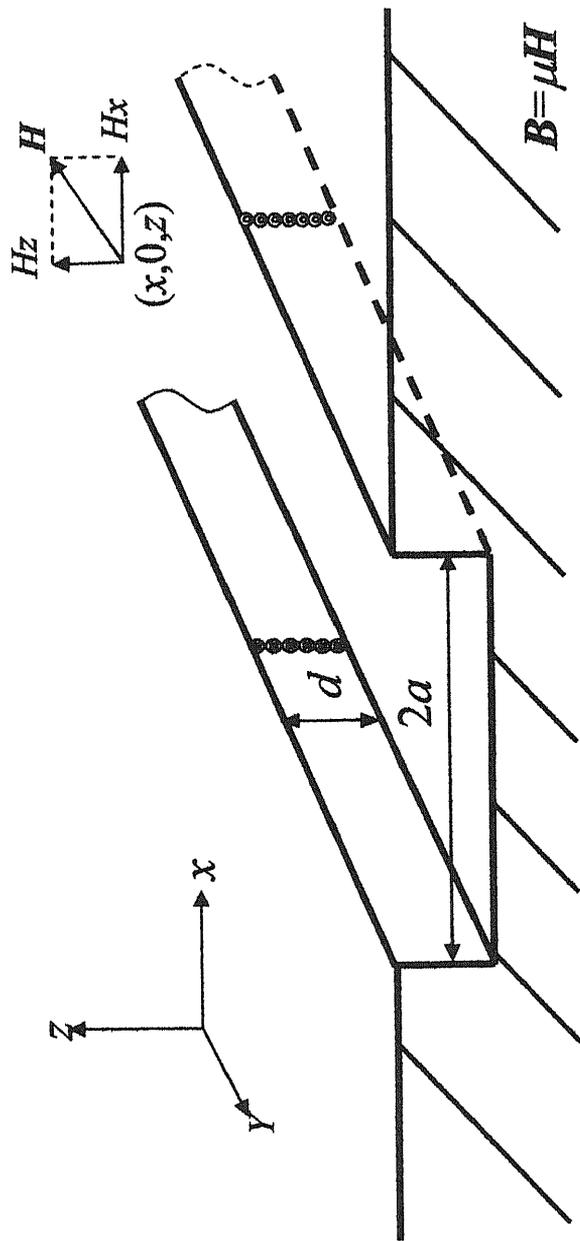
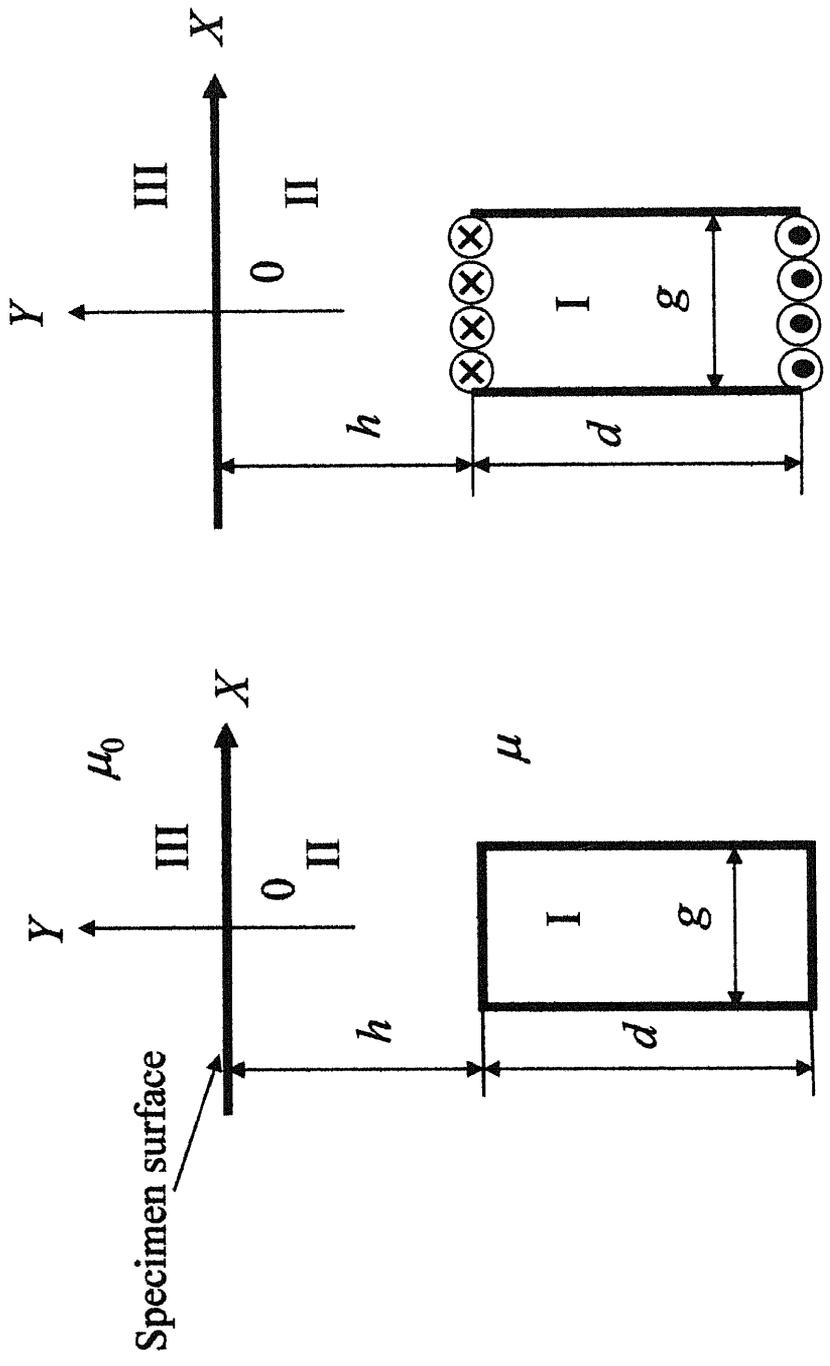


Fig.1.2 The classical dipole model



(A)

(B)

Fig.1.3 The double dipole model

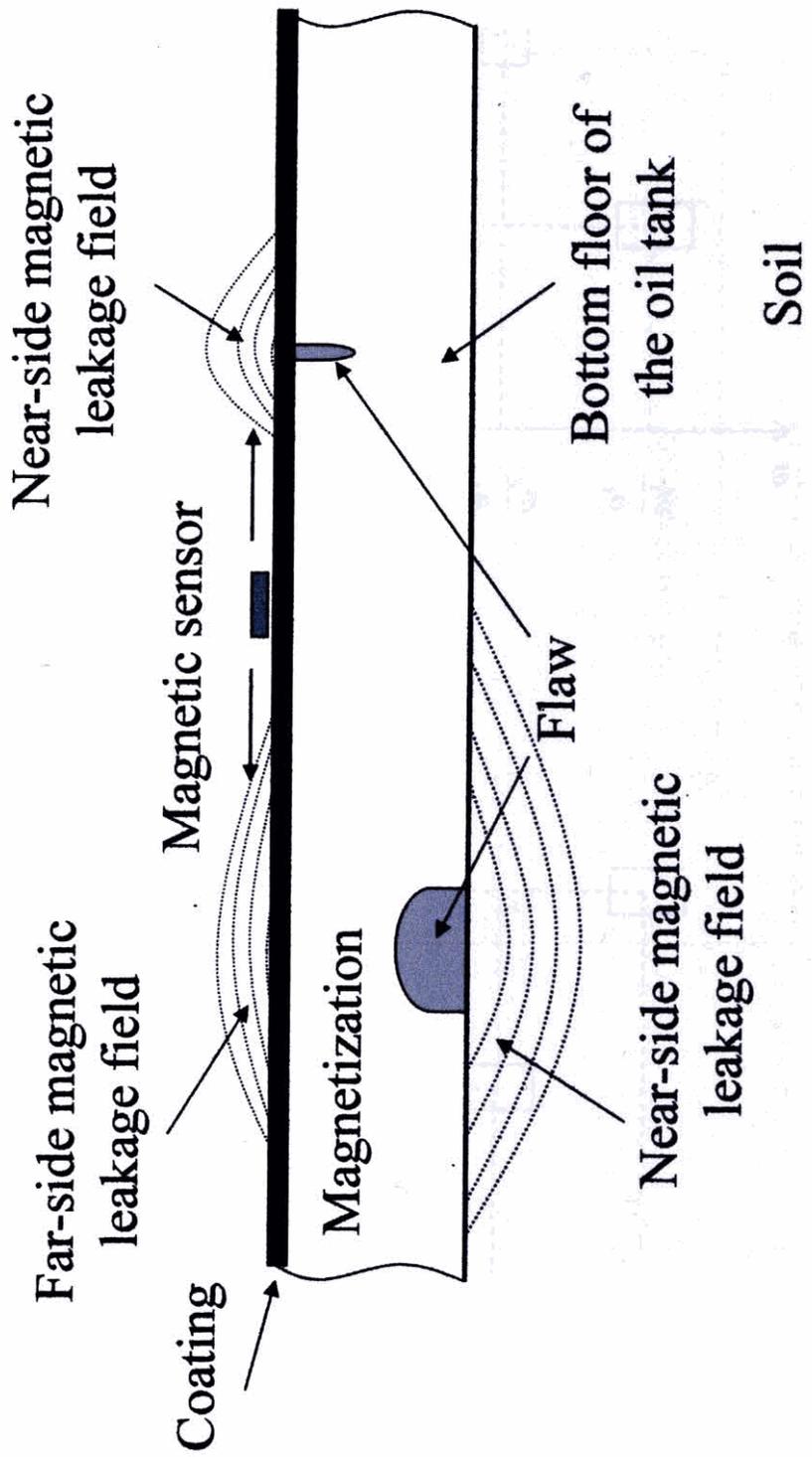


Fig.1.4 The principle of far-side magnetic flux leakage testing

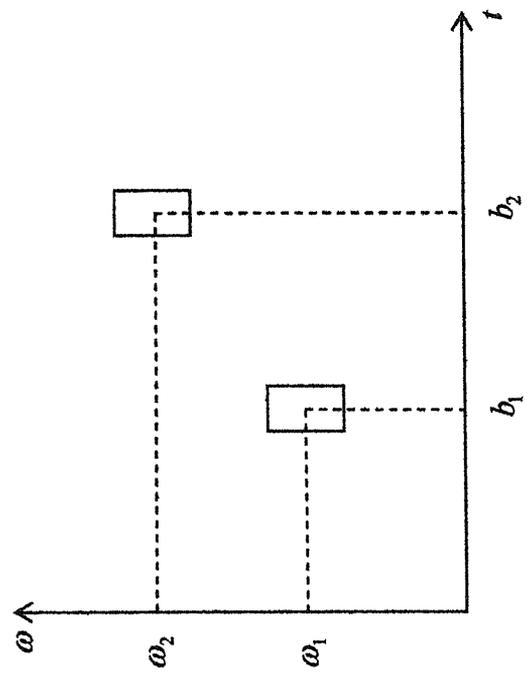


Fig.1.5 Window of Gabor transform

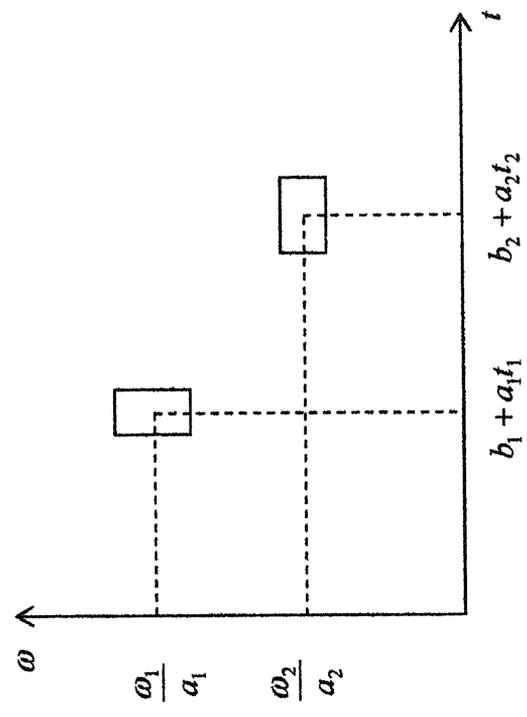


Fig.1.6 Window of wavelet transform

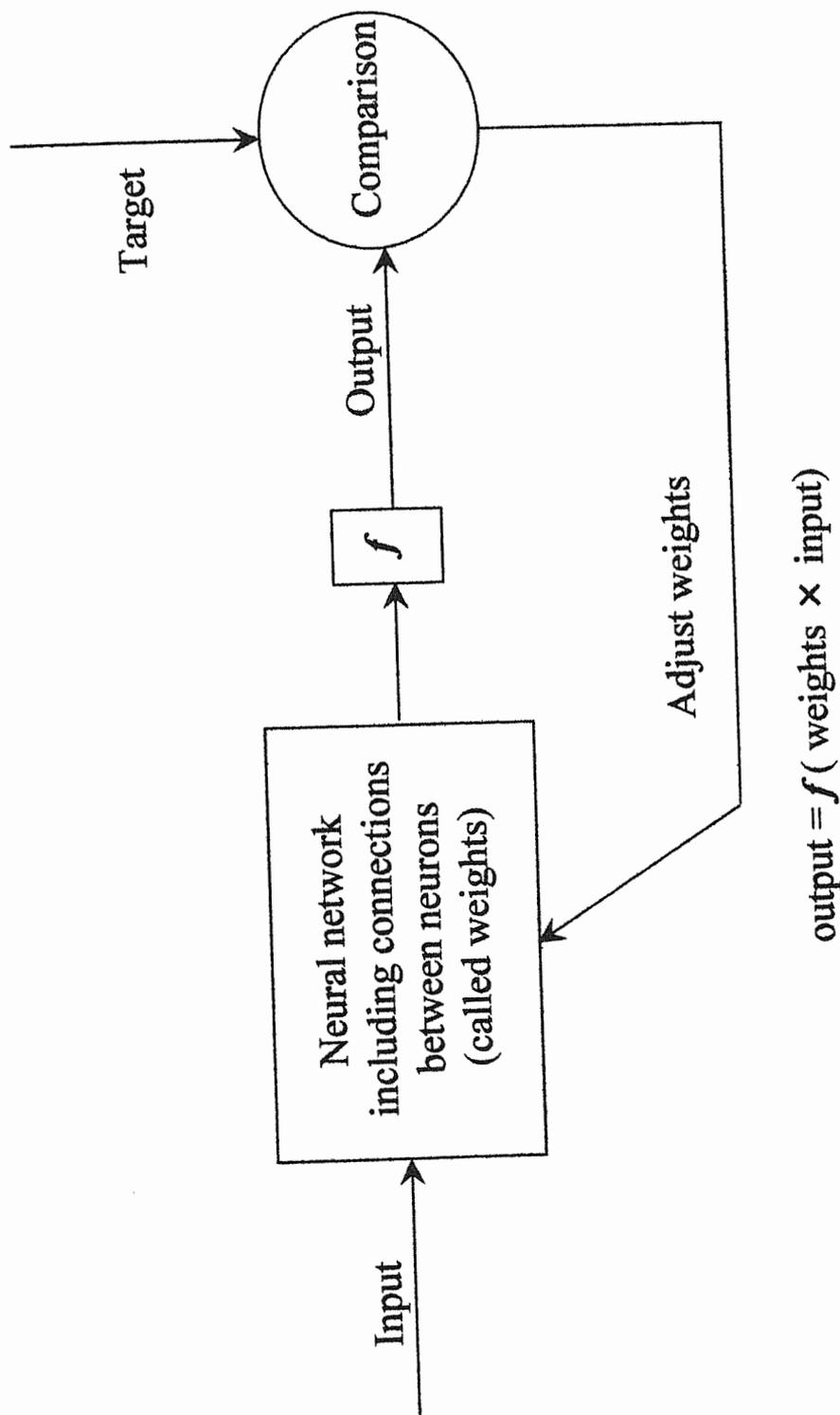


Fig.1.7 Elements of the neural network designed in this study

第 2 章

差分方式の信号処理法による裏面きずの
簡易的評価

第2章 差分方式の信号処理法による裏面きずの簡易的評価

2.1 第2章の概要

本章では実タンク上での検査を考慮し、far-side MFLT¹⁻⁹⁾を用いた最適なきず評価システムの自動化実験装置を作製し、きずからの漏洩磁束密度の分布、きずのサイズと漏洩磁束密度との関係を明らかにした。また、実タンクの底板、アニューラー板で実際にバックグラウンドの影響を受けにくい差分方式の信号処理法を適用した定量的かつ簡易なきず評価手法を開発することを試みた。さらに、より現実の局部腐食の断面形状に近い角度が有するきずを対象として検討した結果、裏面きずの評価ができることがわかった。さらに、信号処理方法として空間微分法を併用することにより、精度の良い裏面きず評価が可能となることを示した。

2.2 Far-side 漏洩磁束探傷システムの概要

2.2.1 試験片と実験方法

試験片材料には、石油タンク底板と同一材質の軟鋼板(SS400 鋼)を用いた。Fig.2.1 に示すようにきず深さ d 、開口幅 w を変化させ、様々なサイズの円形、矩形人工きずを持つ棒状試験片を作製した。

作製した far-side 漏洩磁束探傷システムの概略を Fig.2.2 に示す。人工きずの存在する試験片の上に電磁石をのせ、直流磁界によって試験片を一様に磁化す

ることで、裏面きず部分から、表面空間へ漏洩磁束を発生させた。次に、単軸ロボットを用いて一定の lift-off 量(試験片の表面とホール素子センサの保持ケース間の距離を“lift-off”と定義する)に制御しながら磁気センサをきず中心から左右に走査させ、漏洩磁束密度の水平成分(B_x)と垂直成分(B_y)を測定した。きず信号はガウスメータのアナログ出力端子から、A-D 変換ボードを介してデジタル化し、これをパソコンに取り込んだ。また、出力信号の強度を増幅させるためのアンプおよび試験片、装置からのノイズを除去するためのフィルタを計測システム中に組み込んだ。

実験機器の仕様を以下に示す。

- 極間式磁化器：栄進化学(株)製、容量：2400AT
- ホール素子磁気センサ：マイテック(株)製、素子面積：0.13mm×0.14mm、材質：GaAs
- 単軸ロボット ABBSK：KOGANEI(株)製、モータ出力：60w、最高速度：1200mm/s、繰り返し位置精度：±0.08mm
- ガウスメータ M-DGM5DIF：関根研究室試作、測定方式：ホール効果、測定精度：±2%、アナログ出力：DC±1.999V
- フィルタとアンプ 3611：エヌエフ(株)製、モード：LPF、HPF、BPF、BEF、THRU、通過域利得：0dB、20dB
- A-D 変換ボード DAS-1202：KEITHLEY 社製、電圧レンジ：±5, ±2.5, ±1.25, ±0.625V(本実験では±2.5V)

2.2.2 実験結果及び考察

Fig.2.3 に測定した B_x 信号の一例を示す。この図は B_x 信号ときず中心からの距離の関係を示したものである。 B_x 信号は左右対称な形で、きず開口幅が小さい時はきず中心で最大値をとり、中心から離れるに従ってその値が小さくなっていく。さらに、きず開口端で最大値の約半分の値になる。また、きず開口幅が大きくなると、きず中心における B_x の値は減少し、きず開口端と中心の間で二つ最大値を示し、この二つの最大値はきず中心に対してほぼ左

右対称となる。また、きず深さが増加したとき、 B_x の最大値は増加する。

Fig.2.4 に測定した B_y 信号の一例を示す。この図より、 B_y 信号はきず中心で 0 になり、きず開口端付近で信号振幅の最大値、最小値を示す。さらに、最大値、最小値はきず中心点に対してほぼ点対称になっている。また、 B_y 信号はきず深さのみ増加すると、信号ピーク値の x 座標間の距離はほぼ同じであるが、 B_y 信号の振幅値は大きくなる。一方、きず開口幅のみが増加したとき、 B_y 信号のピーク値の x 座標間の距離と B_y 信号の振幅値は共に大きくなるという特徴があった。また、この B_y 信号における、ピーク値の x 座標間の距離ときずの幅の関係及び、振幅値ときずの深さの関係を利用すれば、きずのサイズを評価することは可能である¹⁰⁻¹⁶⁾。

2.2.3 永久磁石磁化器の検討

Far-side 漏洩磁束探傷法における磁化は、永久磁石及び電磁石を用いることで行うことができるが、試験板中の磁束密度をコントロールするために直流電磁石を用いた。電磁石は、磁化力の強度は巻かれる回数と磁化電流の大きさによって調整できるという利点があるが、磁気エネルギーを保有していないため、外部から電力を供給する必要がある。このため、探傷装置が大きく、かつ重くなるという欠点がある。これに対し、永久磁石は、それ自身が磁気エネルギーを保有するため、外部からの電力を必要としない。このため、実タンク上での磁化では、コンパクトな永久磁石が望ましいと考えられる。従って、二つの円筒状ネオジム-鉄-ボロン系永久磁石($\phi 22 \times 10 \text{mm}$)を磁化器として使用することを試みた。永久磁石の表面磁束密度は 430mT で、両者の中心間距離は 111mm にした。また、磁化器のヨークの材質は電磁軟質鋼を用いた。

Fig.2.5 に示すように、永久磁石磁化器の場合には、電磁石磁化器の場合と比べて、出力信号の形状と特徴点は変化しないが、永久磁石磁化器の磁化力は弱くなるので、電磁石磁化器の場合より、出力信号の振幅強度は約 30%減

少しした。従って、実際に使用する場合には、永久磁石の配置と高精度な信号処理、解析手法の検討が必要になることが分かった。

2.3 差分方式の信号処理方法の検討

2.3.1 差分方式の信号処理方法

本節では、差分方式の信号処理方法を用いた、きずの簡易な評価手法の適用を試みた。通常の far-side 漏洩磁束探傷法で使用されるホール素子センサの出力信号は、以下の原因でバックグラウンドの影響(低周波信号)を受けやすくなる。

- (1) 実タンクのコーティング膜上からの裏面腐食検査を行う場合、板厚ときずサイズが同じであると、きず検出能は非磁性の塗膜の物性や種類には関係せず、センサ感度と実効 lift-off 量(塗膜厚さ+残存肉厚)に依存する。従って、コーティングの表面凹凸の存在は lift-off 量の変化として信号に影響を与える。
- (2) 実際の裏面腐食部の形状は極めて複雑であり、残存板厚が緩やかに変化する際、これによる漏洩磁束の変化量はきず信号にノイズとして上乘せされることになる。
- (3) 実際の装置は信号センサを複数個使用することになる。その場合、個々の単一センサ間で出力特性と信号感度に大きなバラツキが生じ、これは出力信号にノイズを与える原因になる。

これらの影響を取り除くため、本研究では差分方式の信号処理方法の適用を考えた。ここで、差分信号の定義を Fig.2.6 に示す。差分信号は、一定の距離間(2mm 程度と設定した)に配置した二つ信号の差分値を出力として得るものである。このため、種々の誤差要因を排除することが可能になると考えら

れる。

2.3.2 信号雑音処理

通常、出力信号波形に様々な要因から高周波の“ノイズ成分”が混入している。本章で、ノイズを取り除く信号処理手法として、出力信号にメディアンフィルタと移動平均フィルタを施した。その効果を Fig.2.7 に示す。これにより、メディアンフィルタにより高周波のノイズを効果的に取り除くことができ、移動平均フィルタにより出力信号を平滑化できることが分かった。

2.3.3 円形、矩形きずの評価

Fig.2.8 に、差分方式の信号処理方法を用いた実験結果の一例を示す。横軸にきず中心からの距離をとり、縦軸に $BxDIF$ (漏洩磁束密度の水平成分の差分値) を示した。ここで、 $BxDIF$ 信号のピーク値の間の距離を Δp と、振幅値を $\Delta BxDIF$ と定義した。

同一の測定システムにおける結果である Fig.2.3、Fig.2.4 に示した B_x 、 B_y 出力信号では、きず信号領域以外の部分で出力信号が 0 にならず、きず信号にバックグラウンドノイズが上乘せされてしまっているのに対し、Fig.2.8 に示す差分信号では、きず信号以外の領域で出力信号がほぼ 0 になり、漏れ磁束等バックグラウンドの影響を取り除くことができ、きず信号のみを正確に取り出すことができた。

$BxDIF$ 信号はきずの中心で 0 になり、きず開口端付近で最大値、最小値を示した。従って、これによりきず中心の位置を知ることができる。また、きず開口幅のみが増加したとき、 Δp と $\Delta BxDIF$ は共に大きくなった。

Fig.2.9 に Δp ときず開口幅の関係をまとめたものを示す。この図より、 Δp

は、きず深さに関係せず、ほぼきず開口幅に比例することが分かった。すなわち、 Δp よりきず開口幅が評価できる。

Fig.2.10 は、 $\Delta BxDIF$ ときず深さの関係を示したものである。Fig.2.9 よりきず開口幅が求まるので、この図の関係により、きず開口幅毎に $\Delta BxDIF$ を用いきず深さが判断でき、 $\Delta BxDIF$ がきず評価に適していることが分かった。

2.3.4 角度を有するきずの評価

実際の裏面腐食部の形状は極めて複雑であるが、より現実の局部腐食の断面形状に近いものとして、Fig.2.11 に示すような開口端に角度をもつきずを対象に実験を行った。

Fig.2.11 は台形きずを有する試験片であり、板厚 5mm 又は 12mm、きず深さ 1、2、3、4mm 又は 2、4、6、8mm、台形きずの上底の幅は 30mm で、水平方向の角度 θ はそれぞれ 30、45、60、75、90 度である。

Fig.2.12 に台形きずの実験結果の一例を示す。これはきず角度を一定にした際のきず深さを変化させた実験結果である。 $\Delta BxDIF$ はきず深さと共に大きくなるが、 Δp は一定で、約 30mm であった。また、きず深さが同じ場合、台形きずの出力信号はきず角度に関係なく、90 度のきず(矩形きず)を有する試験片の出力信号とほぼ一致することが分かった。即ち、台形きずの Δp により、台形きずの上底の長さを判断できる。従って、きず開口幅をある程度の精度で評価できると考えられる。

Fig.2.13 は、台形きずの $\Delta BxDIF$ ときず深さの関係を示したものである。この図より、台形きずの $\Delta BxDIF$ もきず深さに比例することが分かった。台形きずは矩形きずと同様の評価方法で台形きず上底の長さがわかれば、この図により台形きずの深さが判断できる。この場合、結果的にはきず角度は無視されてしまうが、きず最大深度(上底)の開口端とその位置は判断することができる。また、 $\Delta BxDIF$ から、きず探傷において一番重要なパラメータである裏面

きずの最大深さの評価ができると考えられる。

2.4 信号処理によるきず信号検出感度の向上

きず形状を正しく評価するためには、きず信号検出感度を高める必要があるが、差分方式の信号処理法により得られたきず信号波形は、漏洩磁束密度の各成分の傾きを出力するものになる。従って、信号の強度そのものは減少し、ノイズの除去と同時にきず信号も一部分除去されてしまう可能性がある。そこで、測定信号から直接得られる B_x とその差分信号である B_xDIF 信号を掛け合わせることにより、出力信号がさらに明確になり、きず情報が強調できると考えた。このようにして得られた結果の一例を Fig.2.14 に示す。 $B_x \times B_xDIF$ 信号は、波形の対称性が非常に良く、かつ B_xDIF 信号より極めてシャープであった。また、 B_xDIF の場合と同様にきず信号以外の部分で出力信号がほぼ 0 になっている。 B_xDIF と比較して、各開口幅において、きず深さの増加によるきず信号の振幅の変化が大きくなり、信号波形もより鮮明になっている。従って、きずによる出力信号からきず検出がより明確にできると考えられる。

Fig.2.15 は、 $B_x \times B_xDIF$ の信号振幅値ときず深さの関係を示したものである。この図より、きず深さと $B_x \times B_xDIF$ の信号振幅値の対数の間に、近似な線形関係があった。また、 $B_x \times B_xDIF$ 信号はきず開口端で最大値、最小値を示し、信号のピーク間距離はきず深さに関係せず、きず開口幅に比例関係を持っている。これにより、 B_xDIF 信号と同様の評価方法できず開口幅が求めることが可能で、Fig.2.15 の関係よりきず深さが判断できる。

2.5 第2章の結論

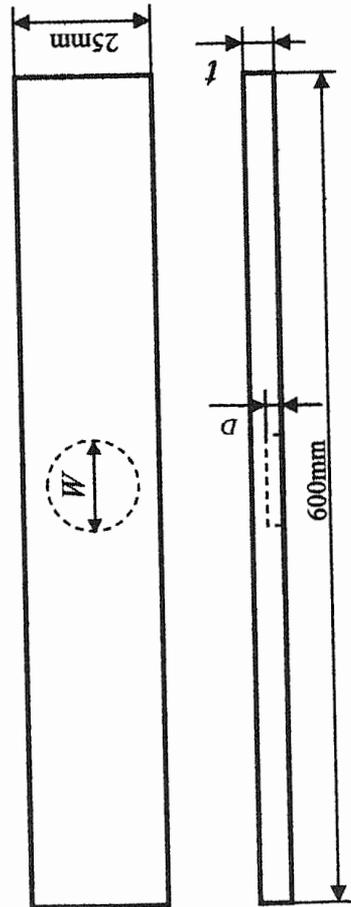
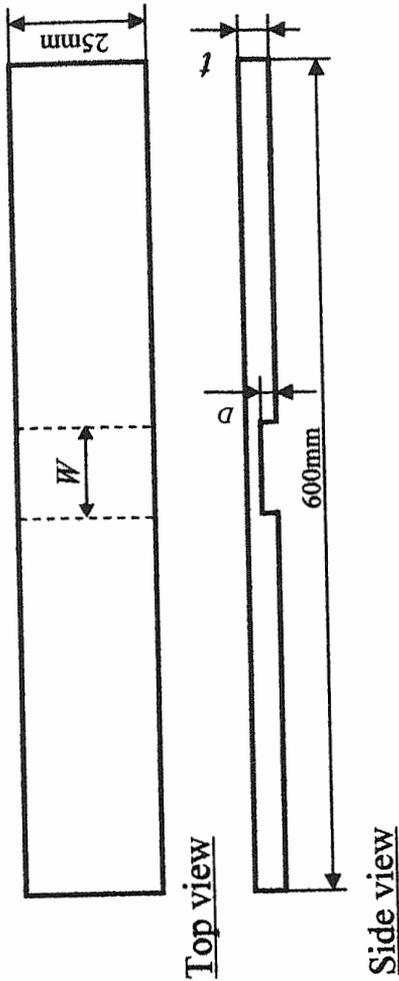
本章では、きず信号を連続的にデジタル値として処理する石油タンク底板裏面きずを対象とする評価システムを作製し、フィールドで問題となるバックグラウンドの影響を受けにくい差分信号処理法をきず信号に適用した。その結果、きずに対応する信号のみが正確に取り出せ、S/N比が向上することを示した。

また、far-side漏洩磁界の B_x 信号及び B_y 信号の差分値を計算し、 B_xDIF がきず開口幅及びきず深さの評価に適していることを見出した。また、より現実の局部腐食の断面形状に近い角度が有する台形きずに対しても、 B_xDIF を利用すれば定量的かつ簡易なきず評価が可能であることを示した。さらに、差分信号処理方法として空間微分法を併用することにより、極めてシャープなきず信号が得られることを明らかにし、精度の良い裏面きず評価が可能となることを示した。

第2章の参考文献

1. 関根 和喜, 日向 直之: 石油タンクの保安全管理技術の現状と課題, 圧力技術, Vol.35(6), pp.300-307, (1997)
2. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成9年度 石油タンクの耐震性と健全性評価に関する調査・研究, pp.3-194~3-202, (1998)
3. E. Altschuler, A. Pignotti: Nonlinear model of flaw detection in steel pipes by magnetic flux leakage, NDT& E International, Vol.28(1), pp.35-40, (1995)
4. D. M. Amos: Magnetic flux leakage as applied to aboveground storage tank flat bottom tank floor inspection, Materials Evaluation, Vol.54(1), pp.26-28, (1996)
5. K. Sekine, A. Iizuka: Improvement of the Magnetic Flux Leakage Signals for Far-side Defects of Ferromagnetic Specimens, Journal of the JSNDI, Vol.46(10), pp.748-751, (1997)
6. K. Hwang, S. Mandayam, S. S. Udpa, L. Udpa, W. Lord, M. Atzal: Characterization of gas pipeline inspection signals using wavelet basis function neural networks, NDT& E International, Vol.33(8), pp.531-545, (2000)
7. S. Mukhopadhyay, G. P. Srivastava: Characterization of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform, NDT& E International, Vol.33(1), pp.57-68, (2000)
8. G. S. Park and E. S. Park: Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage-Type Nondestructive Testing (NDT), IEEE Trans. Magn., Vol.38(2), pp.1277-1280, (2002)
9. S. Lukyanets, A. Snarskii, M. Shamonin and V. Bakaev: Calculation of magnetic leakage field from a surface defect in a linear ferromagnetic material: an analytical approach, NDT& E International, Vol.36, pp.51-55, (2003)
10. N. Kasai, K. Sekine, K. Nonaka: The Non-destructive Evaluation for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates by MFL Method, Proc. Japan-U.S. Symp. on Advances in NDT, pp.254-269, (1999)
11. 楊 旭, 笠井 尚哉, 関根 和喜: 差動型センサーを用いた far-side 漏洩磁束探傷法の基礎的検討, 第32回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.113-116, (1999)
12. 笠井 尚哉, 楊 旭, 関根 和喜: Far-side 漏洩磁束探傷法による鋼板裏面腐食の評価技術, 社

- 団法人日本非破壊検査協会保守検査特別研究委員会資料, pp.21-24, (1999)
13. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 10 年度 経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-84~3-103, (1999)
 14. K. Sekine, N.Kasai, H. Maruyama: The Non-destructive Evaluation Method for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates Using Magnetic Flux Leakage Technique, Proc.15th WCNDT, IDN100(6 pages), (2000)
 15. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 11 年度 経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-64~3-85, (2000)
 16. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 12 年度経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-80~3-104, (2001)



t (mm)	D (mm)	W (mm)
12.0	2	30.0
	4	30.0
	6	30.0
	8	30.0
5.0	1	30.0
	2	30.0
	3	30.0
	4	30.0

t (mm)	D (mm)	W (mm)							
		4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
12.0	2	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	4	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	6	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	8	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	1	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	2	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	3	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	4	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
5.0	2	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	4	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	6	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	8	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	1	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	2	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	3	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0
	4	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	20.0	20.0	20.0

Material: SS400 steel D : Flaw depth W : Flaw width t : Specimens thickness

Fig.2.1 Size of test specimens and flaws

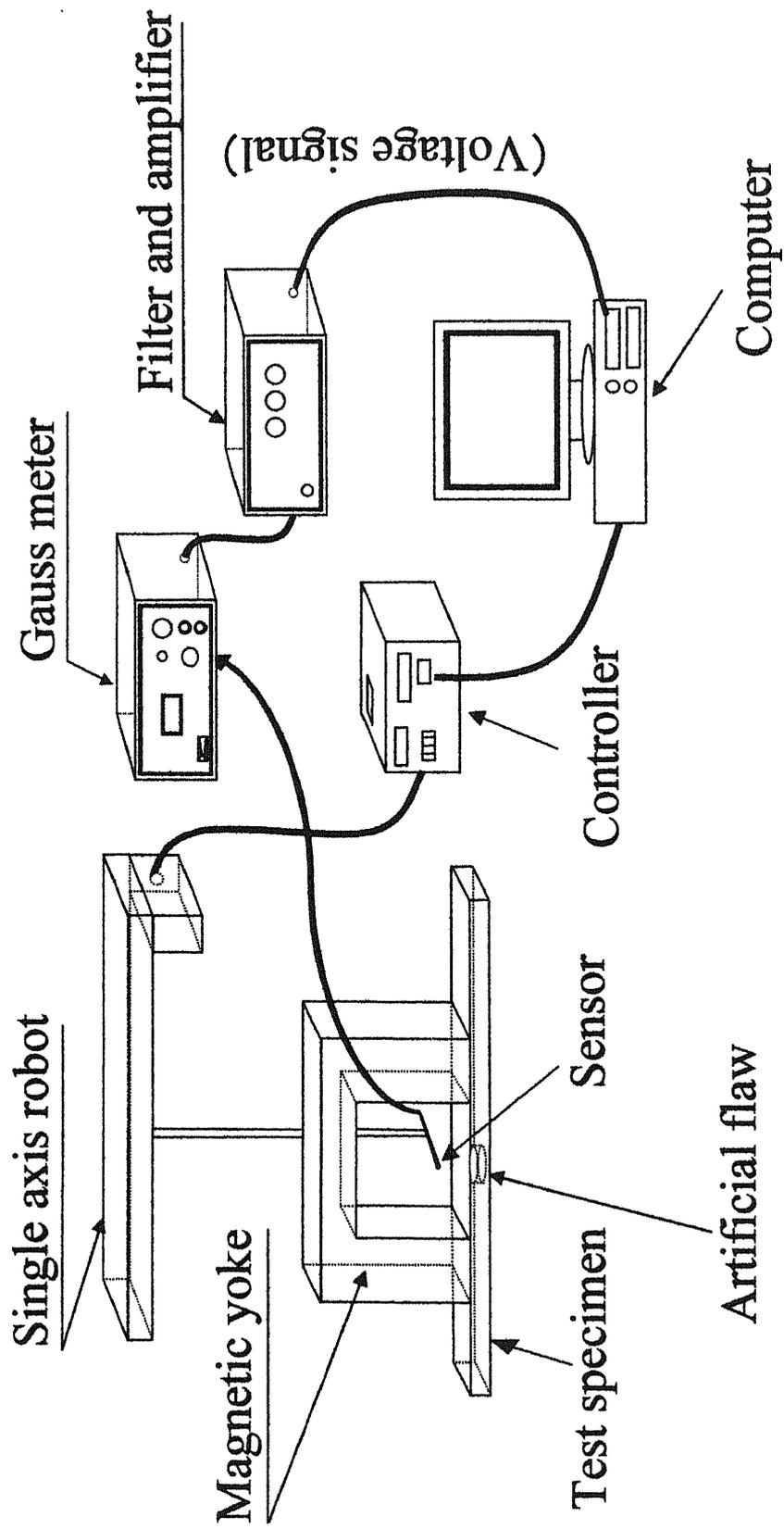


Fig.2.2 Experimental setup for the far-side magnetic flux leakage method

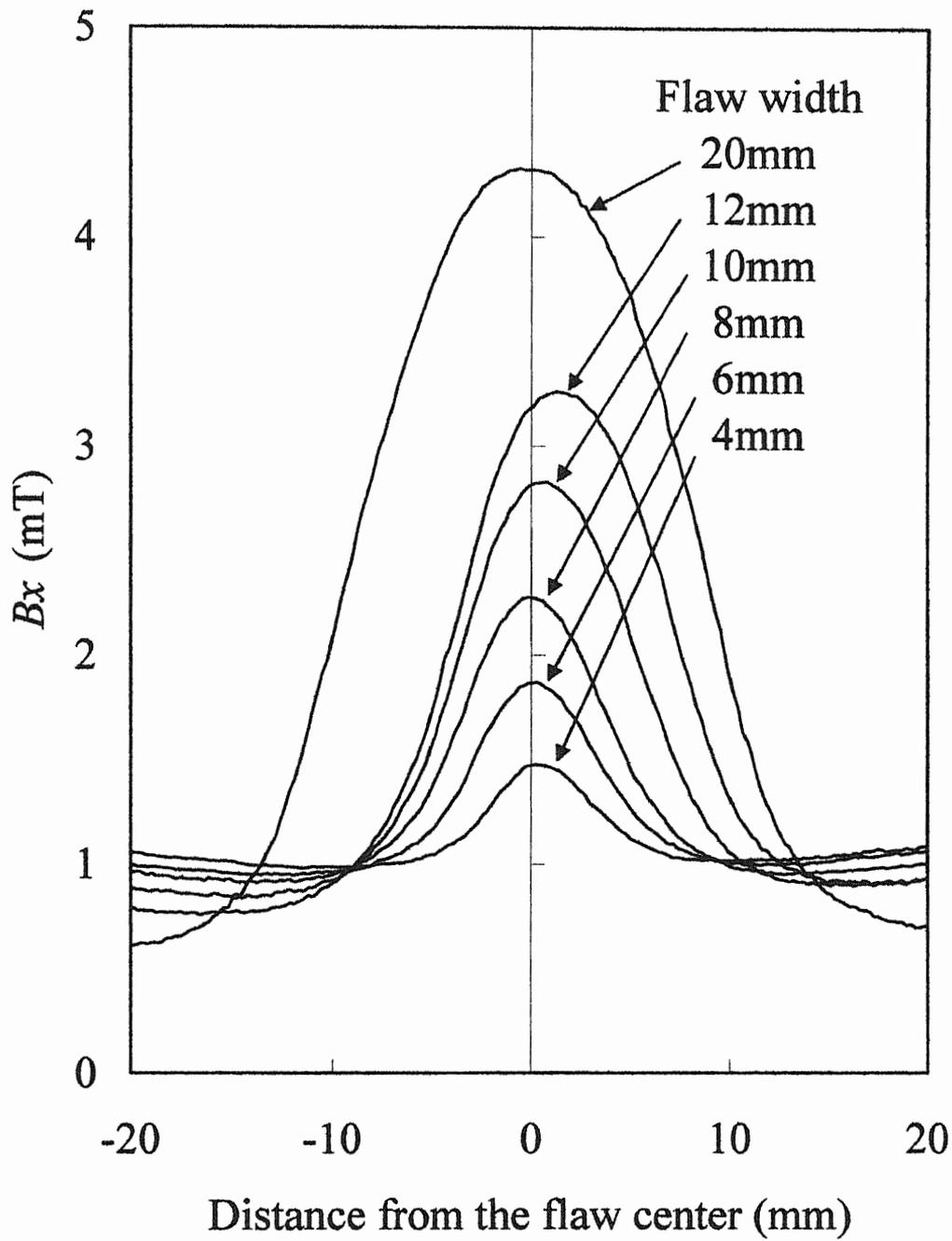


Fig.2.3 Horizontal component of magnetic flux leakage density

(Plate thickness: 5mm, Flaw depth: 3mm, Lift-off: 1mm)

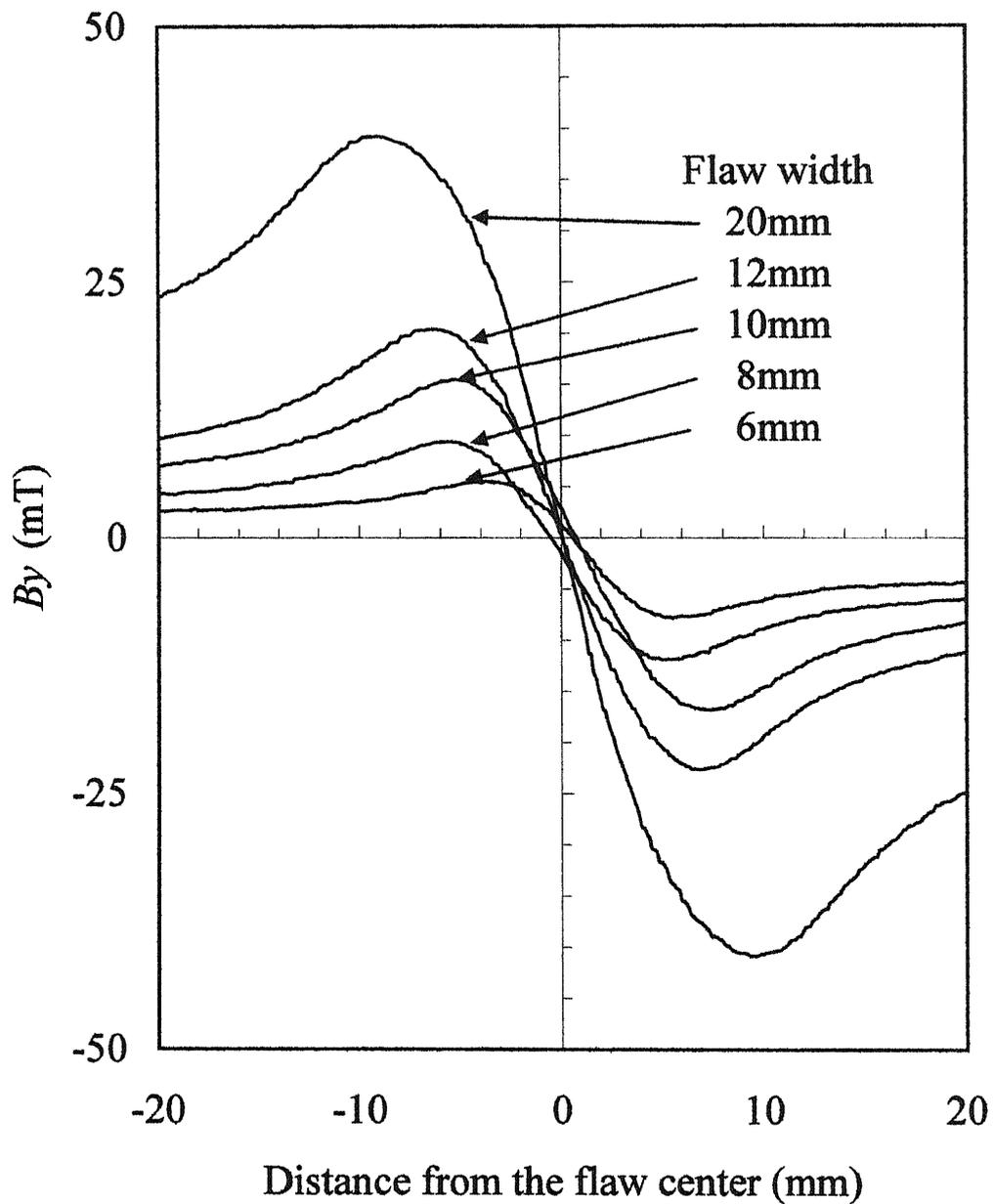


Fig.2.4 Vertical component of magnetic flux leakage density (Plate thickness: 12mm, Flaw depth: 8mm, Lift-off: 1mm)

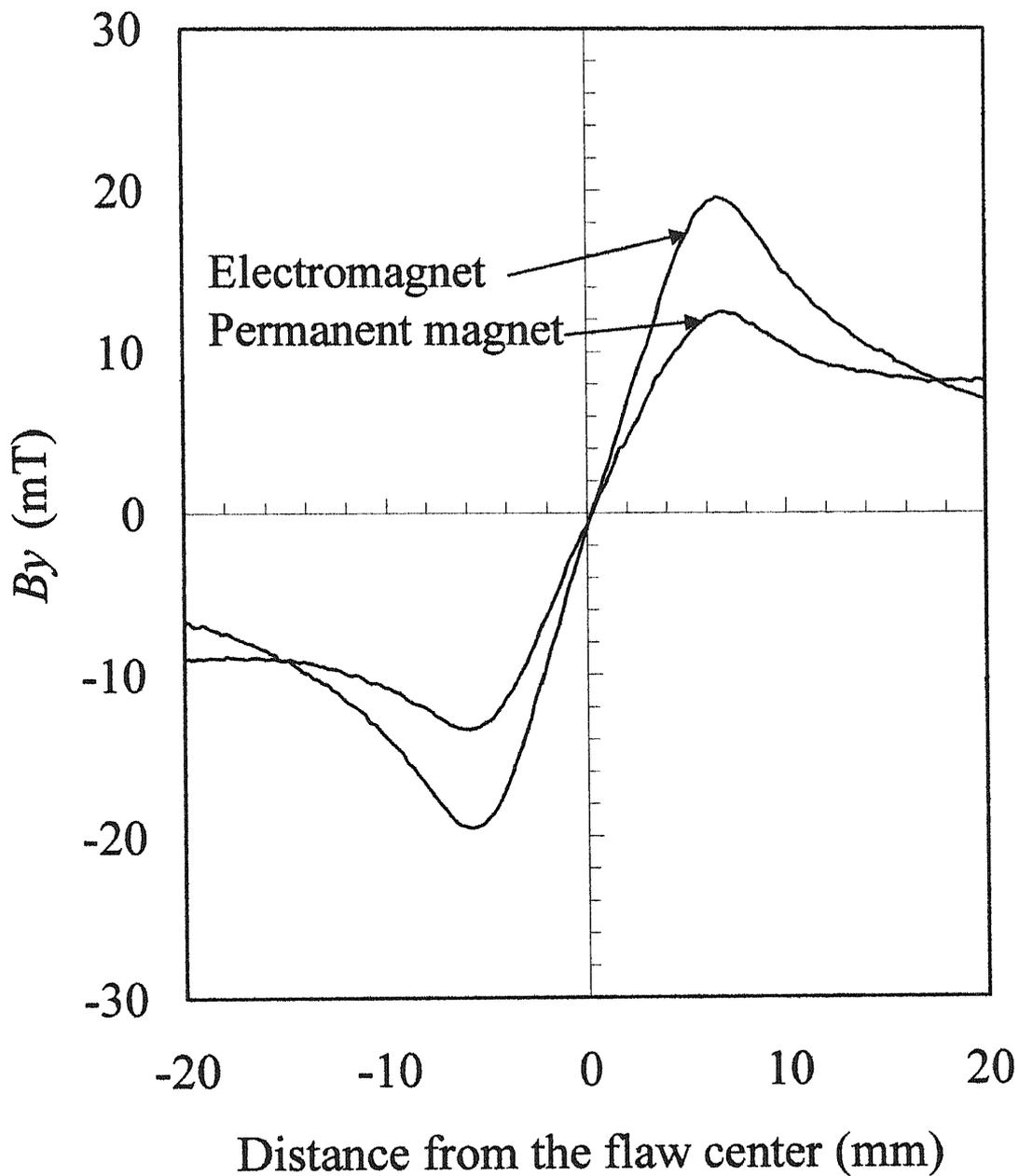


Fig.2.5 B_y of electromagnet and permanent magnet
 (Plate thickness: 5mm, Flaw width: 12mm,
 Flaw depth: 3mm, Lift-off: 1mm)

Differential signal: $B_x DIF = B_x S1 - B_x S2$, $B_y DIF = B_y S1 - B_y S2$

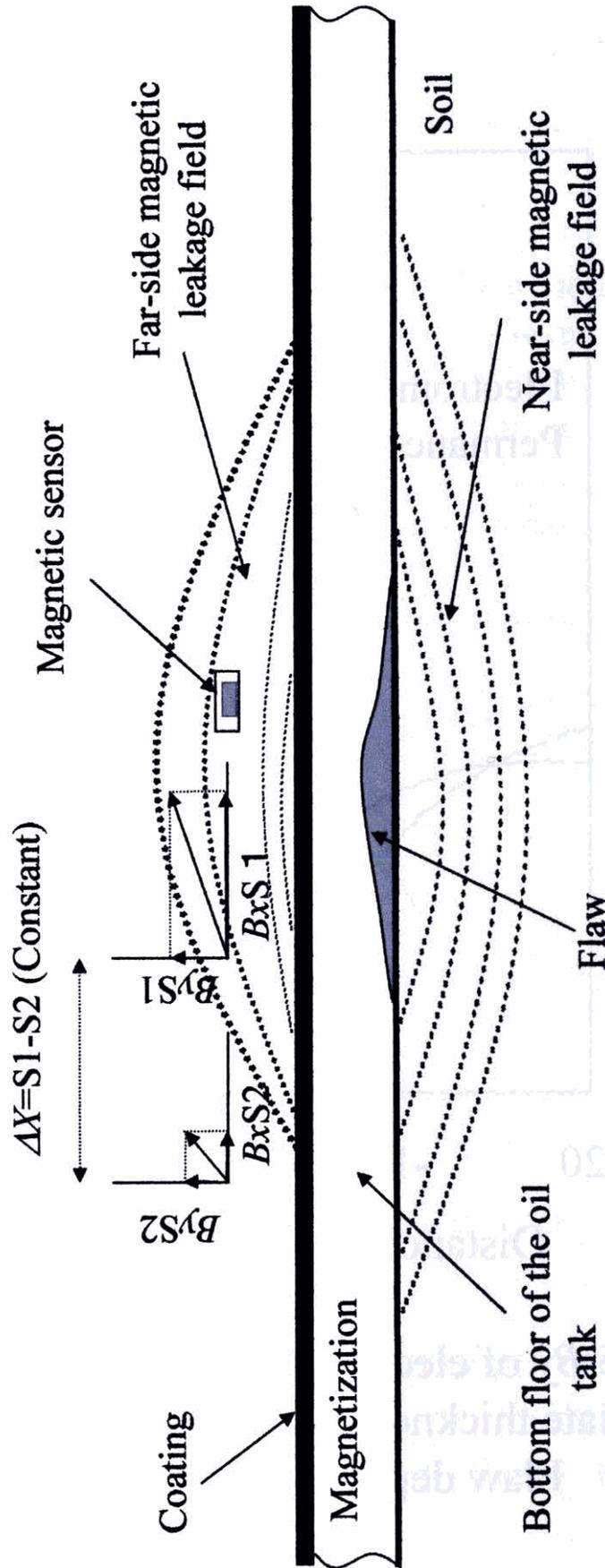


Fig.2.6 Definition of differential signal

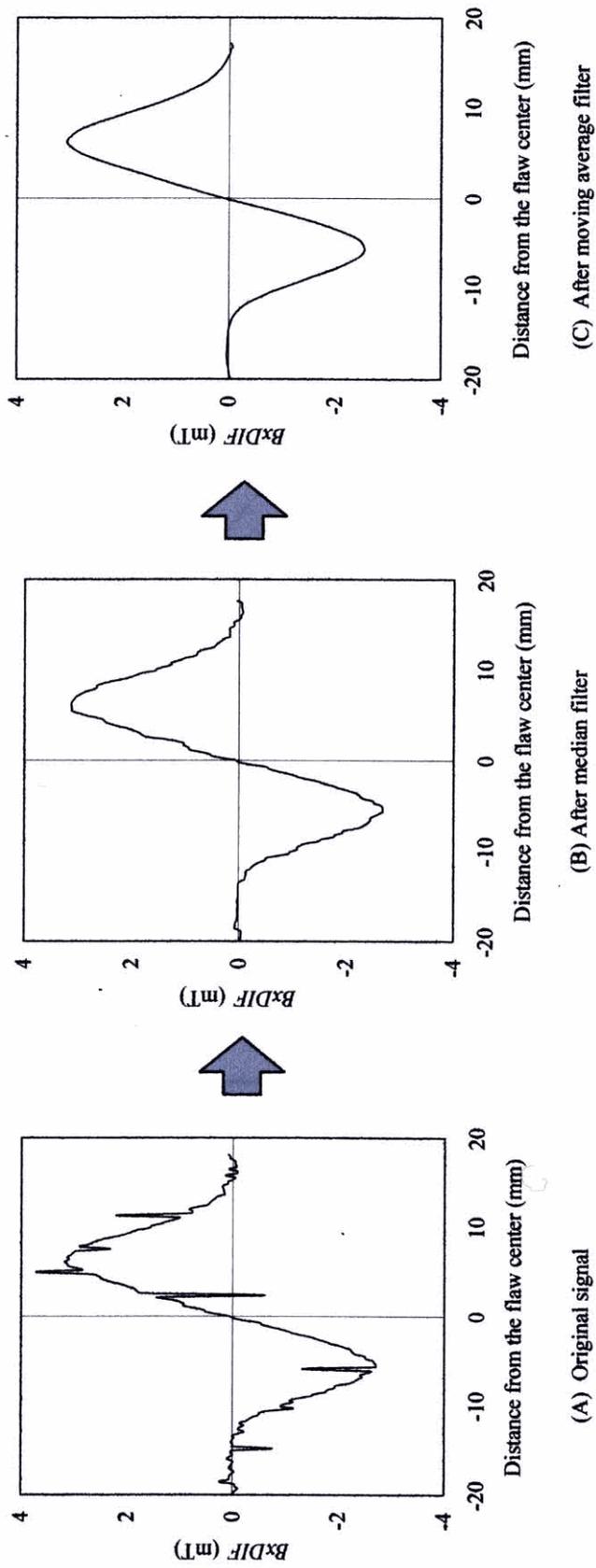


Plate thickness: 12mm Flaw width: 12mm Flaw depth: 6mm Lift-off: 1mm

Fig.2.7 Smoothing by digital filter

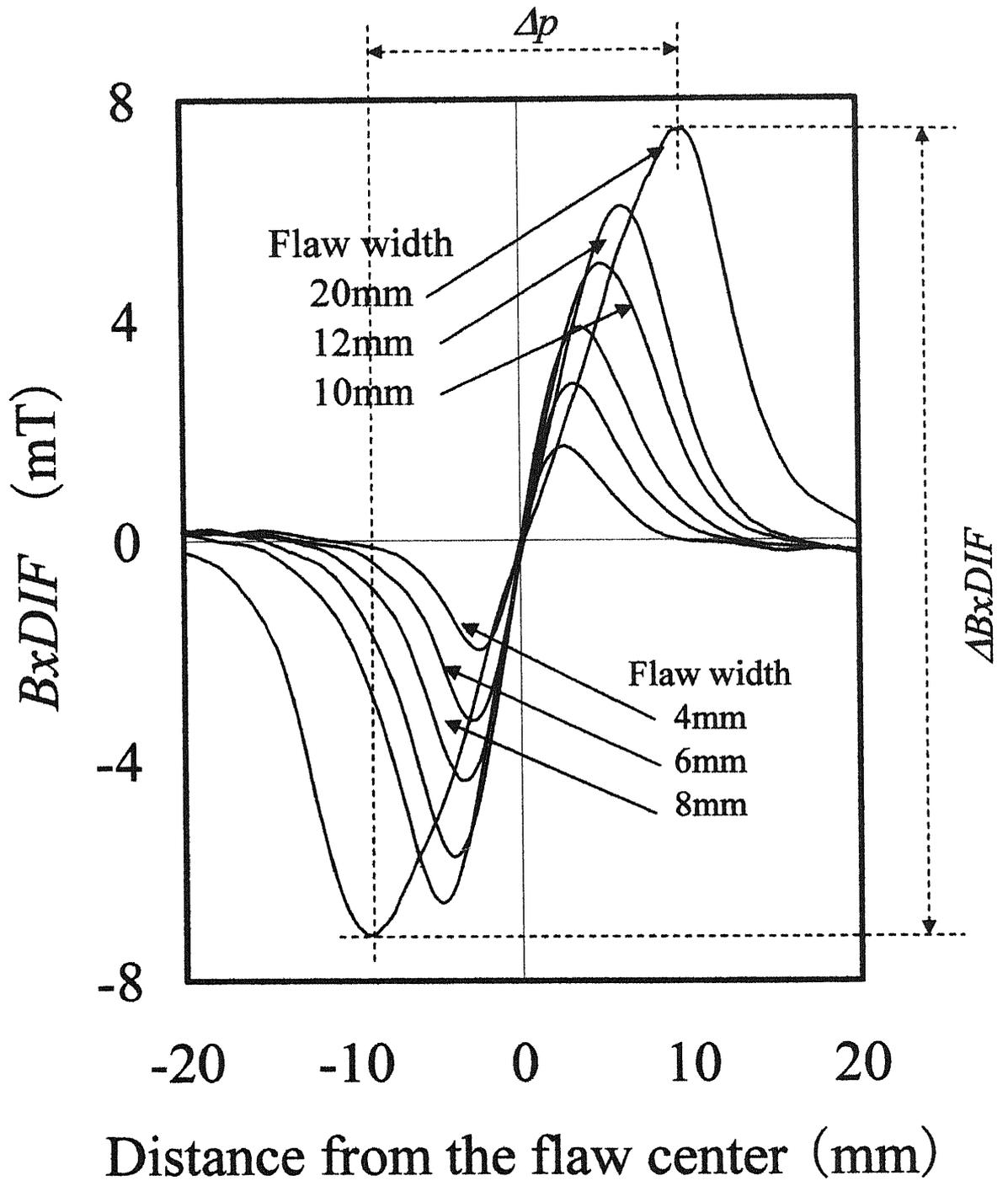


Fig.2.8 B_{xDIF} in this far-side MFL system
(Plate thickness: 5mm, Flaw depth: 3mm, Lift-off: 1mm)

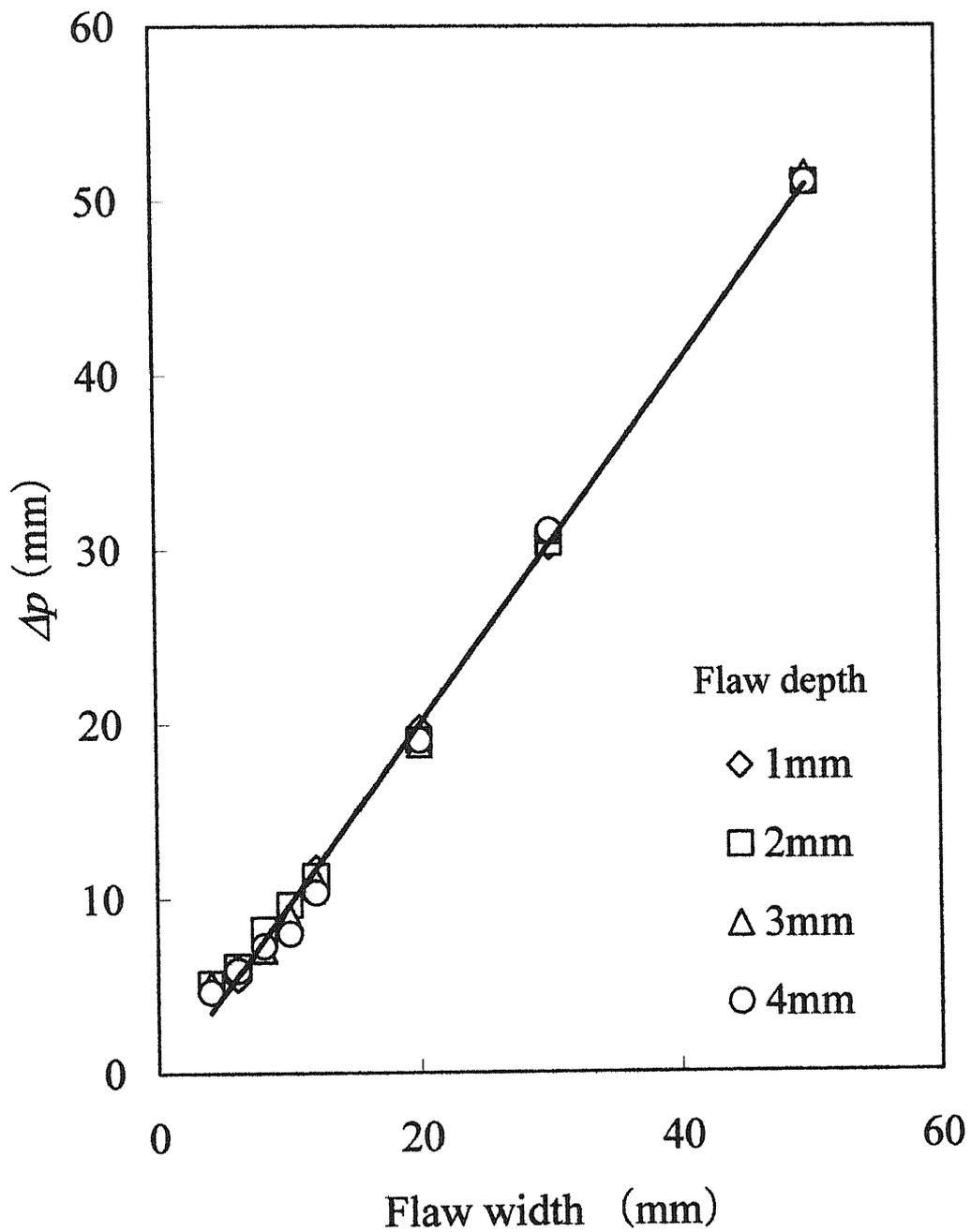


Fig.2.9 Relation between the flaw width and Δp
 (Plate thickness: 5mm , Lift-off: 1mm)

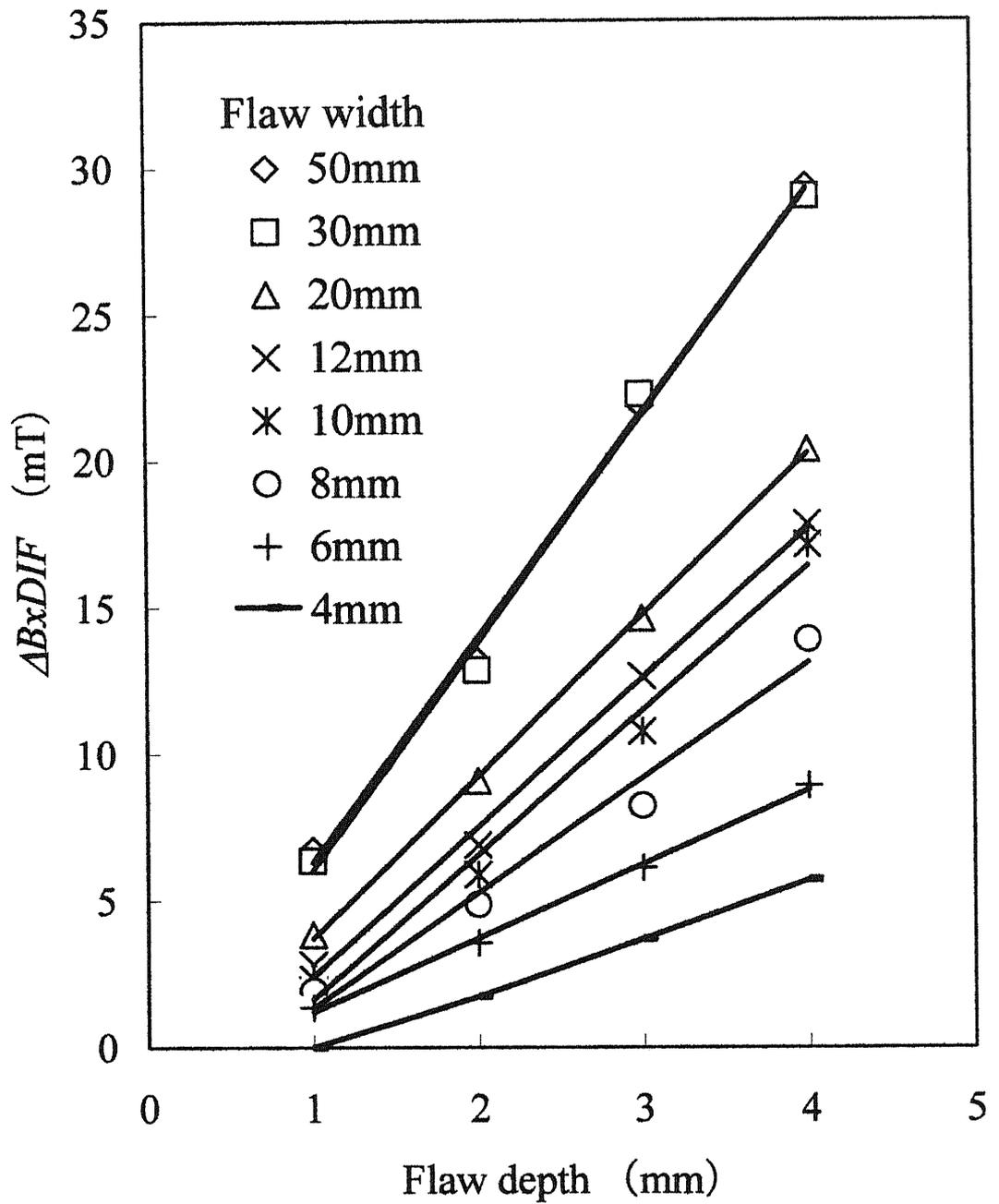
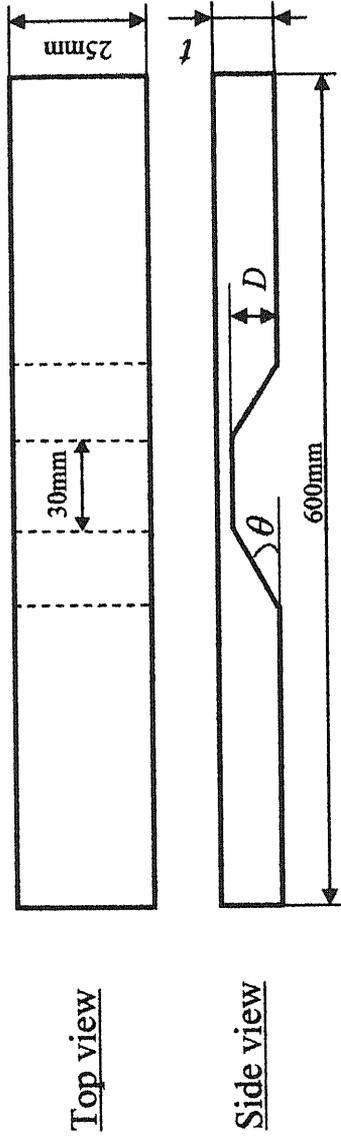


Fig.2.10 Relation between the flaw depth and $\Delta B \times DIF$
(Plate thickness: 5mm , Lift-off: 1mm)



t (mm)	D (mm)	θ (degrees)			
12.0	2	30	45	60	90
	4	30	45	60	90
	6	30	45	60	90
	8	30	45	60	90
5.0	1	30	45	60	90
	2	30	45	60	90
	3	30	45	60	90
	4	30	45	60	90

Material: SS400 steel D : Flaw depth t : Specimens thickness

Fig.2.11 Size of the test specimens and the trapezoidal flaws

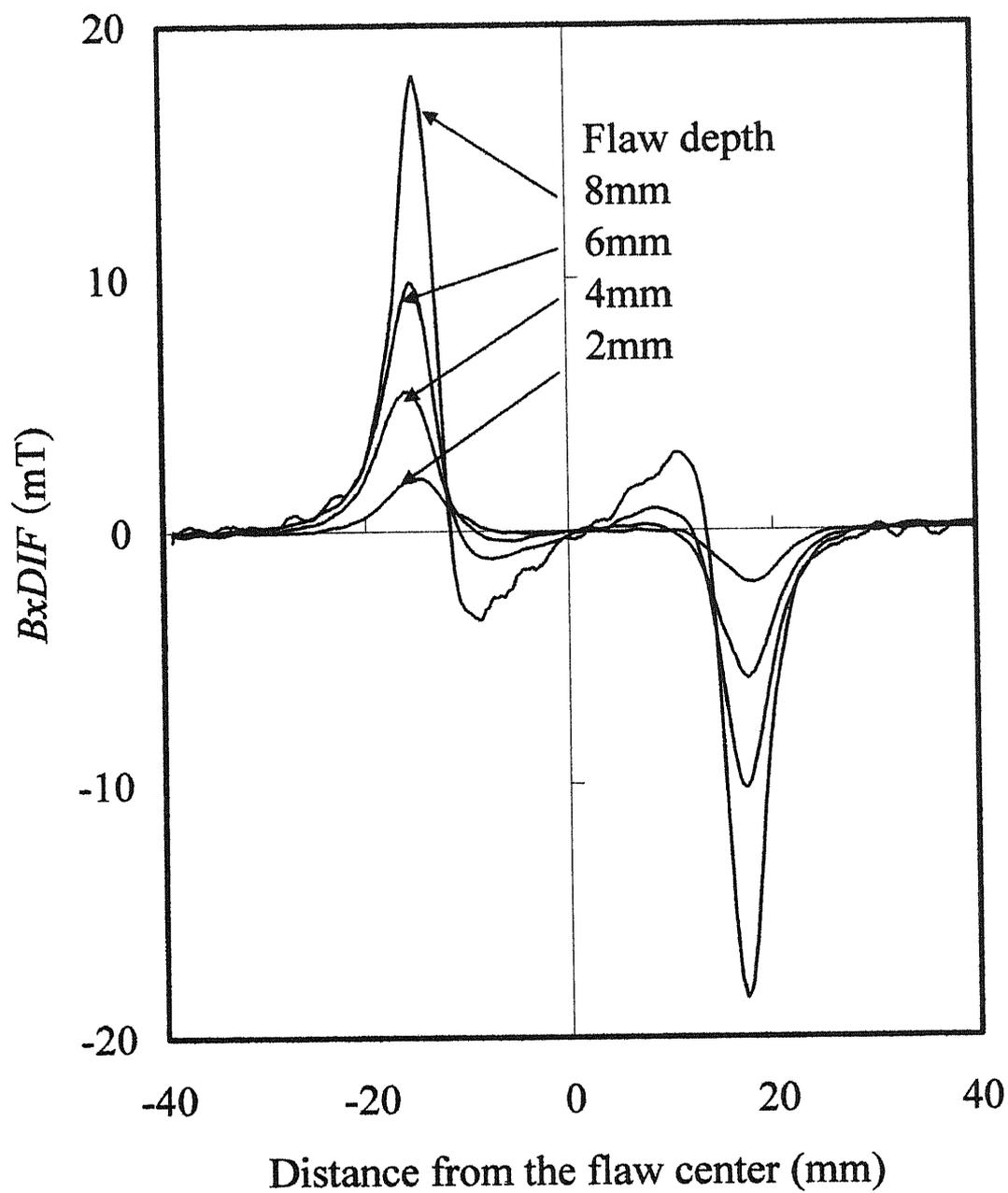


Fig.2.12 $BxDIF$ from trapezoidal flaws
 (Plate thickness: 12mm, Flaw angle: 60° , Lift-off: 1mm)

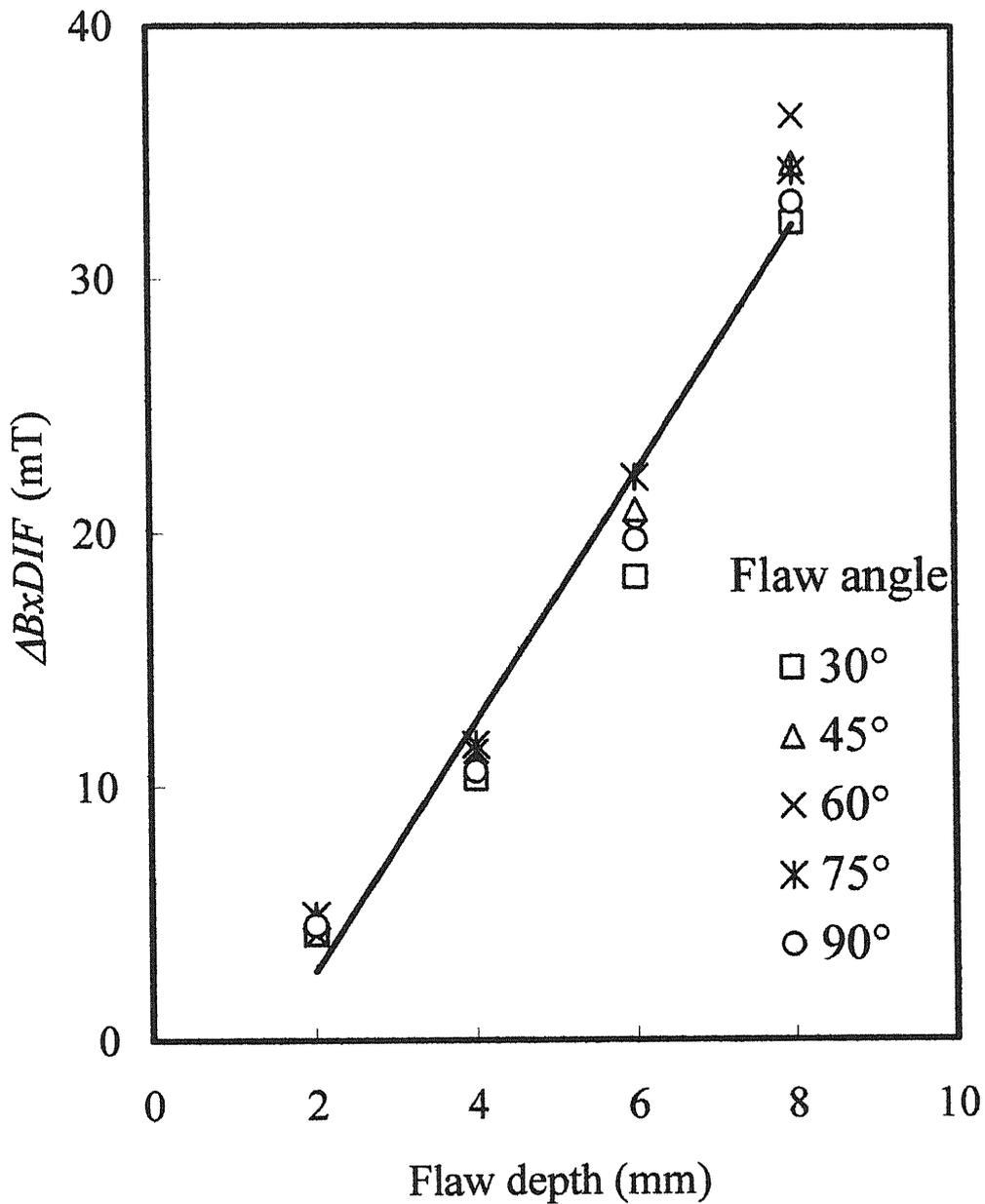


Fig.2.13 Relation between the flaw depth and $\Delta B \times DIF$ by trapezoidal flaws (Plate thickness: 12mm , Lift-off: 1mm)

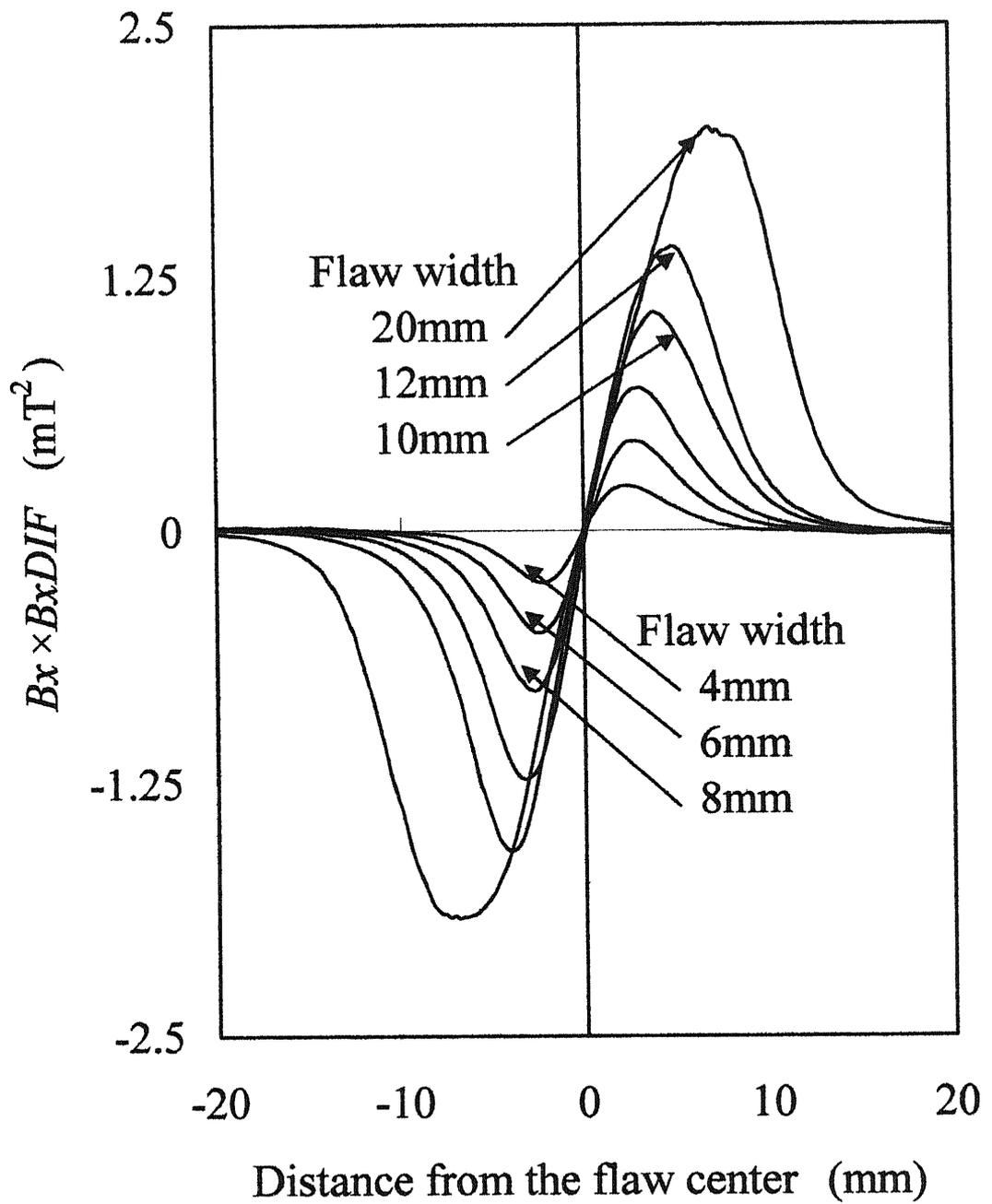


Fig.2.14 Distributions of $B_x \times B_x DIF$
 (Plate thickness: 5mm, Flaw depth: 3mm, Lift-off: 1mm)

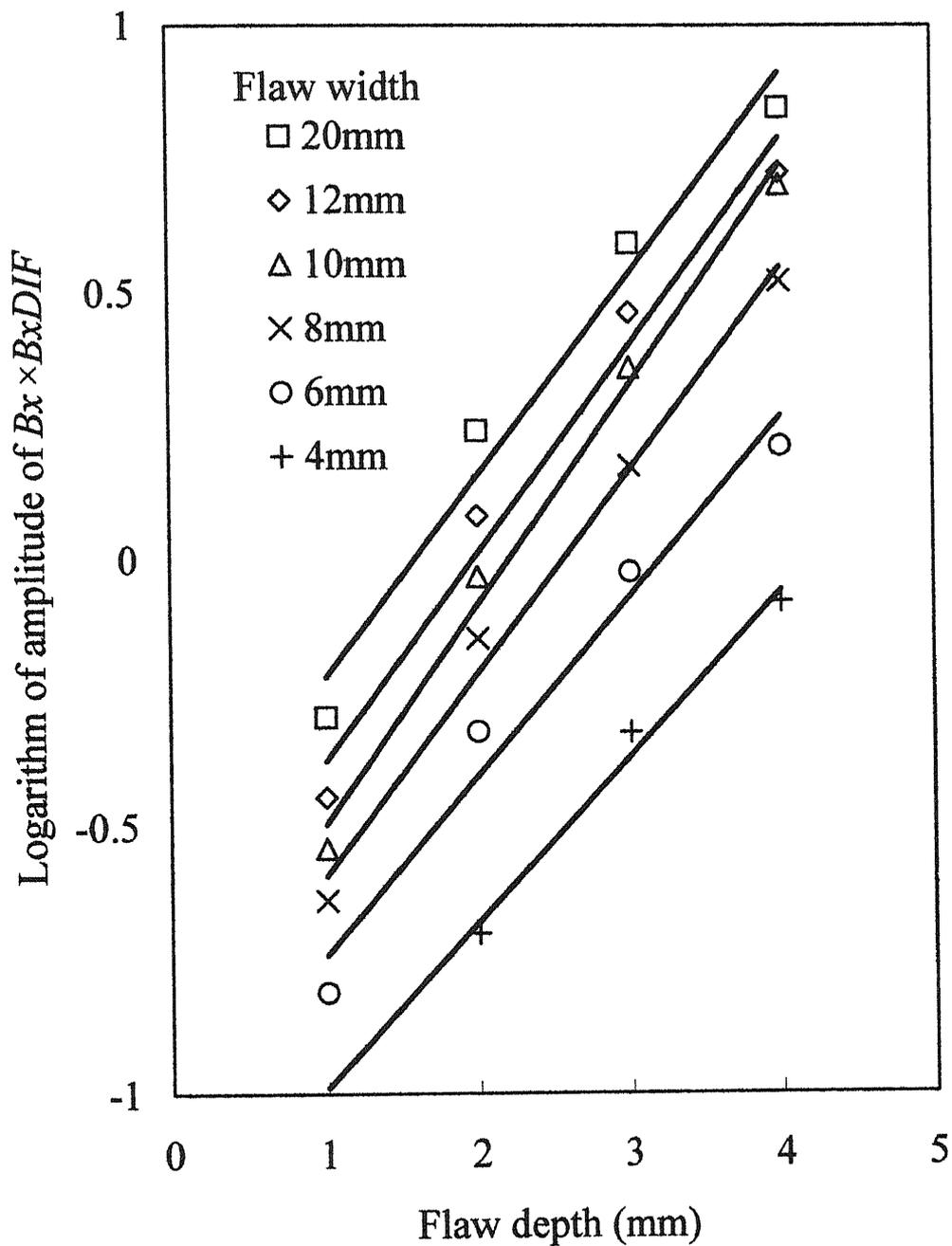


Fig.2.15 Relation between flaw depth and amplitude of $Bx \times BxDIF$
(Plate thickness: 5mm , Lift-off: 1mm)

第 3 章

ウェーブレット解析法によるきず検出精度 の向上

第3章 ウェーブレット解析法によるきず検出精度の向上

3.1 第3章の概要

Far-side 漏洩磁束探傷法を広大な実タンク底板の検査に適用する場合、直流磁化を用いるため底板は十分磁化されない可能性がある。このことはきず信号の S/N 比を低下させ、腐食検出精度に影響を及ぼすことになる。

従って、本章では有限要素法を利用して、鋼板中の内部磁場及びきずによる far-side 漏洩磁界を理論的に解析した。これらの得られた結果を基に far-side 漏洩磁束探傷法を現実のタンク底板に適用する場合の探傷条件の最適化を行い、実用化の可能性について検討した。また、離散ウェーブレット解析法を用い測定信号のきず位置情報に影響を与えない信号処理手法の適用を試みた。これによりきずに起因する信号のみを精度良く抽出し、しきい値の適用によって、より明確にきず信号が得られ、きず検出精度が向上することが分かった。また、 B_y を用いたきずの評価法を検討し、実際の石油タンクから切り出した約 1 平方メートルの実腐食の試験片に対して実験を行い、同様の手法によってきずを検出、評価できることを確認した。

3.2 有限要素法による磁場解析

Far-side 漏洩磁束探傷法における探傷システムのきず評価能力は、直接にこのシステムが選択した磁化方法に強く依存する。タンクの底板を飽和磁化させ、きずがある部分で磁束を有効に漏れ出されることが、高いきず検出能

を持つ探傷システムの基本条件である。つまり、探傷システムのきず検出能は試験対象物を直流磁化する強さに最も強く影響を受ける¹⁻²⁾。

本章では、まず有限要素法を使用して広大な鉄板の磁化状況のシミュレーションを行った。本章の解析には、式(1.11)、(1.12)を基礎方程式とした A - ϕ 法³⁾の解析ソフト MagNet6.08(Infolytica 社製)を用いた。また、本格的な解析に先立ち、得られた解析結果と実験結果を比較したところ、振幅の絶対値は異なるが、分布の形状には良好な類似性が認められることを確認した⁴⁻⁵⁾。

本解析において磁化モデルの対称性により、Fig.3.1 に示すような 1/2 モデルを使用した。試験片の幅は 390mm、厚さ 9mm とし、コーティングを 1 mm に設定し、磁化器は試験片の中央に配置した。この際、解析に用いた試験片は石油タンクと同一材質の SS400 鋼で、この SS400 鋼の磁化曲線はあらかじめ測定し、解析に用いた。解析モデルの試験片の裏面側に幅 10mm、深さ 5mm の溝状きずを設定し、本解析の場合では、磁化器のコイルに入力する電流値から電流密度 $J(\text{A}/\text{m}^2)$ を計算した。さらに、Fig.3.1 の Air box 表面の磁気ポテンシャル A を 0 とし、解析を行っている。本研究では、きずが存在する場合、存在しない場合について、磁化モデル中心位置(磁化器と平行)から磁束密度のデータを取り出した。

広大な実タンク底板に本手法を適用する場合、磁化器中央付近を飽和磁化させる必要がある。本研究では極間式磁化器を用いて、直流磁化したため、この磁化力は磁化器の起磁力、ヨークの間距離と断面積に大きく影響を受ける。ここで、まず極間式磁化器の各種パラメータの変化による、対象物に対する磁化能力について有限要素法で解析した。解析結果を Table 3.1 に示す。磁化器の起磁力が同じ場合、事前の予想通り、磁化器のヨーク間の距離は短いほど、断面積は大きいほど磁化器の磁化能力が高いことが分かった。この知見と市販の磁化器の仕様を検討した上で、本研究では市販の 5200AT の極間式磁化器(磁極間の距離：140mm、磁極の面積：25mm×25mm)を用いて試験片を飽和磁化させることを試みた。また、最適な磁化システムの構成について、さらに有限要素法を使用して検討を行い、磁化モデル中央位置の試験片内部の磁束密度の値を取り出した。これを Table3.2 に示す。この解析結果

により、一つの磁化器の磁化力では厚さ 9mm の試験片を飽和磁化させることはできなかった。しかし、四連の磁化器を用いた場合、Fig.3.2 に示すように磁化モデル中央位置の試験片内部の磁束密度は最大 1.30T となり、試験片にきずが存在する場合、きず上の試験片の内部の磁束密度は 1.46T になった。これは SS400 鋼の飽和磁束密度 1.60T の 90% 以上になり、漏洩磁束を発生させるのに十分な磁化を与えられることが分かった。

3.3 探傷システムの改良

3.3.1 採用した探傷システムと試験片

前節の有限要素解析結果を基に四個の磁化器を平行に置き、連続的に並べた探傷システムを作製した。作製した探傷システムには日本検査機材(株)製の極間式磁化器を用い、磁化器の仕様は解析したものと同様である。ここで、磁気センサとして、電子磁気工業(株)製ホール素子センサ(感磁面積： $0.75\text{mm}\times 1.5\text{mm}$)を用い、Fig.3.3 に示すように探傷システムの中央に設置した。

作製したきず評価システムを広大な石油タンクの底板に適用する場合、磁化器と磁気センサを共に移動させ、鉄板の裏面きずの検査を行う。しかし、試験片が磁化されている状態で磁化器を移動させるのは困難であるので、本研究では、Fig.3.4 に示すように、システムに組み込んだ信号源から発生した矩形波を制御信号とし、試験片を磁化しながら漏洩磁束信号の測定及び駆動装置による移動を交互に繰り返す探傷システムとした。つまり、制御信号が入力された際に、リレーにより磁化器に電流が流れ、試験片の磁化を行い、システムは漏洩磁束密度の測定を行う。制御信号が入力されていない場合は、試験片の磁化を行わず、磁化器とセンサを一定距離移動できる、実際タンクに対応可能なシステムを試作した。

用いた試験板のサイズは縦 400mm×横 1400mm×厚さ 9mm で、材質は SS400 鋼である。その裏面の中央に 100mm 間隔で、試験片の裏面に長さ方向を沿い、Fig.3.5 に示すように試験片厚さの 20%(1.8mm)、40%(3.6mm)、60%(5.4mm) の深さの円柱状の人工きずを施した。また、この試験片の表面には厚さ 1mm のスペーサーを置いた。これは実タンクに施工してあるコーティングを模擬したものである。

3.3.2 実験方法及び実験結果

先の試験板上で作製した探傷システムを移動させ、直流磁化しながら、試験板の表面側でホール素子センサにより、きずによる漏洩磁束密度の B_y 信号を測定した。きず信号はガウスメータのアナログ出力端子から、A-D 変換ボードを介してデジタル化し、パソコンに取り込み、その後ウェーブレット変換による信号処理を行った。

作製したシステムを使用して測定した結果の一例を Fig.3.6 に示す。この図において、人工きずに対応した位置に六つの典型的な点対称な双極型の B_y 信号がある。また、きず信号の振幅はきず開口幅、深さの増大と共に大きくなることが分かる。すなわち、この測定信号からもきずの位置及び信号の振幅値の大きさにより、きずサイズの大小を相対的に評価することは可能である。

しかし、測定の際に得られたベースラインが 0 にならず、この測定信号において多くの高周波と低周波のノイズが含まれている。低周波ノイズ(バックグラウンドノイズ)は試験片の厚みの微小変化、局所的な材質の構造変化又は磁気センサの位置の変化等から生じたもので、高周波ノイズは磁化器からの漏れ磁界及びその他の装置から生じたものと考えられる。また、きず番号 3、4、5 により得られた出力信号はほぼノイズに埋れ、このままではきずサイズを正確に評価することは難しい。従って、これらのノイズを取り除く信

号処理手法を検討した。

3.4 ウェーブレット解析法を用いた信号処理手法の検討

実タンク上で検査する場合には測定条件は過酷となり、漏洩磁束も弱くなる。さらに、磁気的なノイズが多数存在し、信号の S/N 比が小さくなると考えられる。そこで、信号処理方法が重要となる。

きず信号の信号処理方法の選択において、きず信号とノイズ信号の強度の差が大きい場合、デジタルフィルタなどの適用が有効であるが、きず信号とノイズ信号のレベルが同等となることが予想される実タンク上での検査では、信号の S/N 比が小さいため、FFT などの信号処理法を行う必要がある。フーリエ解析法は信号を種々の周波数の正弦波に分解し、信号の中にその周波数成分がどのくらい含まれるかを示し、時間領域の信号から周波数領域の信号への変換する方法である。そのため、時間情報が失われ、局所的に変化する信号が生じる位置を知ることができない。従って、Fig.3.6 に現れているようなノイズを取り除き、きずに起因する信号のみを精度良く取出すために、本研究では、時間情報と周波数情報を両方得ることができる、ウェーブレット解析法を適用することを試みた。

ウェーブレット解析は、マザーウェーブレットのシフト及びスケーリングしたものを用い、対象信号の中にこれらのマザーウェーブレットがどのくらい含まれているかを示すものである。ウェーブレット解析は急激に変化する信号が存在する場合、その信号が存在する位置、つまりその局所性を検出するのに有効である⁶⁻¹¹⁾。さらに、測定信号のきず位置情報に影響を与えない解析が可能で、局所的なきず信号の信号処理に対応できると考えられる。

ウェーブレット解析法による、信号処理手法の概要を Fig.3.7 に示す。元の信号 S は、マザーウェーブレットにより解析すると、二つの信号 A 及び D

として出力される。 A は信号の低周波成分、 D は信号の高周波成分に対応する。つまり、 D には本研究での測定信号の高周波ノイズ成分が多数含まれると考えられる。つまり、信号 S はこのウェーブレット解析により、信号とノイズに分解される。分解して得られた低周波成分である A 信号に対して、スケーリングしたマザーウェーブレット(中心周波数を変化させたマザーウェーブレット)を使用し、この操作をさらに繰り返し(操作の繰り返し数をレベル数と呼ぶ)、連続的に分解すると、Fig.3.7の下段に示されるように一つの信号が、多重レベル分解能をもつ成分に分解される。このウェーブレット分解結果を調べることにより、潜在する重要な情報が得られることになる。

Meyer マザーウェーブレットは対称性を有し、きず信号の波形と類似しているため、本研究では離散 Meyer ウェーブレット解析法を用いた。Meyer マザーウェーブレット関数は周波数領域の波形から逆フーリエ変換を通して定義され、式(3.1)はこの Meyer マザーウェーブレットのフーリエ変換の定義式である¹²⁻¹³⁾。

$$\left\{ \begin{array}{ll} \hat{f}(\omega) = 0 & |\omega| \geq 4\pi/3 \\ \hat{f}(\omega) = 1 & -2\pi/3 \leq \omega \leq 2\pi/3 \\ \left| \hat{f}(\omega - \pi) \right|^2 + \left| \hat{f}(\omega + \pi) \right|^2 = 1 & 2\pi/3 \leq |\omega| \leq 4\pi/3 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

そこで、Fig.3.6に示した測定信号を離散 Meyer ウェーブレット分解によってレベル8まで分解した。その結果をFig.3.8に示す。 $D1$ と $D2$ は、振幅が非常に小さい高周波成分から構成されている。これらは主に高周波ノイズと考えられるので、 $D1$ と $D2$ は取り除くことにした。 $A2$ は高周波成分をほとんど含まず、きず信号と少量の低周波ノイズである。また、緩やかな波形である $A8$ は低周波成分のバックグラウンドノイズと考えられる。従って、 $A2$ 信号からこの $A8$ 信号を除くこととした。

以上のような処理を行い再構成した信号をFig.3.9に示す。このような信

号処理により再構成した信号は、高周波ノイズと低周波のバックグラウンドノイズが少ない信号波形となった。これをウェーブレット解析(分解と再構成)を行うことで、きず情報だけの出力信号を得ることができた。つまり、低い分解レベルで高周波ノイズを取り除き、高い分解レベルにおいて低周波のバックグラウンドノイズを除去することができた。しかし、ノイズ処理した信号においても、Fig.3.9 にみられるようにまだ多数の小さい擬似きず信号が残っている。

最終的な出力信号はできるだけノイズを取り除き、きずに起因する信号波形のみを取り出す必要がある。そこで、Fig.3.9 に示した再構成信号から、これらの擬似きず信号をカットするために、さらにしきい値を適用することにした。現行の消防法において測定物の板厚に対し20%の深さの腐食を検出すべきという事により、本研究では一例として本システムの検出限度である開口幅8mm、深さ20%(1.8mm)のきずの振幅値をしきい値に設定した。Fig.3.9 に示した再構成信号にしきい値処理を施した出力信号をFig.3.10 に示す。この図より設定した深さ20%のきず信号より大きいきず信号のみを明確に得られることが分かった。実際に実タンク底板の検査にこのような信号処理を用いる場合、検出すべき最小のきず信号を考慮してしきい値を設定し、これより小さい擬似信号を測定信号から取り除けば良い。

3.5 きずの定量的評価

3.5.1 人工きずの評価

Fig.3.10 に示した測定信号のピーク値の x 座標は円柱状きずの開口端の位置に、信号の中心の x 座標はきずの中心位置に対応した。また、Fig.3.10 に示すようにきず信号のピーク間距離を ΔP と定義した。この ΔP ときずの

開口幅は、Table3.3 に示すようにほぼ同じであることが分かっている。従って、この ΔP よりきずの開口幅が評価できる¹⁴⁻²⁰⁾。

きず信号の振幅はきず開口幅及び深さの増大と共に大きくなる。従って、この二つのパラメータの積であるきず断面積に注目し、きず信号の振幅値と1から9までの人工きずの断面積(きずの断面積=円柱状きずの直径×きずの深さ)の関係を整理した。この結果を Fig.3.11 に示す。Fig.3.11 より、信号の振幅値はきずの断面積に比例することが分かった。きず信号の振幅値からきずの断面積が求められ、信号のピーク間距離からきずの開口幅が判断できる。従って、きず深さを定量的に評価することができる。つまり、測定物の板厚とリフトオフ量に相当するコーティングの厚さが一定であれば、振幅ときず断面積の比例関係、また ΔP ときず開口幅の関係からきず深さの評価が可能である。また、異なる板厚・リフトオフ量の場合も、きず断面積と振幅の比例関係の検量線を求めれば、きずのサイズを評価することができる。

3.5.2 実腐食への適用

人工きずは開口端のエッジ形状が 90° であるが、実際の底板裏面腐食部の形状は極めて複雑であり、残存肉厚も緩やかに変化する。従って、人工きずに対して適用した手法が現実の腐食きずに対しても有効かどうかを、実験で検証した。Fig.3.12 に示した腐食損傷のある実タンク底板の一部分を切り出した試験対象板について、提案した far-side MFLT の探傷システムを用いて探傷実験を行った。その結果を Fig.3.13 に示す。Fig.3.13(A)は探傷システムから直接出力したきず信号であり、Fig.3.13(B)はウェーブレット解析法を用いて信号処理したきず信号である。両者を比較すると、先程と同様な手法でノイズを取り除くことができた。

また、精度 0.1mm の超音波板厚計測により得られた実腐食部の減肉形状

プロフィールを Fig.3.13(C)に示す。これにより、底板の裏側に三つの腐食きずがあることが分かる。一方、Fig.3.13(B)の出力信号では二つのきず信号が検出されている(図中の三本の点線により分ける)。これは、図中で 1 と 2 で示した腐食きずが近接しているため、分離することができず 1 つの出力信号となって表れたからと考えられる。

図中の二本の一点鎖線が示すように実腐食の最大深度の位置は出力きず信号波形の中心(点对称な波形の原点)に対応し、実腐食の最大深度の位置を知ることができる。また、実腐食の場合、きず開口端は緩やかであるために、きずの開口端の位置は出力信号の極値に対応しないが、実腐食の範囲を相対的に判断することは可能と考えられる。1、2 の腐食と比べ 3 の腐食の方が開口幅、深さ共に大きい。従って、実腐食についても、3 の腐食に対してのきず信号の振幅は大きいものとなり、測定信号の振幅の大きさからきずの大小が相対的に評価できることが分かった。

次に、開口端のエッジが 90°の試験片の実験から得られた知見と同じく、その腐食の断面積と出力信号の振幅値が比例することを検証することにした。超音波板厚測定において得られたデータから実腐食の断面積を求め、その断面積ときず信号の振幅値の関係を整理した。これを Fig.3.14 に示す。プロット点は少ないが両者に比例関係があることが分かった。つまり、出力信号の最大振幅値から腐食の断面積を知ることができる。また、実腐食の断面形状は三角形に近似できる場合が多い。従って、実腐食の断面形状を三角形に仮定すれば、腐食の範囲とその断面積から、最大深度を判断できる。つまり、実腐食に対しても腐食の範囲を判断でき、最深部分の位置と深度を定量的に評価することができる。

3.6 第3章の結論

有限要素法を用いて磁化器中央部の磁束密度分布を理論的に解析することを試みた。得られた結果に基づき far-side 漏洩磁束探傷法を現実のタンク底板に適用する場合のものとして磁化器を四つ連続的に並べた探傷システムを作製した。これと石油タンク底板を想定した面積の広い試験板を用いて実験を行い、測定信号に離散ウェーブレット解析法を適用し、きずに起因する信号を精度良く抽出することができた。さらに、しきい値の適用によってより明確にきず信号を得られ、きず検出精度を向上させることができた。

本研究で作製したシステムが厚さ 9mm の試験片の 20%減肉量までのきずを検出した。また、本システムを用いてきずの範囲と最大深度を定量的に評価する手法を提案することができた。

実際の石油タンクから切り出した試験片を用いた実験によって、きずを検出できることを確認した。得られた測定信号に対して、提案した信号処理及びきず評価手法を適用し、きず開口端で緩やかに変化する実腐食に対しても同様の手法によってきずサイズの定量的評価に有効であることが分かった。

異なる板厚、lift-off 量ときずの形状、サイズを持つ試験片への実験することによって、対応できるデータベースを生成させる。未知のきず検査が与えられる場合、それはいつも最も近いデータベースを使用し、腐食の特徴を明らかにすることができると考えられる。

第3章の参考文献

1. G. S. Park and E. S. Park: Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage-Type Nondestructive Testing (NDT), IEEE Trans. Magn., Vol.38(2), pp.1277-1280, (2002)
2. S. Lukyanets, A. Snarskii, M. Shamonin and V. Bakaev: Calculation of magnetic leakage field from a surface defect in a linear ferromagnetic material: an analytical approach, NDT& E International, Vol.36, pp.51-55, (2003)
3. 中田 高義, 高橋 則雄: 電気工学の有限要素法, 森北出版, pp.13-15, (1982)
4. N. Kasai, K. Sekine, H. Maruyama: Influence of corrosion products on magnetic flux leakage signals in inspection of Far-side metal-loss defects in oil storage tank bottom floors, Journal of the JPI, Vol.47(1), pp.19-24, (2004)
5. 笠井 尚哉: Far-side 漏洩磁束探傷法に関する基礎的研究, 横浜国立大学博士論文, pp.44-46, (2003)
6. S. Mandayam, L. Udpa, S. S. Udpa and W. Lord: Wavelet-based permeability compensation technique for characterizing magnetic flux leakage images, NDT& E International, Vol.30(5), pp.297-303, (1997)
7. S. Mukhopadhyay and G. P. Srivastava: Characterization of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform, NDT& E International, Vol.33, pp.57-65, (2000)
8. M. M. Afzal and S. Udpa: Advanced signal processing of magnetic flux leakage data obtained from seamless gas pipeline, NDT& E International, Vol.35, pp.449-457, (2002)
9. J. C. Lázaro, J. L. San Emeterio, A. Ramos and J. L. Fernández-Marrón: Influence of thresholding procedures in ultrasonic grain noise reduction using wavelets, Ultrasonics, Vol.40, pp.263-267, (2002)
10. R. Draï, M. Khelil and A. Benchaala: Time frequency and wavelet transform applied to selected problems in ultrasonics, NDT& E International, Vol.35(8), pp.567-572, (2002)
11. M. A. Rodríguez, J. L. San Emeterio, J. C. Lázaro and A. Ramos: Ultrasonic flaw detection in NDE of highly scattering materials using wavelet and Wigner-Ville transform processing, Ultrasonics, Vol.42, pp.847-851, (2004)
12. 榊原 進: ウェーブレット ビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, pp.9-40, (1995)
13. 芦野 隆一, 山本 鎮男: ウェーブレット解析, 共立出版, pp.41-58, (1997)
14. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 9 年度 石油タンクの耐震性と健全性評価に関する

- る調査・研究, pp.3-194~3-202, (1998)
15. N. Kasai, K. Sekine, K. Nonaka: The Non-destructive Evaluation for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates by MFL Method, Proc. Japan-U.S. Symp. on Advances in NDT, pp.254-269, (1999)
 16. 楊 旭, 笠井 尚哉, 関根 和喜: 差動型センサーを用いた far-side 漏洩磁束探傷法の基礎的検討, 第 32 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.113-116, (1999)
 17. 笠井 尚哉, 楊 旭, 関根 和喜: Far-side 漏洩磁束探傷法による鋼板裏面腐食の評価技術, 社団法人日本非破壊検査協会保守検査特別研究委員会資料, pp.21-24, (1999)
 18. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 10 年度 経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-84~3-103, (1999)
 19. K. Sekine, N. Kasai, H. Maruyama: The Non-destructive Evaluation Method for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates Using Magnetic Flux Leakage Technique, Proc.15th WCNDT, IDN100(6 pages), (2000)
 20. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 11 年度 経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-64~3-85, (2000)

**Table 3.1 Analytical results on magnetic flux density
by finite element method (I)**

Electromagnet		Internal magnetic field (T) (No flaw existed)
Section of yoke (mm)	Distance between yokes (mm)	
30 × 30	140	0.73
25 × 25	120	0.62
25 × 25	140	0.58

Table 3.2 Analytical results on magnetic flux density
by finite element method (II)

Number of electromagnets	Magnetic flux density (T)	
	No flaw existed	Flaw existed
1	0.58	0.64
2	0.92	1.09
4	1.30	1.46

Table 3.3 Relation between the flaw width and ΔP

Flaw depth (mm)	1.8			3.6			5.4		
	Flaw width (mm)	8	15	30	8	15	30	8	15
ΔP (mm)	12	16	28	12	16	30	12	16	30

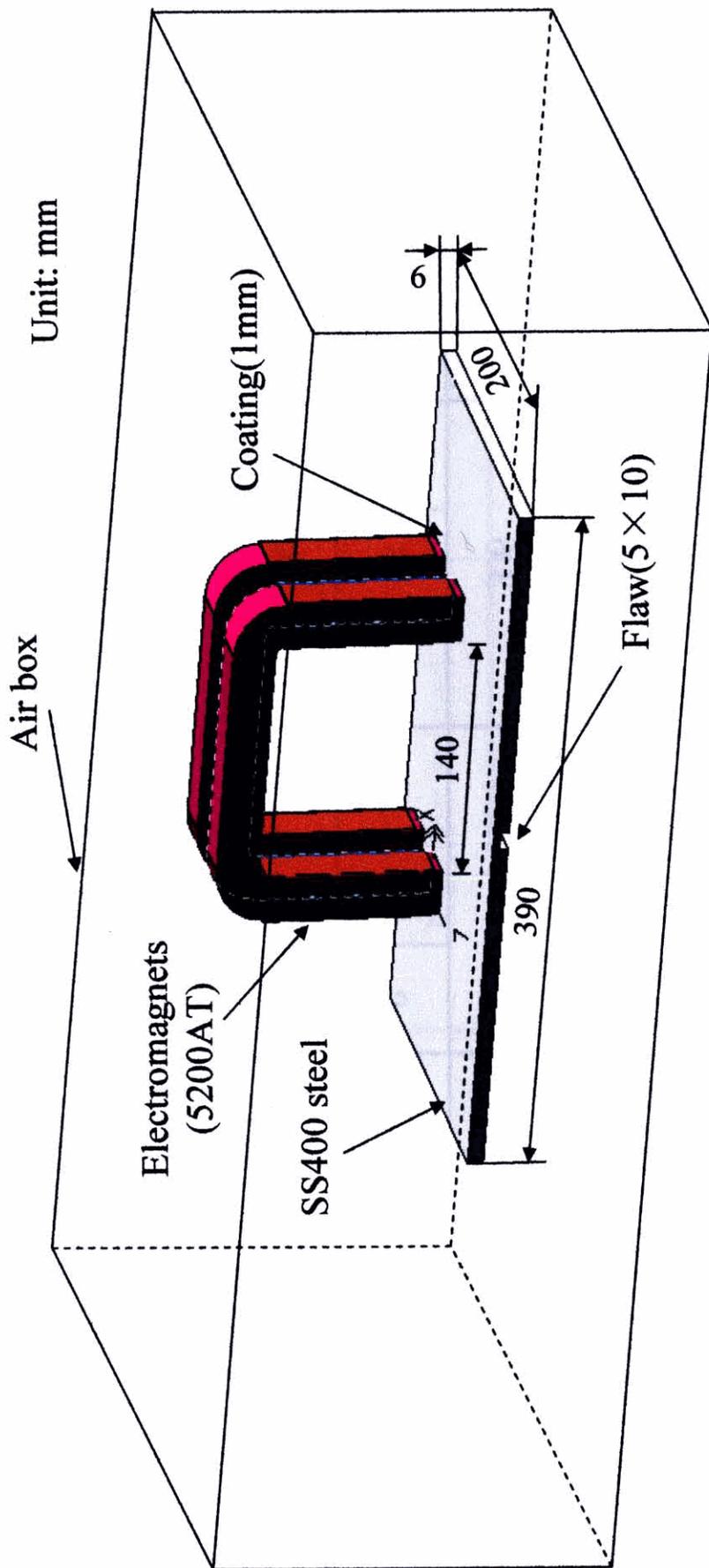


Fig.3.1 Magnetization modeling for finite element calculations

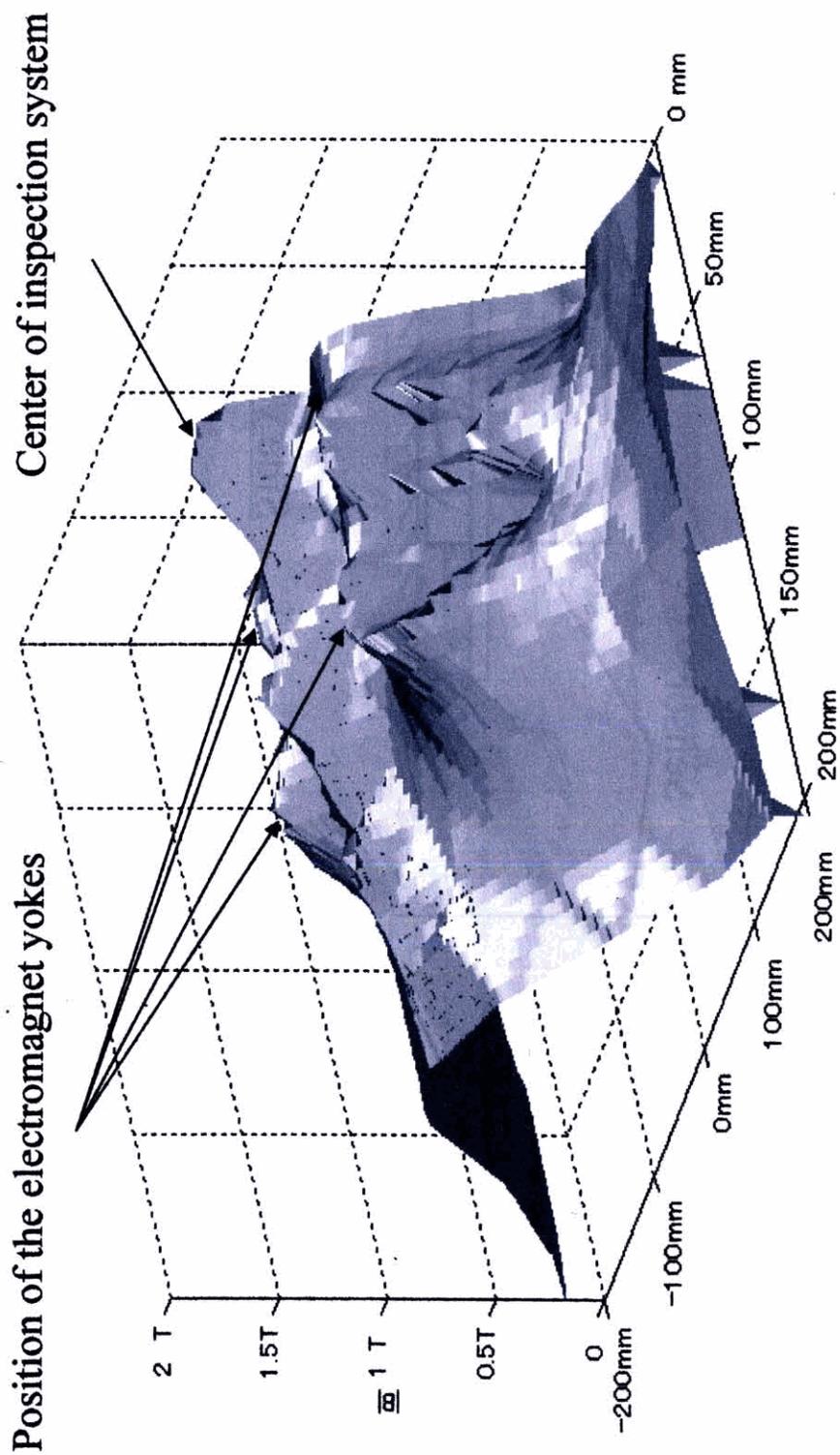


Fig.3.2 Analytical results of $|B|$ by finite element method

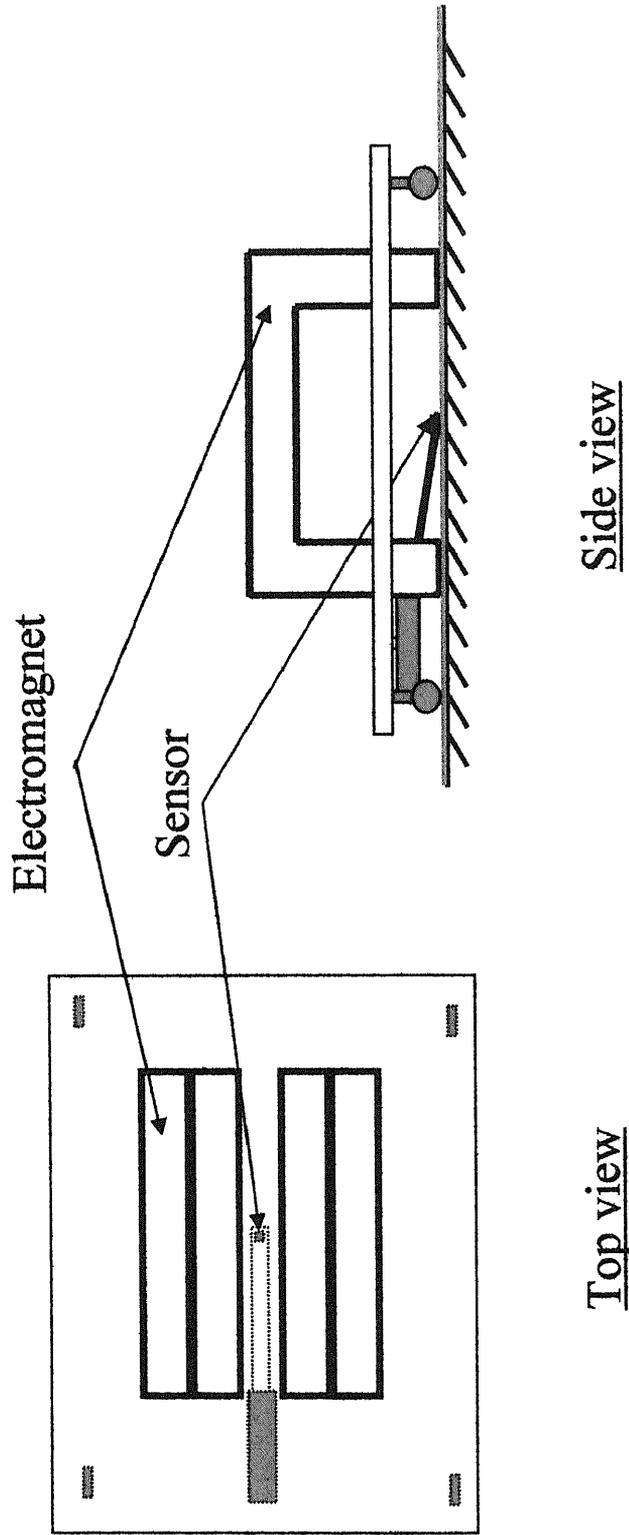
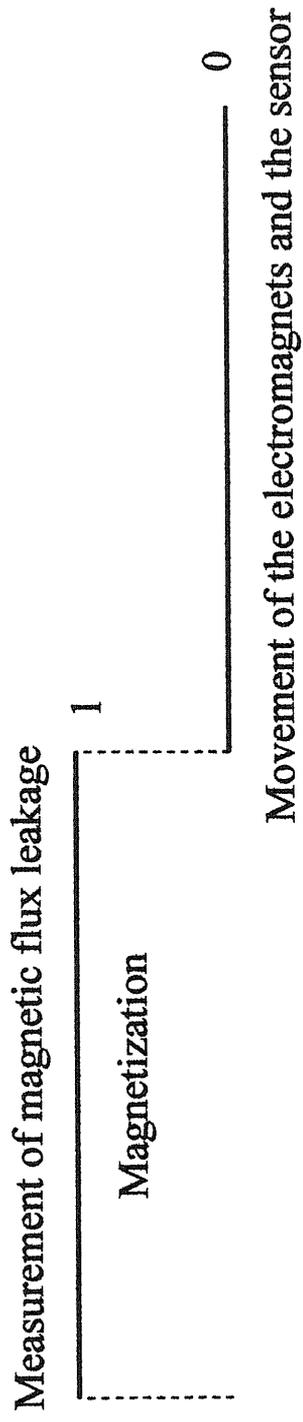
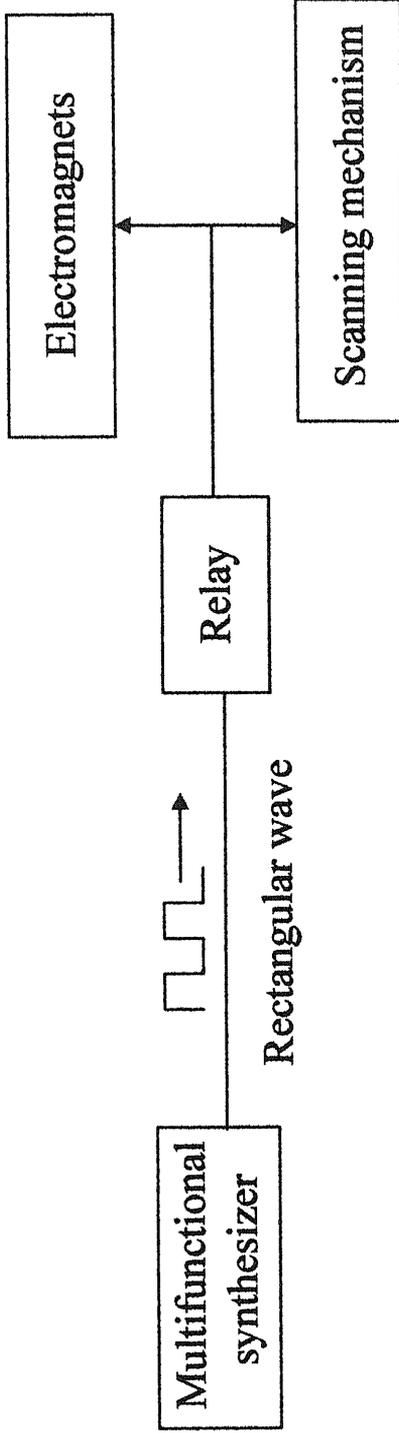


Fig.3.3 Configuration of magnetic sensor and magnetization yokes in the inspection system



Rectangular wave

Fig.3.4 Control of inspection system by rectangular wave

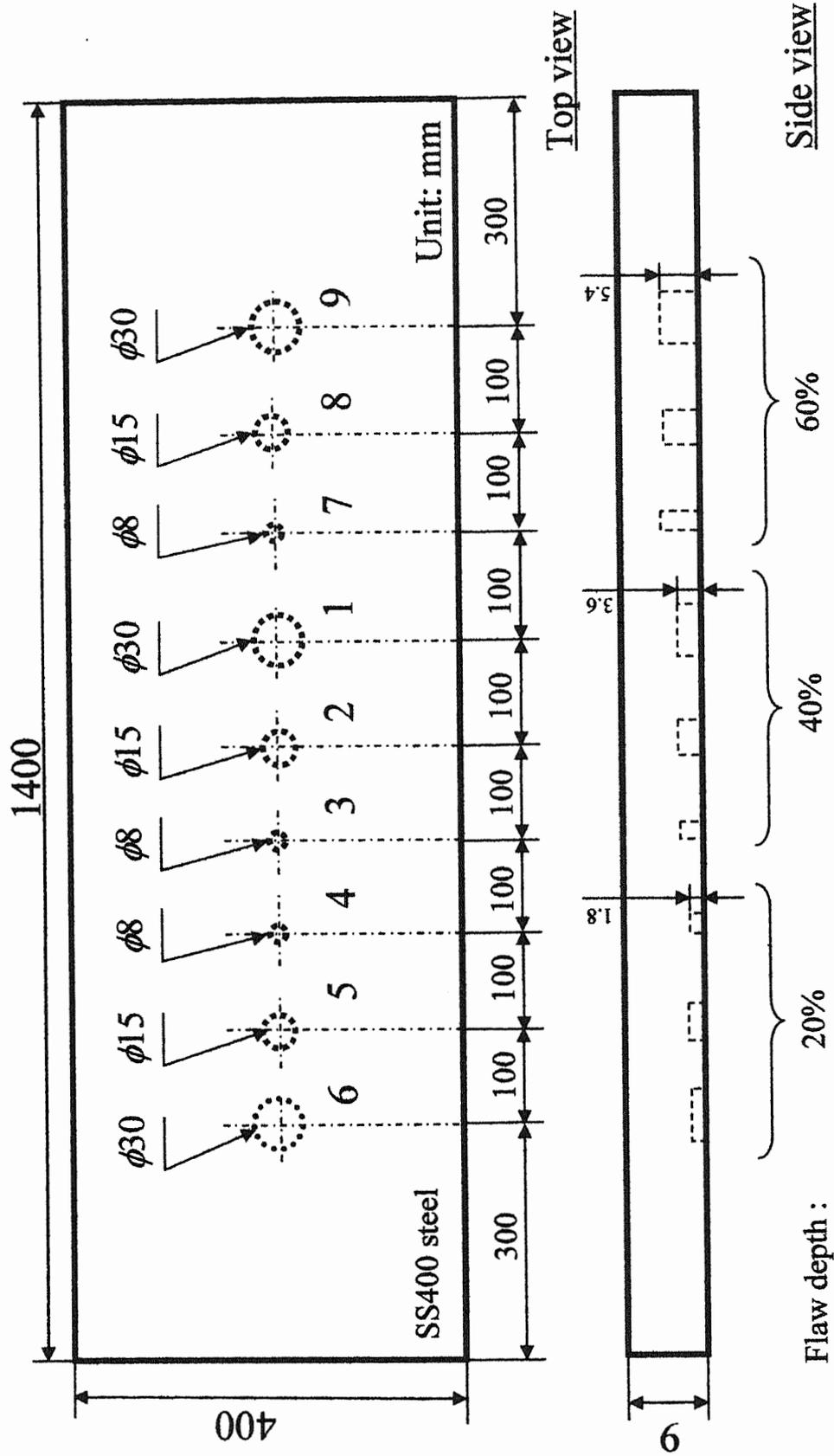


Fig.3.5 Specimen and sizes of artificial flaws

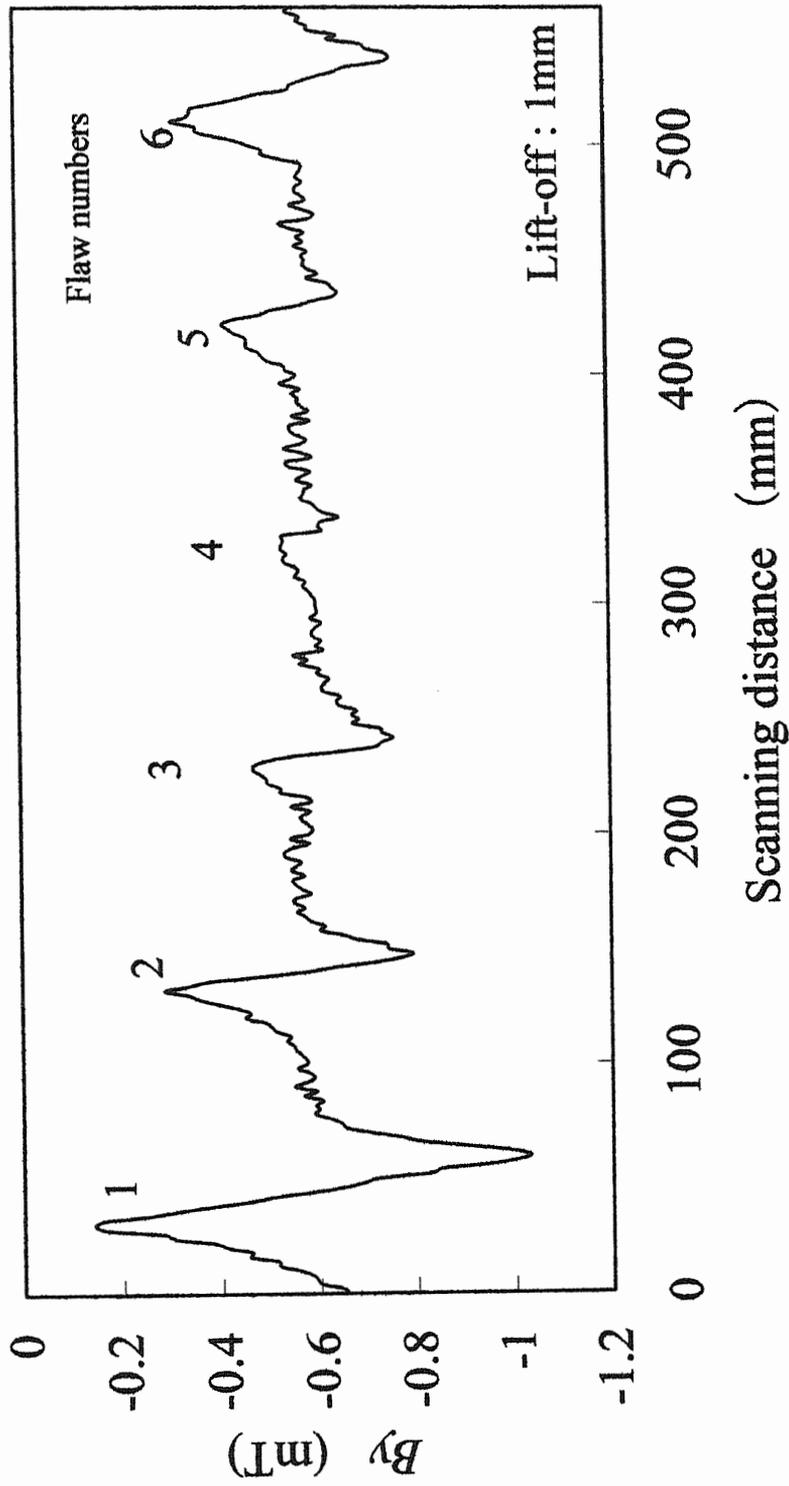
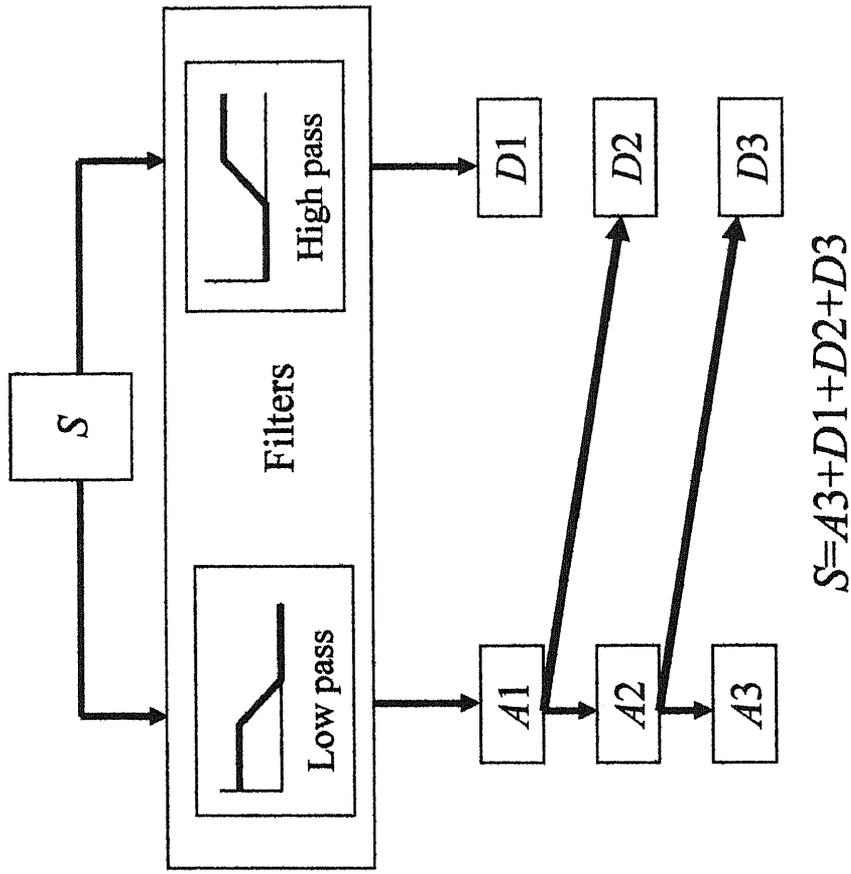


Fig.3.6 Original MFL signal arising from artificial flaws



A: Low frequency components of signal

D: High frequency components of signal

Fig.3.7 Wavelet multiple-level decomposition tree

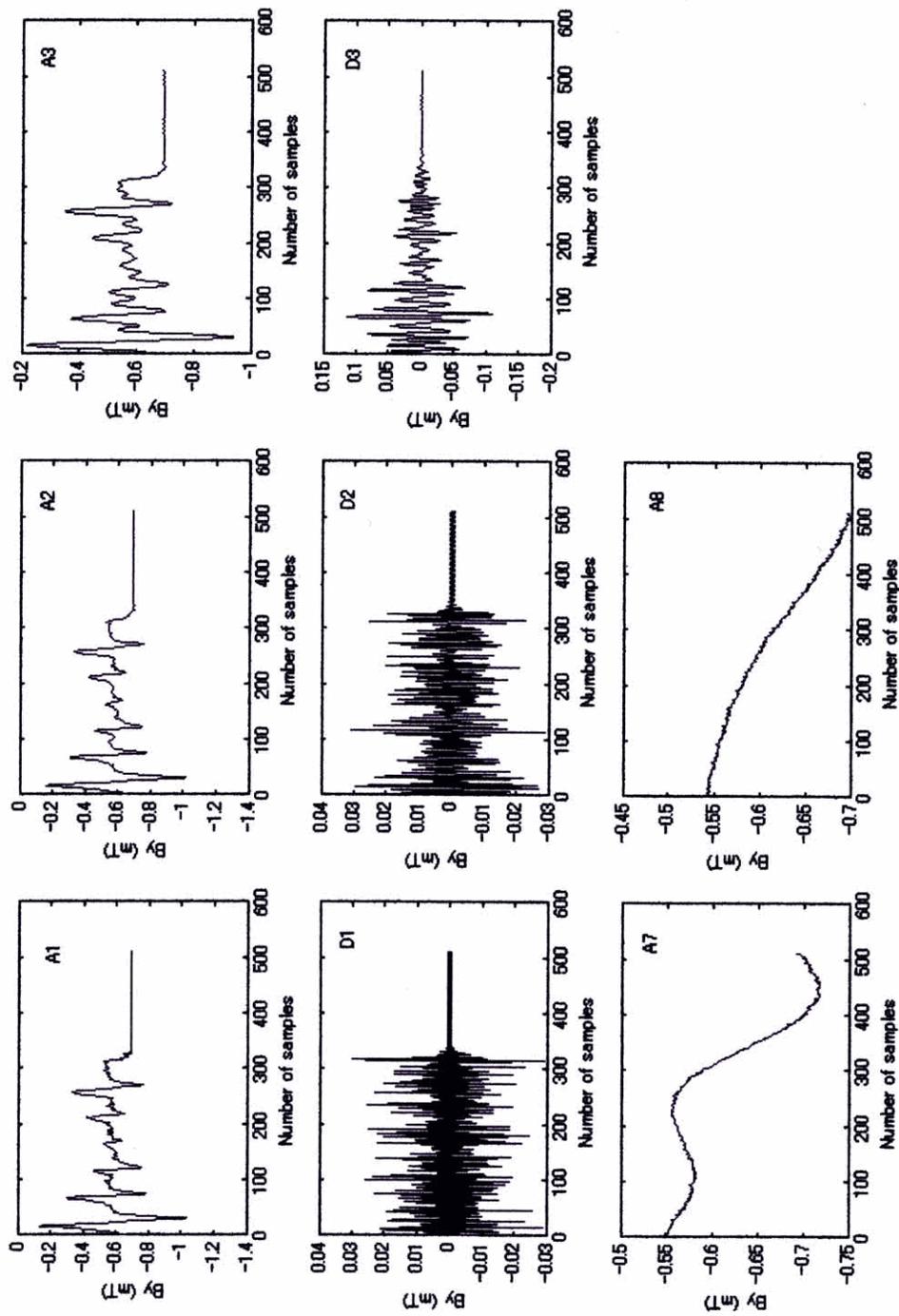


Fig.3.8 Results after the wavelet decomposition

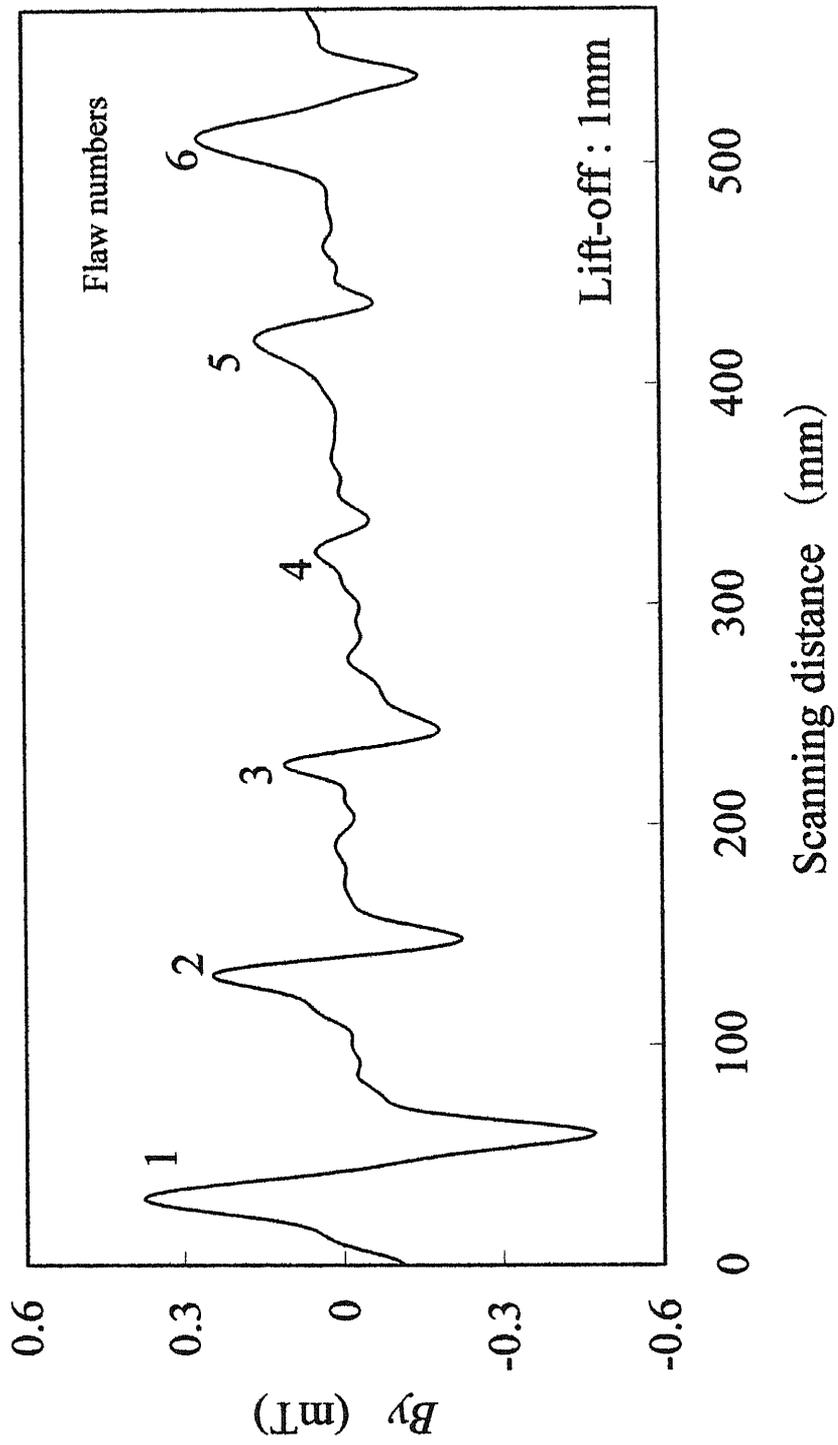


Fig.3.9 De-noised flux signal by means of the wavelet reconstruction

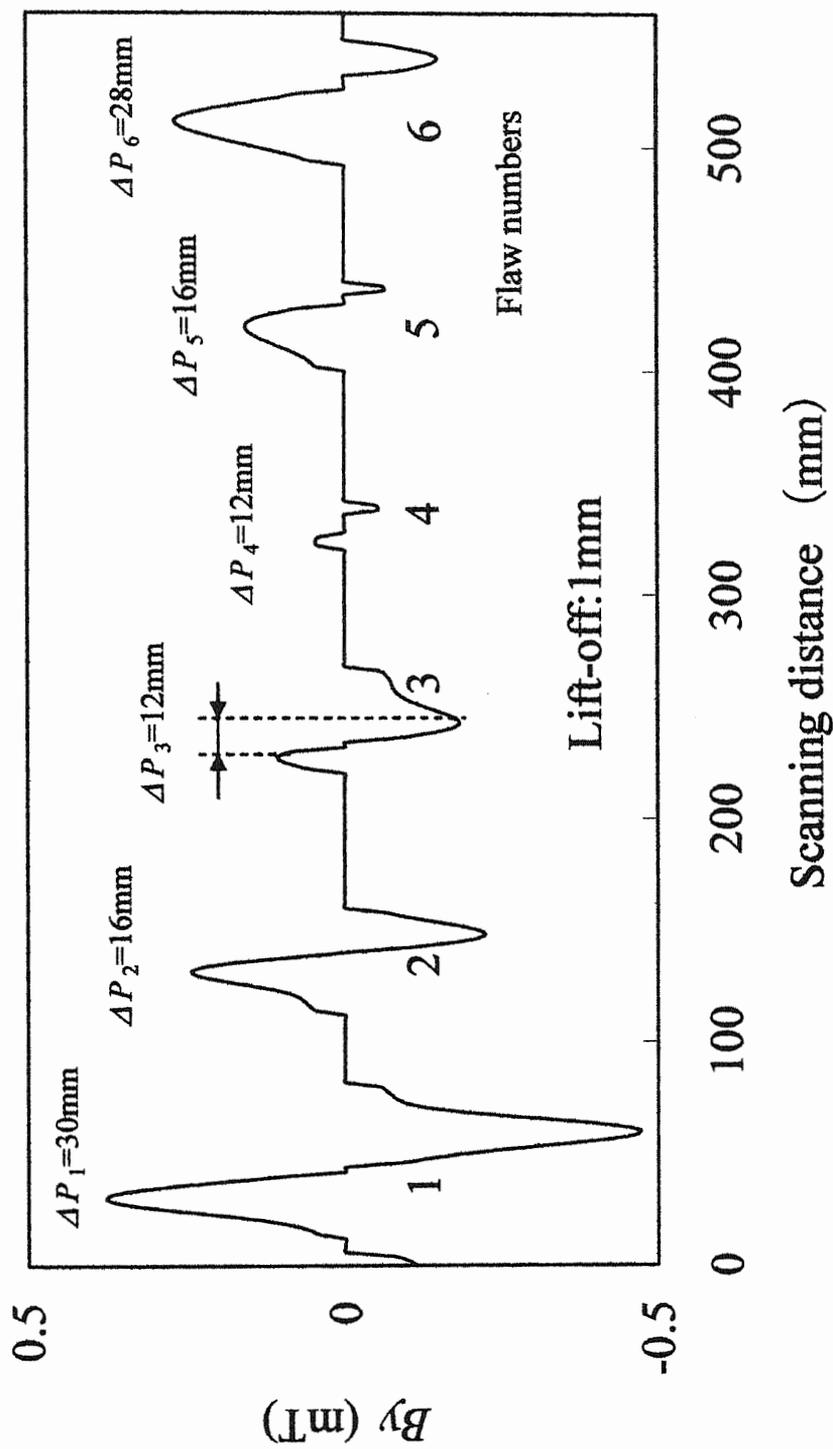


Fig.3.10 Final de-noised flaw signal obtained by the processing using threshold

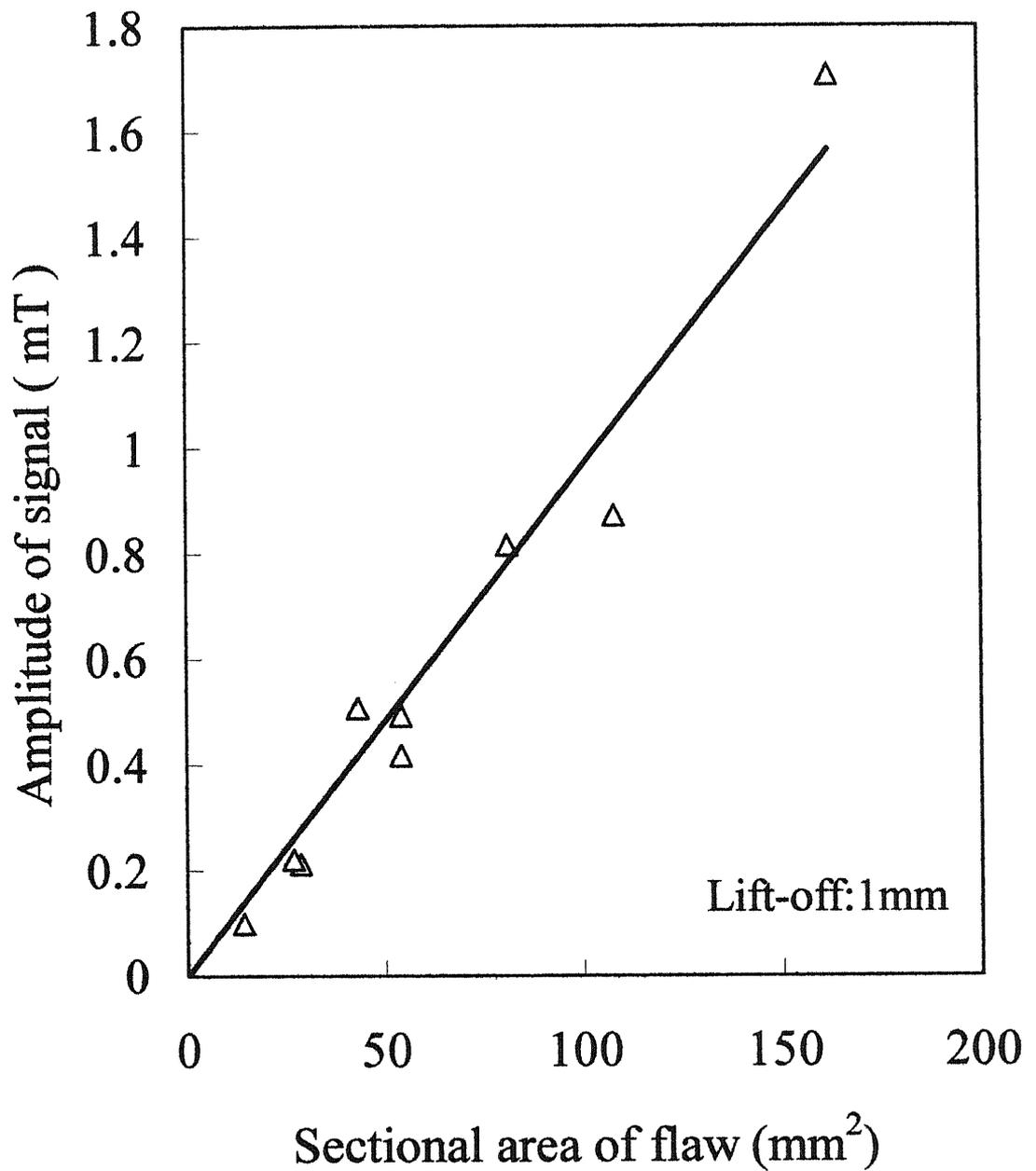


Fig.3.11 Relation between sectional area of flaw and amplitude of signal

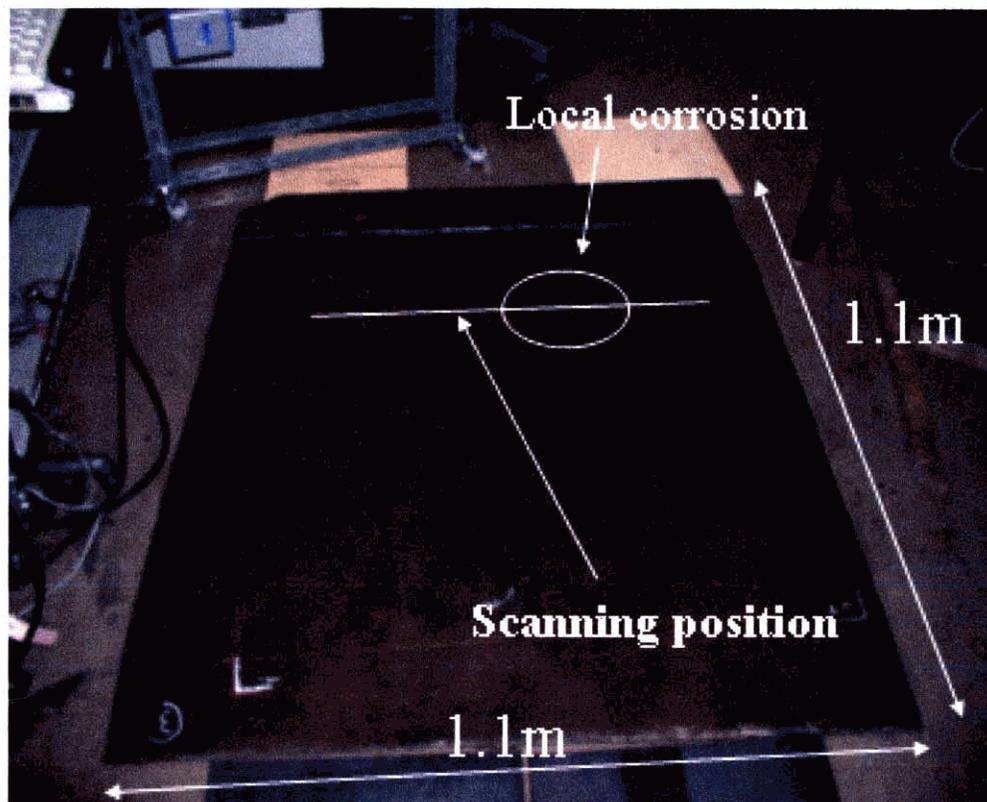


Fig.3.12 The part of the bottom floor of oil tank

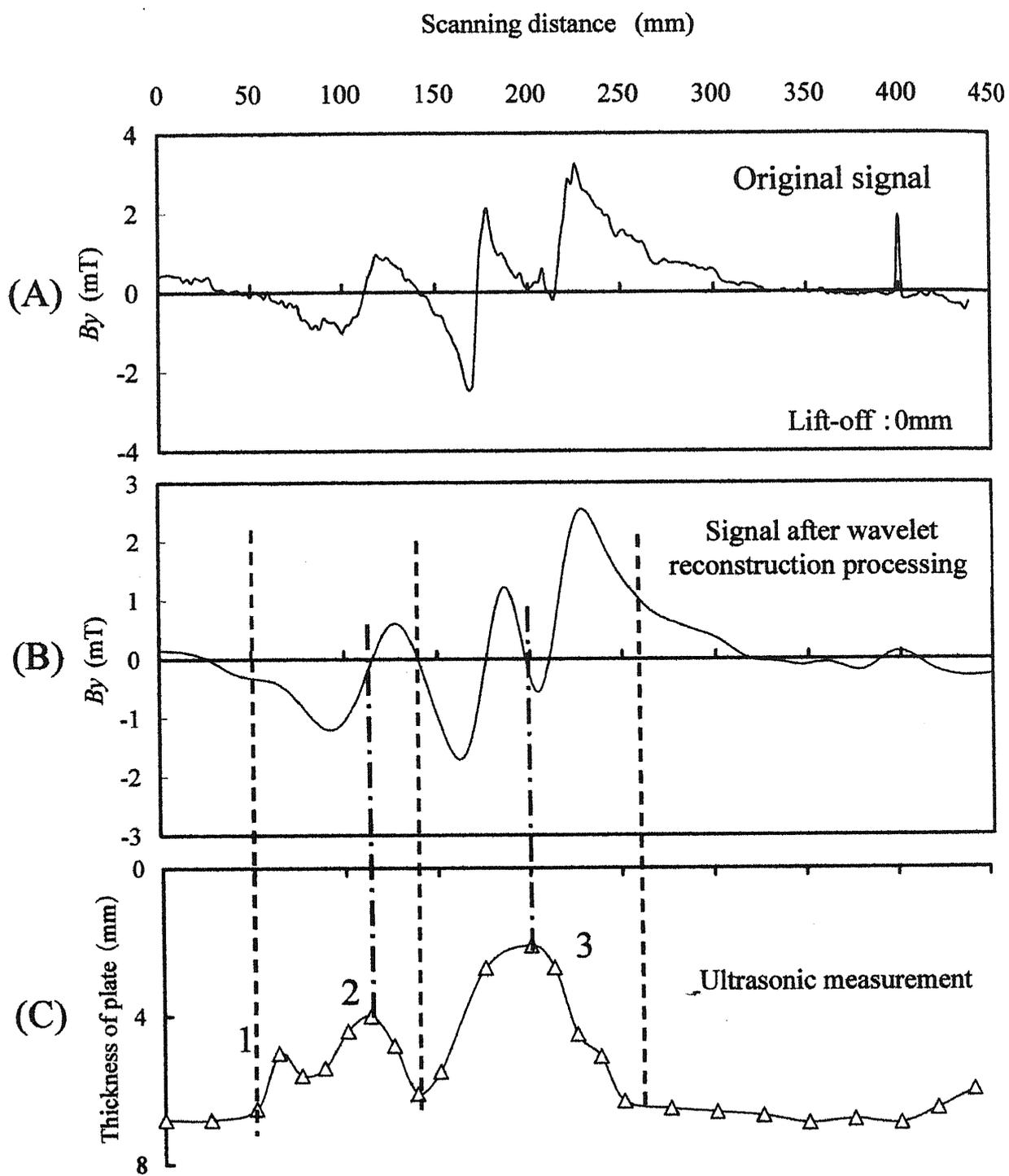


Fig.3.13 Flaw signal of the natural local corrossions

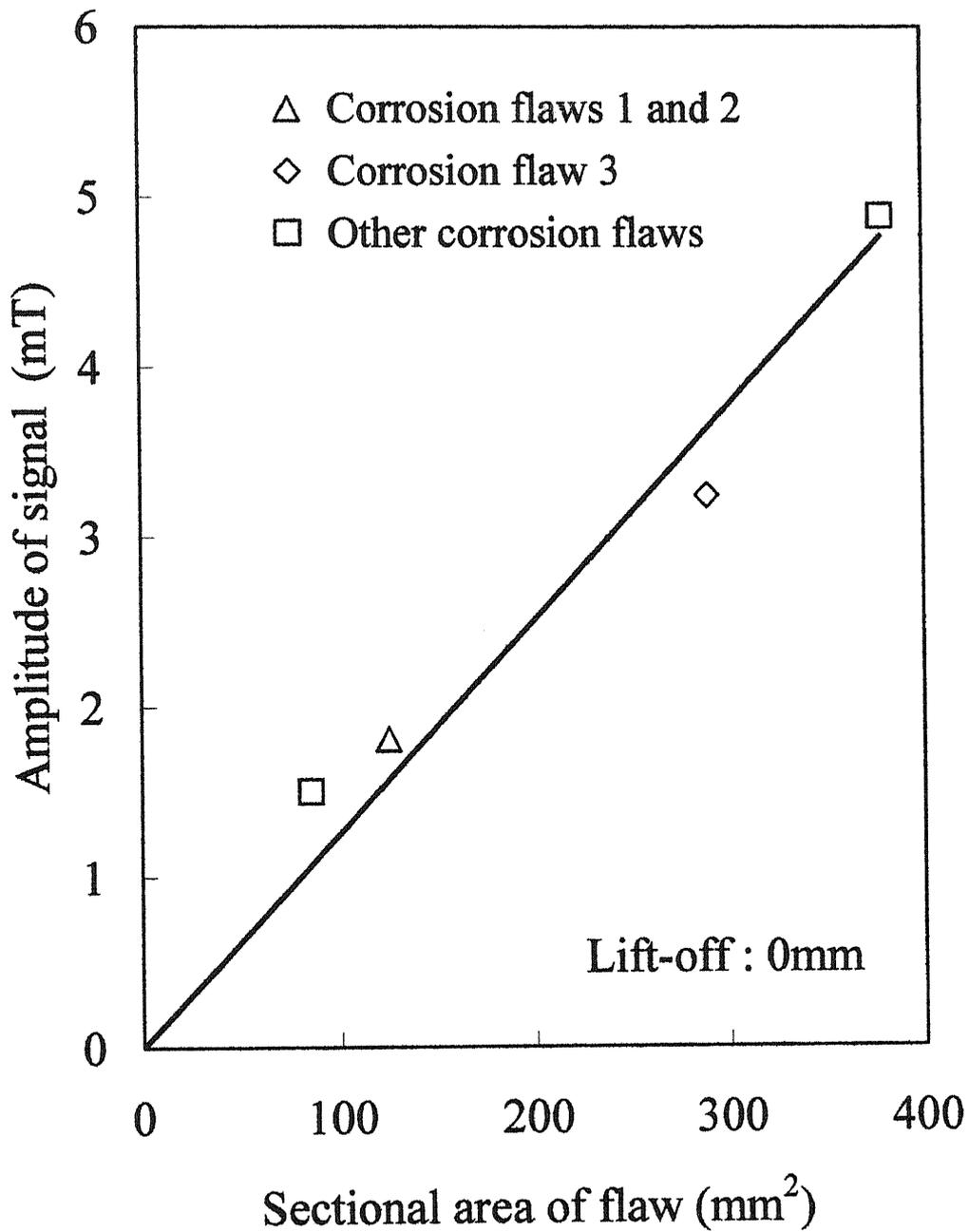


Fig.3.14 Relation between sectional area of flaw in local corrosions and amplitude of signal

第 4 章

磁気補助材を利用したきず信号の増幅

第4章 磁気補助材を利用したきず信号の増幅

4.1 第4章の概要

本章では、“磁気補助材”を利用した物理的なきず信号の増幅方法¹⁾を検討した。まず磁気補助材を用いた場合の far-side 漏洩磁界を有限要素法により解析し、磁気補助材によるきず信号の増幅効果を調べた。次に、磁気補助材の幅、厚さ、設置位置等の各パラメータの変化による磁気補助材のきず信号増幅効果について検討した。さらに、この解析結果を基に磁気補助材を組み込んだ探傷システムを実際に試作し、解析結果と実験結果の検証を行った。

4.2 磁気補助材のきず信号増幅効果

磁気補助材とは、Fig.4.1(B)のように強磁性体を磁気センサの後方に配置し、きずによる漏洩磁束を空間に引き出すものである。磁気補助材が無い場合は、空気は透磁率が小さいため磁気抵抗が大きくなり、磁束がほぼ試験片中に流れ、Fig.4.1(A)のように空間中の漏れ磁束は少なく、漏洩磁場の強度は小さい。磁気補助材を用いた場合では、空気に比べて磁気補助材の透磁率が非常に大きいため、磁気抵抗が小さくなり、この磁気抵抗差により一部の磁束が磁気補助材の方に引き出される。従って、磁気補助材を用いた場合、Fig.4.1(B)のように試験片表面の空間にはより強い漏洩磁場が発生する。Fig.4.2には磁気補助材が存在する場合の磁束の流れを示した。磁束は磁気補助材の片側の端面付近で漏れ出し、反対側の端面付近で材料に戻るように流れる。

この磁気補助材の効果については今までの研究から、磁気補助材によっ

てきず漏洩磁束密度の向きが変化し、漏洩磁束密度の絶対値は増大する傾向にあること、さらに、漏洩磁束密度の水平成分は減少するが、垂直成分は増加することが明らかにされている¹⁻²⁾。

4.3 有限要素法による最適な磁気補助材の検討

4.3.1 有限要素法における解析モデル

有限要素法を用いた far-side 漏洩磁束探傷法における解析³⁻¹¹⁾では、解析対象物の透磁率は外部磁場の強さにより異なる。また、試験体の内部で流れる磁束は、きずがある部分で、きずの奥行き方向にも迂回する。従って、本研究ではきずによる漏洩磁場の解析に三次元非線形の有限要素法を適用することとした。

本章の解析には A- ϕ 法¹²⁾の解析ソフト MagNet6.0(Infolytica 社製)を用いた。本解析において磁化モデルの対称性を考慮し、Fig.4.3 に示すような 1/2 モデルを使用した。試験片の幅 390mm、厚さ 9mm、コーティング厚さ 1mm に設定し、四連の 5200AT の極間式磁化器(磁極間の距離：140mm、磁極の面積：25mm×25mm)は試験片の中央に配置した。ここで、解析に用いた試験片の材料は石油タンクと同質材質の SS400 鋼で、この試験片の裏面側に開口幅 10mm、深さ 5mm の溝状きずを設定した。磁気補助材は奥行き方向に十分長さをもたせ、磁化モデルの中央のきず上に設置し、磁気補助材の材質、幅、厚さ及び Δh (磁気補助材と試験片の距離を Δh と定義する。)をパラメータとして変化させながら、試験片の表面から 1mm の距離(Lift-off: 1mm)の空間上の漏洩磁束密度の分布を取り出した。この試験片表面からの 1mm の距離は実タンク底板に施してあるコーティングを想定したものである。また、本解析の場合では、磁化器のコイルに入力する電流値から電流密度 $J(\text{A}/\text{m}^2)$ を計算し、解析を行った。

4.3.2 解析結果及び考察

磁気補助材によりきず信号増幅効果を得るためには、外部磁界である微弱な far-side 漏洩磁界の強さにおける磁気補助材の微分透磁率(磁気材料の $B-H$ カーブの傾き)が最も重要なパラメータであり、磁気補助材の増幅効果に影響があると考えられる。従って、有限要素解析での磁気補助材に二つの磁気特性の異なる材料を使用した。これらの磁化曲線を Fig.4.4 に、解析結果を Fig.4.5 に示す。この図より、磁気補助材の材質による違いは少ないが、SS400 鋼の方がやや B_y 信号の増幅効果は高いことが分かった。これは、微弱な far-side 漏洩磁界の強さの範囲では(0~4000A/m 程度)、SS400 鋼の方が各点における $B-H$ カーブの傾きが大きいためと考えられる。従って、以降の解析における磁気補助材に SS400 鋼を用いた。

磁気補助材の幅 30mm、厚さ 5mm、 Δh 2mm と設定した場合の解析結果を一例として Fig.4.6 に示す。磁気補助材が存在する場合、きずによる B_y 信号が増加し、 B_x 信号は減少した。また、漏洩磁束密度の絶対値($|B|$)は増大した。従って、磁気補助材を用いることによって、より大きな far-side 漏洩磁束密度及び B_y 信号が得られることが確認できた。ここで、far-side 漏洩磁束探傷法において、 B_y 信号がきず評価に有効であることがわかっている¹³⁻¹⁹⁾ので、本章の解析及び測定では、以降 B_y 信号を用いることとした。

次に、磁気補助材の各パラメータの変化による B_y 信号の増幅効果への影響を詳細に把握するため、磁気補助材の幅、厚さ、 Δh を変化させて解析を行った。これを Fig.4.7 に示す。

磁気補助材の幅を変化させた場合(Fig.4.7(A))、幅の増大と共に B_y 信号の振幅は大きくなるが、信号の形状が変化してしまった。つまり、きずを評価する際に重要なパラメータ¹³⁻²¹⁾である B_y 信号の極値間の距離は、磁気補助材の幅の増大により大きくなることが分かった。一方、磁気補助材の厚さを増大させた場合(Fig.4.7(B))、 B_y 信号の形状に変化はないが、振幅

は多少減少する傾向があった。従って、磁気補助材の厚さの変化は B_y 信号の増幅に対して効果がないことが分かった。しかし、磁気補助材の設置位置パラメータである Δh を増大させた場合(Fig.4.7(C))、 B_y 信号の形状に変化はないが、振幅は急激に減少した。

以上より、磁気補助材による B_y 信号の増幅効果において、 Δh が最も重要なパラメータであることが分かった。

4.4 実験による最適な磁気補助材の検討

本章では、4.3の解析結果で得られた知見を基に、磁気補助材を実装置に応用するとともに、 B_y 信号を増幅する磁気補助材の効果について実験的に検証した。

4.4.1 試験片及び実験方法

試験片として、Fig.3.5に示した試験片厚さの20%、40%、60%の深さの円柱状の人工きずを持つ試験片を用いた。また、実タンクに施工されているコーティングを考慮して、この試験片の表面に厚さ1mmの非磁性のスペーサーを置いた。

用いた探傷システムをFig.4.8に示す。探傷システムは3章と同様の四連の極間式磁化器(日本検査機材(株)製)を用い、各磁気補助材を磁気センサの真上に配置した。磁気補助材の仕様及び配置等の実験条件をTable 4.1に示す。

試験片上で探傷システムを移動させ、直流磁化しながら、試験片の表面側でホール素子センサにより B_y 信号を測定した。 B_y 信号はガウスメータ

のアナログ出力端子から、A-D変換ボードを介してデジタル化し、パソコンに取り込んだ。

4.4.2 実験結果及び考察

本節では、この探傷システムを用いて、磁気補助材が存在する場合、存在しない場合について、きずによる B_y 信号を測定した。この一例を Fig.4.9 に示す。この図より、磁気補助材が存在してもきず開口端で最大値、最小値を示す B_y 信号の基本的な形状に変化がなく、振幅のみが増大することが分かった。

実験においても B_y 信号の増幅効果があることが分かったので、次に、有限要素解析と同様に磁気補助材の材質、幅、厚さ、 Δh をパラメータとして変化させ、Table 4.1 に示した各条件において実験を行った。これらの結果を Fig.4.10、Fig.4.11 に示す。

磁気補助材の材質を変化させた場合(Fig.4.10(A))、有限要素法による解析結果と同様に、実験から得られた結果はほぼ同じ波形になった。磁気補助材の幅を変化させた場合(Fig.4.10(B))、有限要素法による解析結果と異なり、実験から得られた結果は顕著な変化が現れなかった。これは、磁気補助材の幅が大きくなると、磁気補助材と磁化器との距離が狭くなり、磁化器からの漏れ磁束により磁気補助材が磁化されてしまう。このため磁気補助材の透磁率が小さくなり、磁気補助材の B_y 信号を増幅する効果がなくなると考えられる。また、磁気補助材の厚さを変化させた場合(Fig.4.11(A))も、 B_y 信号への影響は少ないが、 Δh を変化させた場合(Fig.4.11(B))、 B_y 信号への影響が解析結果と同様に最も大きかった。

Table 4.2 は、Table 4.1 に示した各磁気補助材で得られた六個のきずによる B_y 信号の平均増幅率を計算したものである。磁気補助材の幅、厚さの違いである実験 1、3、4 は B_y 信号の平均増幅率は 230% を超え、磁気補助材の材質にフェライト系ステンレス鋼を用いた実験 5 においても増幅率

220%以上であった。ただし、 $\Delta h=3\text{mm}$ である実験2だけは200%を下回り、 Δh が最も重要なパラメータであることが実験からも確認することができた。つまり、実際のシステムに磁気補助材を適用する場合、 Δh をできるだけ小さくする必要があることが分かった。

4.5 第4章の結論

本章では、“磁気補助材”を利用した物理的な B_y 信号を増幅する方法を検討した。まず、磁気補助材を用いた場合のきず信号の増幅効果を三次元非線形の有限要素法を用いて解析し、磁気補助材の材質、幅、厚さ、設置位置等の各パラメータの変化によるきず信号増幅効果を検討した。この解析結果を基に磁気補助材を組み込んだ探傷システムを実際に試作し、磁気補助材の有効性を実験によって証明した。さらに、解析結果で得られた知見と実験結果の検証を行い、磁気補助材と試験片の距離である Δh が最も重要なパラメータであることを明らかにした。

第4章の参考文献

1. K. Sekine and A. Iizuka: Improvement of the magnetic flux leakage signals for far-side defects of ferromagnetic specimens, *Journal of the JSNDI*, Vol.46(10), pp.748-751, (1997)
2. G. S. Park and E. S. Park: Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage-Type Nondestructive Testing (NDT), *IEEE Trans. Magn.*, Vol.38(2), pp.1277-1280, (2002)
3. N. Kasai, K. Sekine, H. Maruyama: Influence of corrosion products on magnetic flux leakage signals in inspection of Far-side metal-loss defects in oil storage tank bottom floors, *Journal of the JPI*, Vol.47(1), pp.19-24, (2004)
4. N. Maeda: Computer Simulation of Magnetic Particle Behavior, *Materials Evaluation*, Vol.51(4), pp.290-293, (1993)
5. U. Patel, D. Rodger: Calculation of Magnetostatic Field Around Far Side Defects For Nondestructive Testing, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.31(3), pp.2170-2173, (1995)
6. E. Altschuler, A. Pignotti: Nonlinear model of flaw detection in steel pipes by magnetic flux leakage, *NDT& E International*, Vol.28(1), pp.35-40, (1995)
7. K. Wajima, K. Umetu, S. Naito, T. Ueyama: Improved Design of Magnetizer for Magnetic Powder Flaw Detection with AC Nonlinear Analysis, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.32(5), pp.4311-4313, (1996)
8. Y. Shin: Numerical Prediction of Operating Conditions for Magnetic Flux Leakage Inspection of Moving Steel Sheets, *IEEE Trans. Magn.*, Vol.33(2), pp.2127-2130, (1997)
9. M. Katoh, K. Nishio, T. Yamaguchi: FEM study on the influence of air gap and specimen thickness on the detectability of flaw in the yoke method, *NDT& E International*, Vol.33(5), pp.333-339, (2000)
10. W. Mao, C. Mandache, L. Clapham, D. L. Atherton: The effect of bulk stresses on magnetic flux leakage signals, *Insight*, Vol.43(10), pp.688-691, (2001)
11. A. Dhar, L. Clapham, D.L. Atherton: The effect of plastic deformation on magnetic flux leakage signals in steel, *Insight*, Vol.43(5), pp.310-315, (2001)
12. 中田 高義, 高橋 則雄: 電気工学の有限要素法, 森北出版, pp.13-15, (1982)
13. N. Kasai, K. Sekine and H. Maruyama: The non-destructive evaluation method for far-side corrosion type flaws in oil storage tank bottom floors using magnetic flux leakage technique, *J. Jpn. Petrol. Inst*, Vol.46(2), pp.126-132, (2003)
14. 笠井 尚哉, 関根 和喜, 丸山 裕章: Far-side 漏洩磁束探傷法によるタンク底板の表面きずと裏面きずの識別手法, 非破壊検査, 51 巻, 10 号, pp.650-656, (2002)

15. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 9 年度 石油タンクの耐震性と健全性評価に関する調査・研究, pp.3-194~3-202, (1998)
16. N. Kasai, K. Sekine, K. Nonaka: The Non-destructive Evaluation for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates by MFL Method, Proc. Japan-U.S. Symp. on Advances in NDT, pp.254-269, (1999)
17. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 10 年度 経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-84~3-103, (1999)
18. K. Sekine, N. Kasai, H. Maruyama: The Non-destructive Evaluation Method for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates Using Magnetic Flux Leakage Technique, Proc.15th WCNDT, IDN100(6 pages), (2000)
19. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 11 年度経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-64~3-85, (2000)
20. 楊 旭, 笠井 尚哉, 関根 和喜: 差動型センサーを用いた far-side 漏洩磁束探傷法の基礎的検討, 第 32 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.113-116, (1999)
21. 笠井 尚哉, 楊 旭, 関根 和喜: Far-side 漏洩磁束探傷法による鋼板裏面腐食の評価技術, 社団法人日本非破壊検査協会保守検査特別研究委員会資料, pp.21-24, (1999)

Table 4.1 Experimental conditions with the MSP

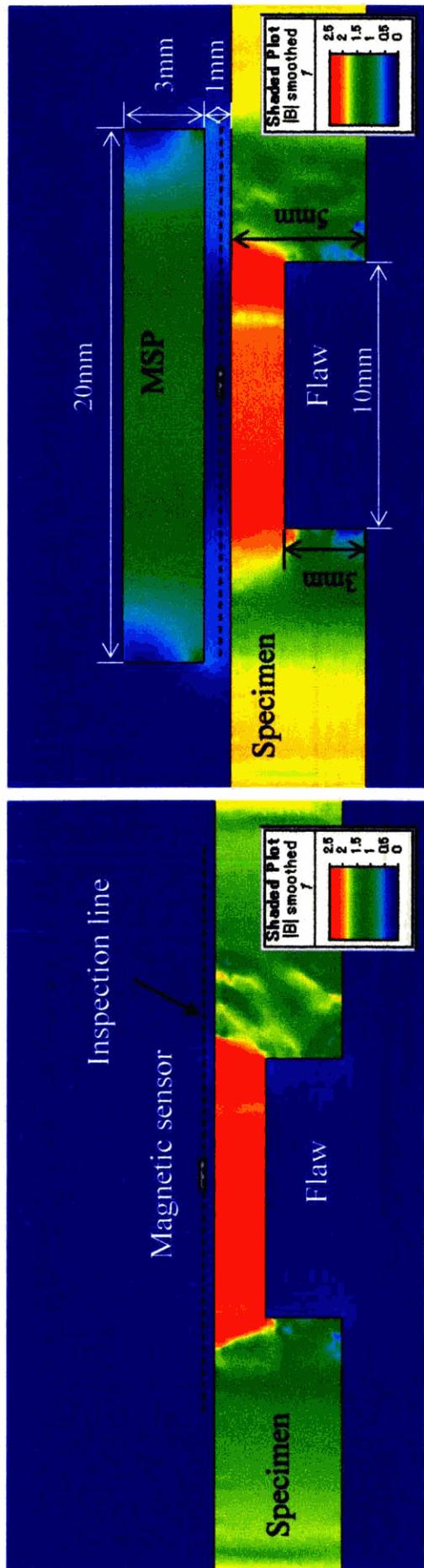
Experiment number	MSP			Δh (mm)
	Thickness (mm)	Width (mm)	Material	
1	12	25	SS400 steel	2
2	12	25	SS400 steel	3
3	5	25	SS400 steel	2
4	12	15	SS400 steel	2
5	12	25	Ferritic stainless steel	2

Δh : The distance to the specimen surface from the bottom of the MSP

Table 4.2 Improvement of the amplitude of magnetic flux density due to adoption of the MSP

Output signals	Experiment number				
	1	2	3	4	5
Ratio (%)	236.7	186.3	234.3	245.7	228.9

Ratio: Signal with the MSP / Signal without the MSP



(A) Without the MSP

(B) With the MSP

Fig.4.1 The distribution of magnetic flux density (*B*) with the magnetically supporting plate (MSP) and one without the MSP in the magnetic flux leakage technique

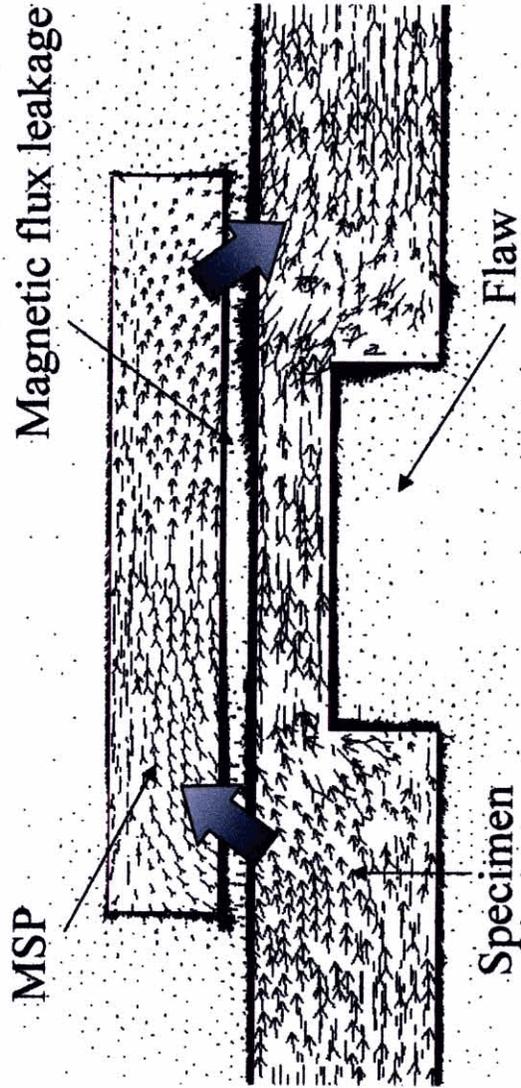


Fig.4.2 Direction of magnetic flux density(B)with the MSP
(The length of the arrow is proportional to the absolute value of B)

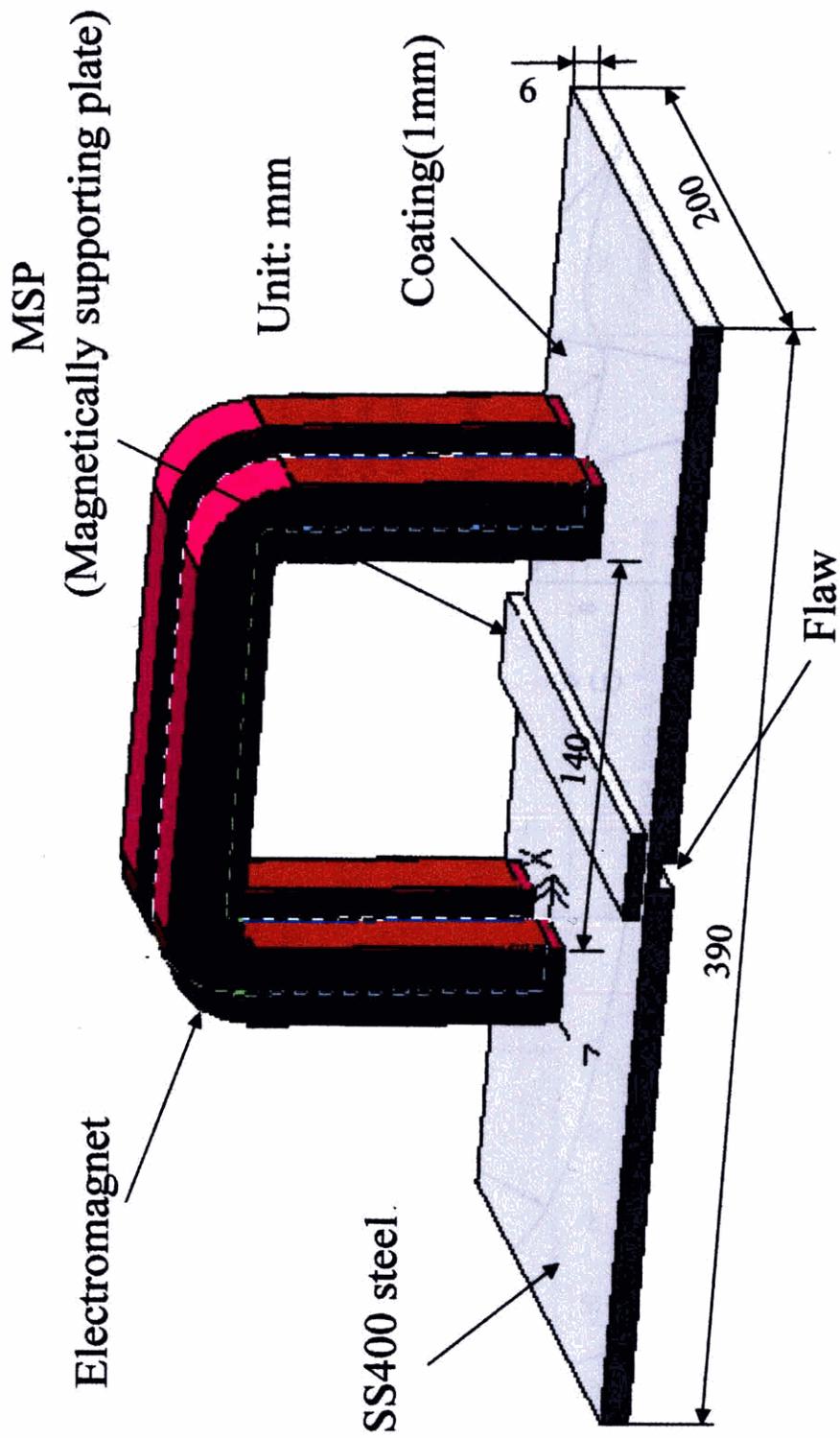


Fig.4.3 Magnetization modeling for finite element calculations with MSP

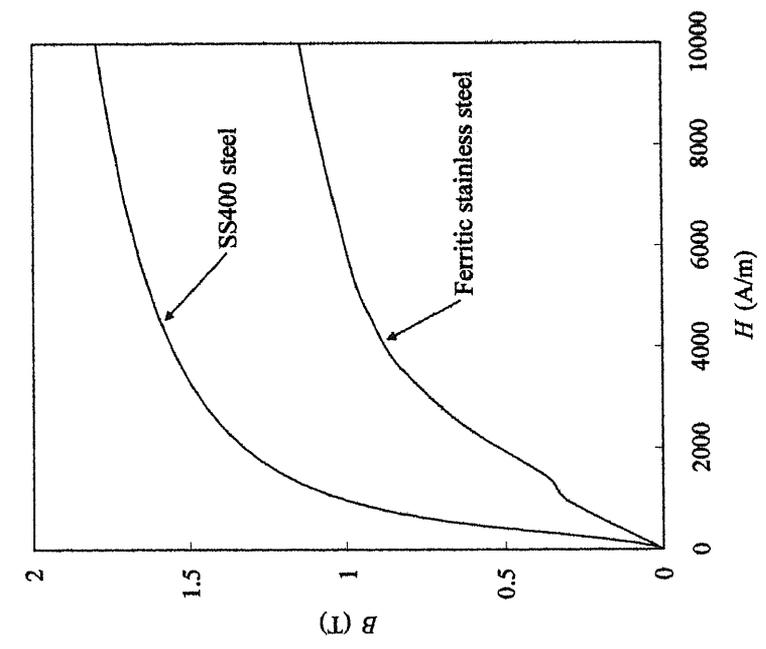


Fig.4.4 B - H curve of the magnetic materials

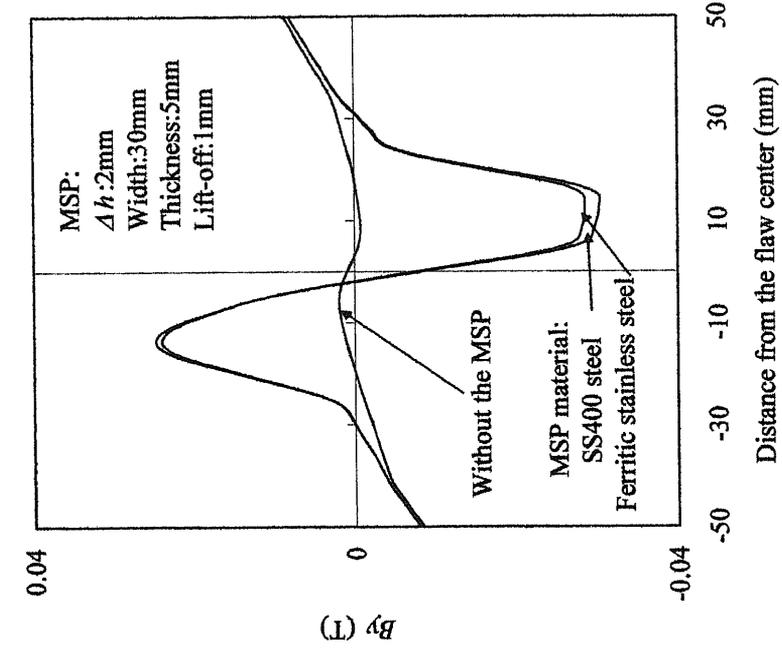
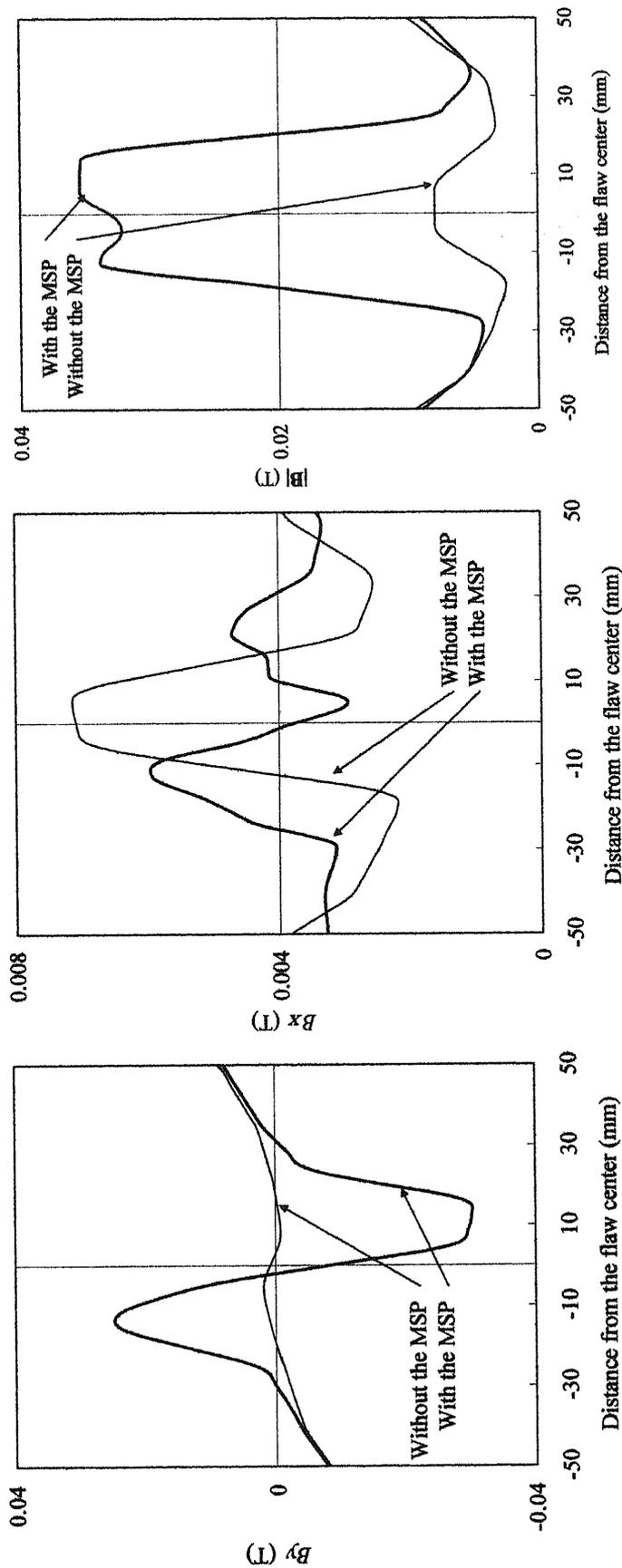


Fig.4.5 Magnetic flux density when the magnetic materials of the MSP was changed



(A) Vertical component of magnetic flux leakage density

(B) Horizontal component of magnetic flux leakage density

(C) Absolute value of magnetic flux leakage density

MSP: width 30mm, thickness: 5mm, Δh : 2mm

Fig.4.6 Calculated results of magnetic flux leakage density by finite element calculations
(Specimen thickness: 9mm, Flaw width: 10mm, Flaw depth: 5mm)

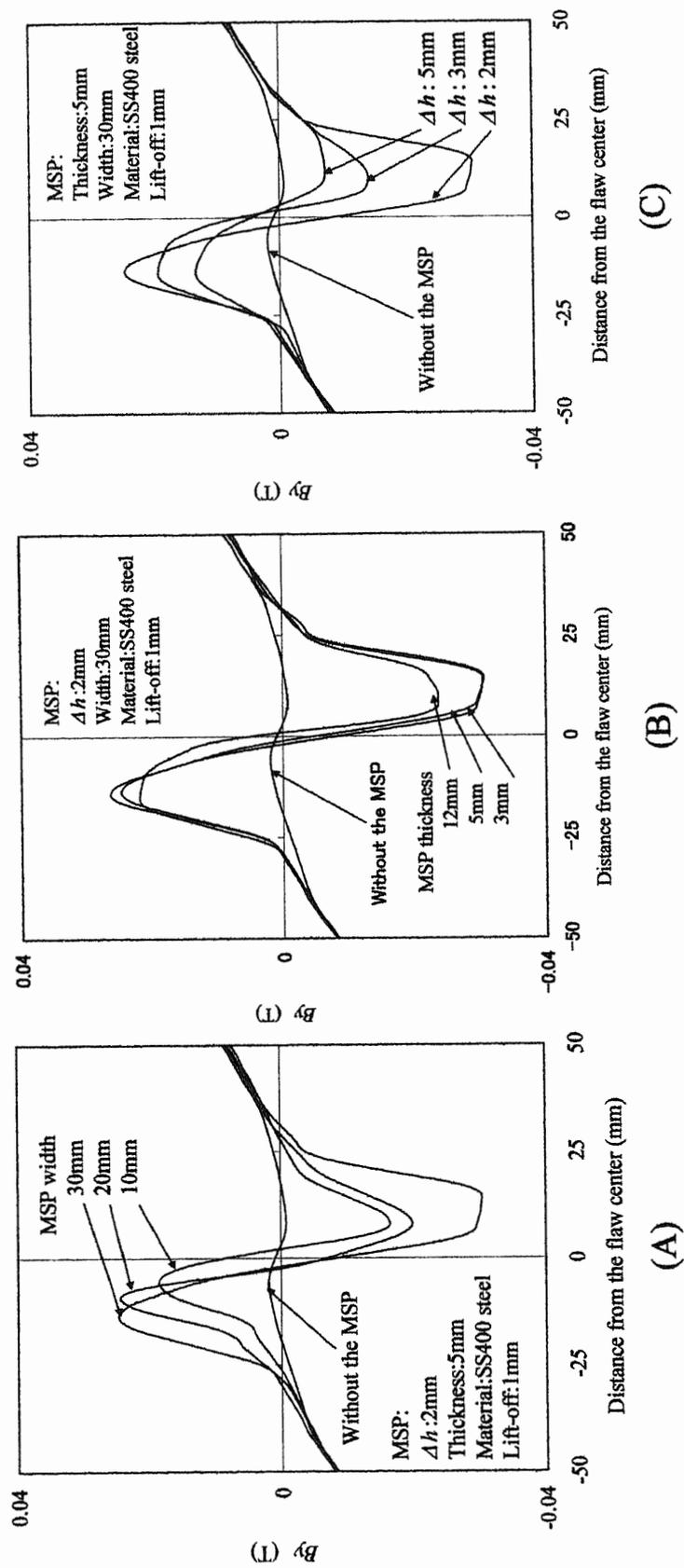


Fig.4.7 The dependence of B_y on (A) width, (B) thickness, and (C) Δh of the MSP by means of the finite element calculations (Specimen thickness : 9mm, Flaw width : 10mm, Flaw depth : 5mm)

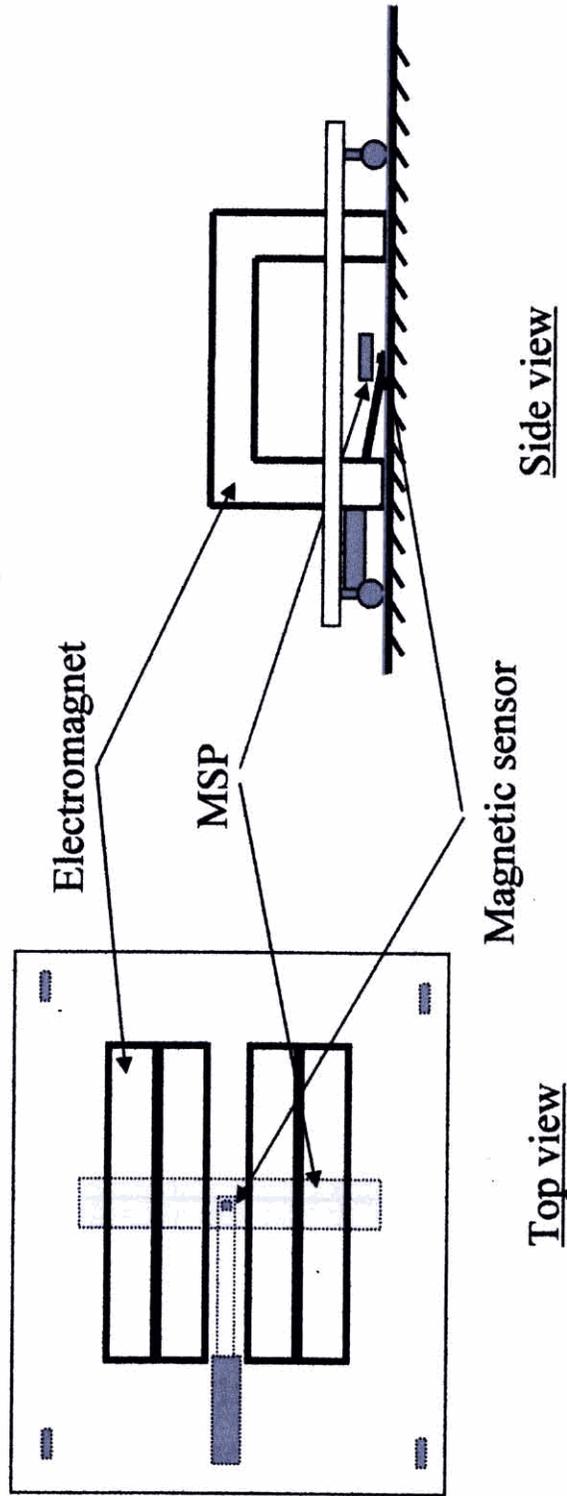


Fig.4.8 Configuration of the magnetic sensor and the inspection system with the MSP

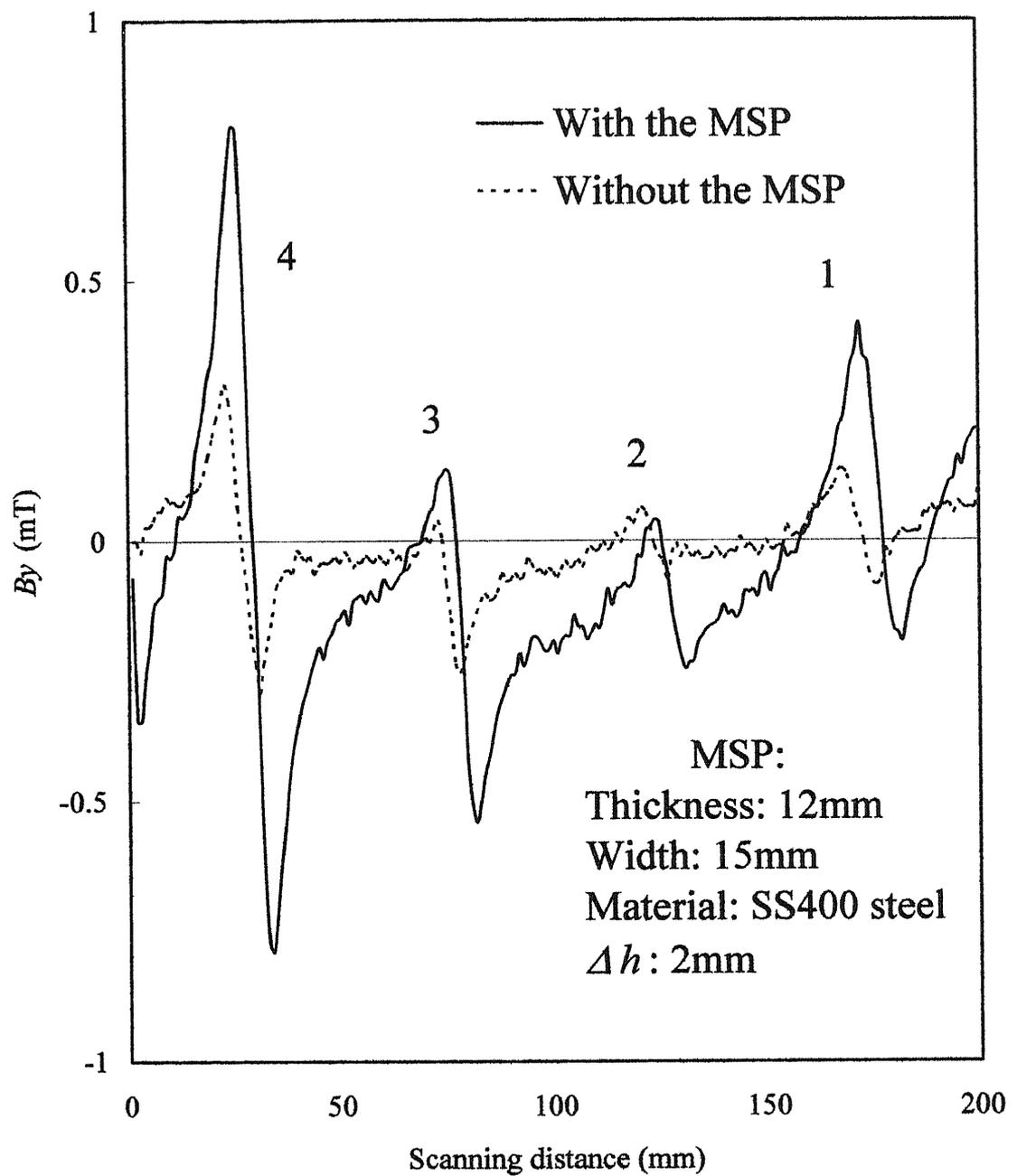


Fig.4.9 Comparison of magnetic flux leakage density with the MSP and one without the MSP

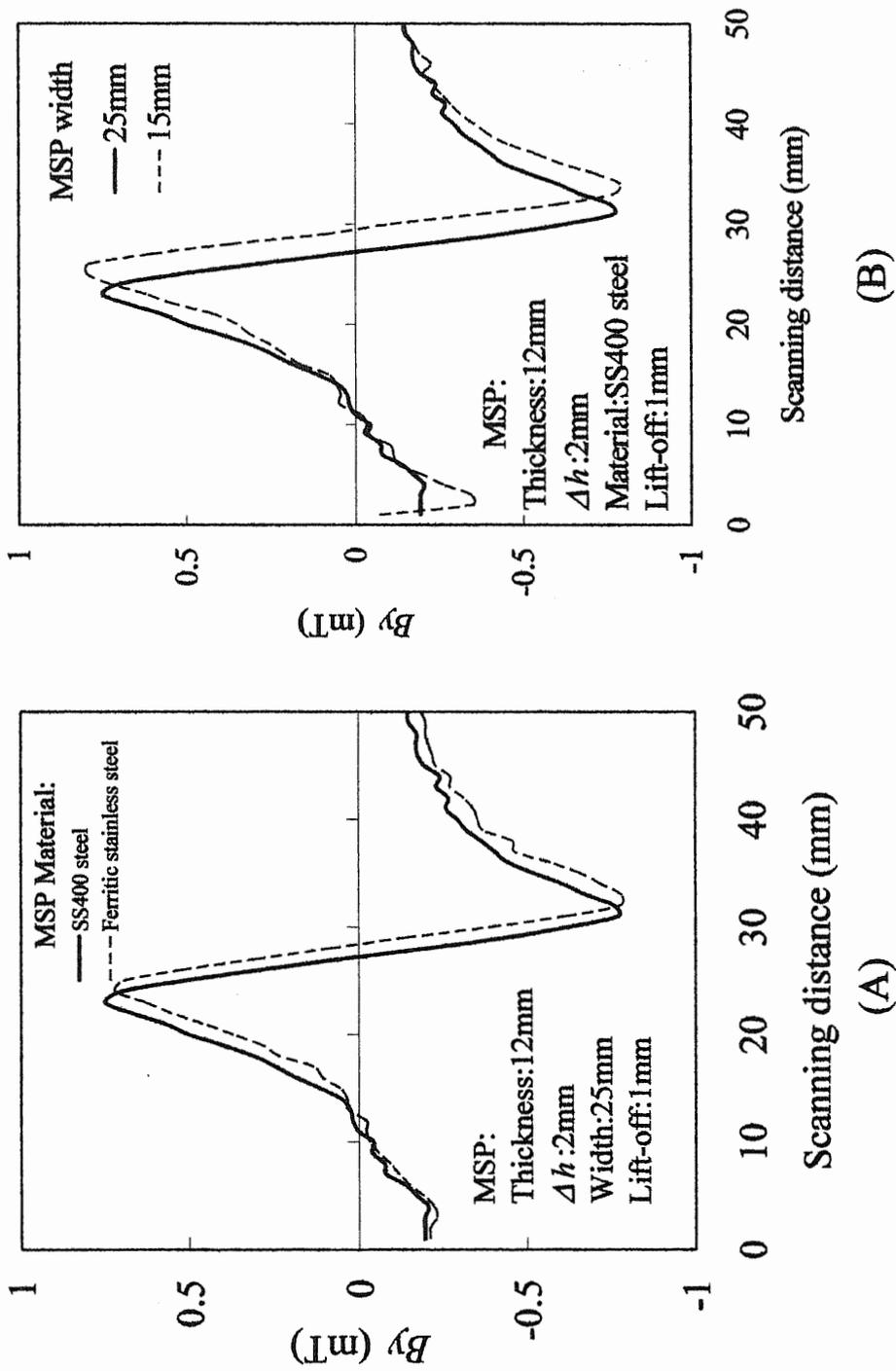


Fig.4.10 The dependence of B_y on (A) material and (B) width of the MSP by experimental result
 (Specimen thickness: 9mm, Flaw diameter: 15mm, Flaw depth: 3.6mm)

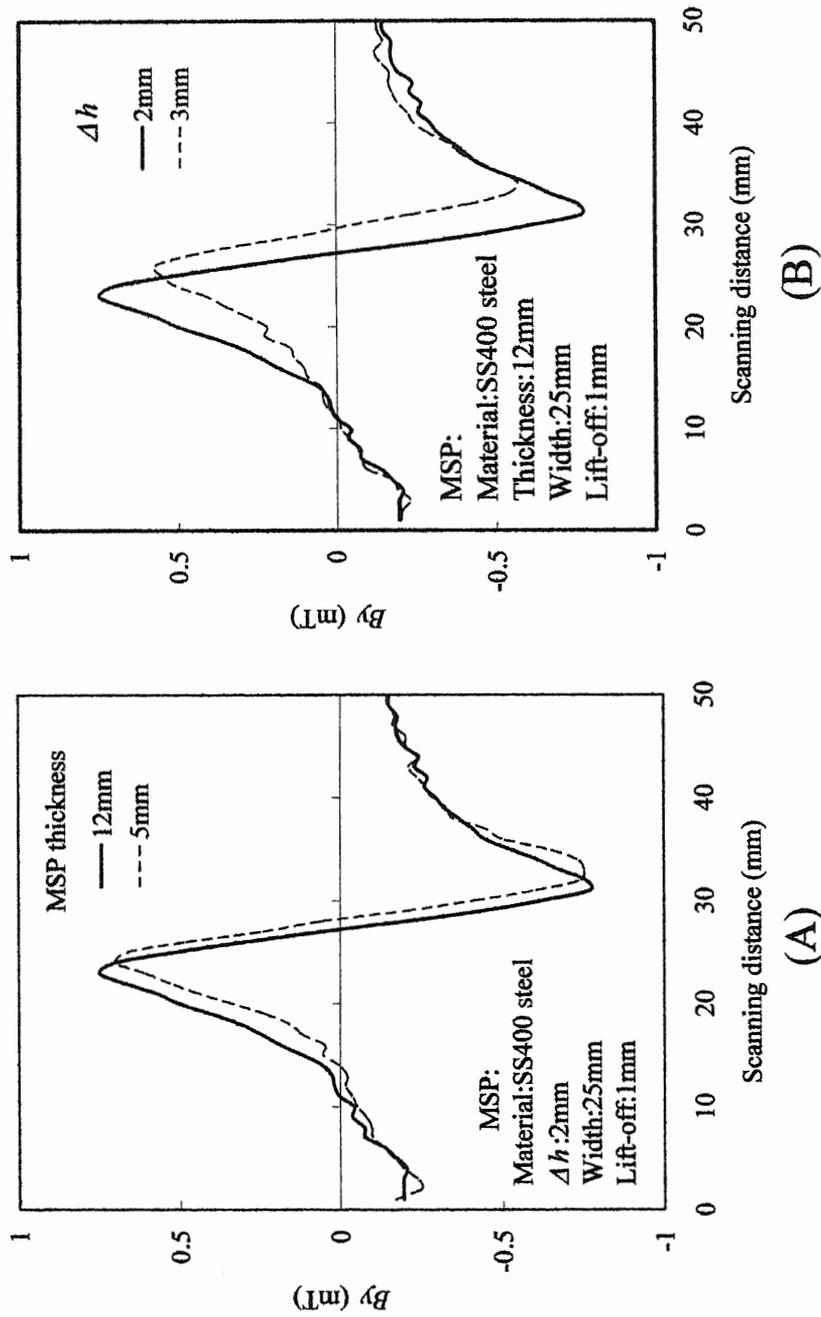


Fig.4.11 The dependence of B_y on (A) thickness and (B) Δh of the MSP by experimental result
 (Specimen thickness: 9mm, Flaw diameter: 15mm, Flaw depth: 3.6mm)

第 5 章

ニューラルネットワークを用いたきずの
定量的評価

第5章 ニューラルネットワークを用いたきずの定量的評価

5.1 第5章の概要

Far-side 漏洩磁束探傷法を実タンクに適用するためには、きず評価精度を向上させることが不可欠である。そのために本研究では、3章においてきず信号の雑音処理に離散ウェーブレット解析法を適用し¹⁾、4章において物理的なきず信号の増幅方法として磁気補助材²⁻³⁾の適用を試みてきた。これらによりきず検出精度が向上することを明らかにした。本章では、さらにきず評価精度を高めるために、逆問題解析手法である NN を利用して、検査データからきずサイズの定量化する手法⁴⁻⁸⁾を検討した。特にここでの手法は様々に状況が異なる現場での対応を視野に入れ、汎用性を持たせるために、検査システムと検査対象物(板厚、コーティング量)が異なっても適用可能なものを目指した。まず飽和磁化状態での棒状試験片の測定データを用いて NN によるきずサイジングを試み、その有効性を検討した。さらに、有限要素シミュレーションの結果を援用し、実測定データを補正した上で、提案した NN を石油タンク底板を模擬した板状試験片へに適用し、提案した NN の実用性を検討した。

5.2 NN によるきずの定量的評価

Far-side 漏洩磁束探傷法を実用的なものにするため、きずの検出及び定量的評価において、精度をさらに向上させることが求められている⁹⁻¹¹⁾。本研究で

は、きずのサイズと測定信号の特徴値の間には連続的な非線形の関係があると分かっている¹²⁻¹⁶⁾ので、NNの“入力と出力との任意の未知の非線形の関係を見つけられる”という特徴を生かし、NN手法をきずの定量的評価に適用させた。また、本研究でのNNを用いたきず評価手法は検査システムと検査対象物(板厚、コーティング厚さ)が異なっても適用可能なものを目指した。

5.2.1 NNに入力する実験データ

第2章と同様にこの試験片材料は石油タンク底板と同一材質の軟鋼板(SS400鋼)を用い、Fig.5.1に示すようにきず深さ D 、開口幅 W を変化させ、様々なサイズの円柱状、溝状人工きずを持つ棒状試験片を用いた。これは第2章で用いた試験片(Fig.2.1)と同じである。

人工きずの存在する棒状試験片の上に極間式磁化器(日本検査機材(株)製、5200AT)をのせ、直流磁界によって試験片を一様に磁化し、1mmのlift-off量における漏洩磁束密度の垂直成分(B_y)をホール素子センサ(電子磁気工業(株)製、感磁面積: 0.75mm×1.5mm)で測定した¹⁵⁻¹⁶⁾。

ここで、 B_y 信号の一例をFig.5.2に示す。 B_y 信号はきず中心で0になり、きず開口端付近で最大値、最小値を示す。この B_y 信号におけるピーク値の x 座標間の距離を ΔP 、 B_y 信号の振幅値を先と同様に ΔB_y と定義した。また、前章までに示したようにきず深さのみ増加すると、 B_y 信号の ΔP はほぼ同じであるが、 ΔB_y は大きくなり、きず開口幅のみが増加したとき、 B_y 信号の ΔP と ΔB_y はともに大きくなる¹⁷⁻²¹⁾という特徴がある。

一般的に、NNの入力は検査システムで測定したきず信号の特徴値に対応しているが、本章では、NNの入力データとして測定信号の特徴値である ΔP 、 ΔB_y 及び試験片の板厚とlift-off(コーティング厚さに相当)を用いた。出力は信号のクラス(きず信号/正常信号)、きずのサイズ(きずの長さ、幅、深さなど)、試験片の材料特性に関する他の量であり、本章では、出力をきずの開口幅、深さとした。

5.2.2 本研究での NN の構成と学習

本研究では NN のソフトに Neuralyst Version 1.4 (Cheshire Engineering Corporation 製)を用いた。NN は 4 ニューロンの入力層、2 ニューロンの出力層を持ち、中間層はそれぞれ 30 と 15 のニューロンで構成させた。ここで、全ての間層に伝達関数として下記のシグモイド伝達関数(Sigmoid function)を使用した。

$$f(x) = \frac{1}{(1+e^{-x})} \quad (5.1)$$

NN の学習では平方二乗平均(Root-Mean-Square ,RMS)誤差が最小となるよう、NN の要素を結合する重みの調整を行う逆伝播アルゴリズム(Backpropagation)を使用した。ここで、RMS 誤差は式(5.2)で定義した。

$$E_{RMS} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_N (y(x_n; w) - t_n)^2} \quad (5.2)$$

ここでは、 w は訓練される NN の重みで、 N はパターンの数、 n が n 番目のパターン、 x は入力ベクトル、 y は出力ベクトル、 t は目的ベクトルである。RMS 誤差は、NN がデータセットを予測する際に、“平均”という統一的な誤差値で表現し、データの予測が完全であるとき 0 になる。また、本研究では NN を学習する前に、NN のきずを推定できる範囲(Scaling Margin=0.1)を持たせるため、全てのデータセットを下式を使用して標準化した。

$$X_{標準値} = 0.9 \frac{x - X_{最小値}}{X_{最大値} - X_{最小値}} + 0.05 \quad (5.3)$$

ここで、 $X_{標準値}$ が標準化したデータセットで、 $X_{最小値}$ と $X_{最大値}$ は、それぞれ各データセット中の最小値、最大値である。

本研究では最初の学習比を大きい数値に設定し、NN の学習が遅い場合、学習比を増加させ、NN が不安定性(振動性)を示した場合、学習比を再び下げる適応型の学習比を使用した。

5.2.3 NNによる棒状試験片のきずの定量的評価

実験で得られた計 48 個の棒状試験片の実験データの内、ランダムに六個のデータをテスト信号としてきずの定量的評価精度の確認に用いた。残りの 42 個のデータはバッチ逆伝播方式で NN に学習させ、およそ 100 万回の反復で RMS 誤差に設定した 0.01 の収束条件を満たし、NN は学習を終了した。全てのデータにおいて、NN の出力とターゲットとの誤差は 1% 以内に収まって、NN の学習が正しく行われたことが分かった。

次に、6 個のテスト信号をこの学習済みの NN に適用させた。本研究で設計・学習させた NN による棒状試験片のきずの定量的評価結果を Table 5.1 に示す。きずの開口幅においては誤差は 1mm 以内、きず深さに対して、誤差は試験片の板厚の 10% 以内となり、精度良く評価できることが分かった。

5.3 異なる検査システム及び検査対象物への適用

Far-side 漏洩磁束探傷法では、局部腐食の存在部で磁束を有効に漏れ出させるためには、試験対象物を飽和磁束密度(B_s)の近くまで磁化する必要がある、 ΔB_y は試験対象物の直流磁化レベルに最も強く影響を受ける^{3,22)}。従って、実タンク底板の検査に用いる場合、検査条件(検査システム磁化能力、磁気センサの仕様、対象物の板厚、コーティングの厚さ等)の違いにより、 B_y 信号の振幅強度が変化する。さらに、出力信号にノイズ処理、信号増幅手法等を適用することによっても、 B_y 信号に変化が生じる。従って、出力データをそのまま一つの NN に適用することは不可能である。また、各種異なる検査条件で得られたデータを NN に全て学習させることは、NN が過学習する恐れがある。

そこで、この問題を解決するための一つの方法は実際に使用された検査システムと検査対象物毎に個有な NN を設計し、専用のデータベースを用い学習さ

せ、きず評価を行うことであるが、実用的ではない。従って、本章では、検査対象物が飽和磁化状態で lift-off 量 1mm の場合を標準状態と定義し、この標準状態で得られた検査データ(棒状試験片の場合では飽和磁化している)を用いて NN を設計する。この NN を用い、異なる検査システムで得られた実測 ΔB_y を標準状態での ΔB_y に換算することによって、各種検査条件における測定データからきず評価できると考えられる。

従って、標準状態で得られたデータを用いて設計・学習させた NN を実石油タンク底板を想定した面積の広い板状試験片に適用し、設計・学習させた NN の実用性を検証した。

5.4 NN による異なる検査条件でのきずの定量的評価

5.4.1 板状試験片における入力データと ΔB_y の補正

板状試験片及び探傷システムが第3章の測定と同様なものを採用した。また、5.2の測定と同様の磁気センサを探傷システムの中央に配置した¹⁾。板状試験片上で探傷システムを移動させ、直流磁化しながら、試験片の表面側から 1mm の lift-off で B_y 信号を測定した。この実験結果を Table 5.2 の ΔP と ΔB_y に示す。 ΔB_y は棒状試験片の場合と比べ、大幅に減少し、そのまま、先程学習させた NN に適用することができないことが分かった。これは棒状試験片の場合では試験片を飽和磁化させることは容易であるが、面積の広い板状試験片の場合では、採用した磁化システムの直流磁化能力は不十分なためである。また、この ΔB_y の減少は単に磁化レベルの違いに起因するものと考えられる。

ここで、非飽和磁化状態で得られた実測 ΔB_y 信号を標準状態での仮定の ΔB_y 信号(ΔB_{ys} と定義する)に以下のように補正することにした。

(1) 実測の ΔB_y 信号と同じ板厚、きず開口幅、深さのきずの ΔB_{ys} を計算する。

(2) 得られた ΔB_{y_s} と ΔB_y の変化率を計算し、この変化率により実測データの補正を行う。

同様な標準状態では、棒状試験片と板状試験片の形状と厚さの区別が無くなると考えられる。ここで、既知な標準状態である棒状試験片のデータを用い ΔB_{y_s} の計算を行うために、標準状態における試験片の板厚ときずの開口幅、深さと ΔB_y 信号の関係を調べた。まず、きずの開口幅、深さの影響について明らかにするため、きずの断面積(きずの断面積=きずの開口幅×きずの深さ)と ΔB_y の関係を整理した。これを Fig.5.3 に示す。この Fig.5.3 により、各板厚毎にきずの断面積が増加すると ΔB_y は比例増加として近似できることが分かった。

また、試験片の板厚の影響について、本章では有限要素法を利用して検討した。磁化モデルは試験片の幅 25mm、長さ 200mm、試験片の材質は SS400 鋼で、この試験片の裏面側に各種きず開口幅、深さの溝状きずを設定した。また、試験片の長さ方向の磁束密度は、SS400 鋼の飽和磁束密度である 1.6T とした。これら解析結果の試験片表面から 1mm の距離(Lift-off 量: 1mm に相当)の空間上の漏洩磁束密度の分布を取り出し、各きず深さ毎の試験片板厚と ΔB_y 信号の関係を整理した。この結果を Fig.5.4 に示す。この図より、きずの深さ、開口幅を一定とすれば、 ΔB_y 信号の強度は試験片の板厚に右下がりの線形関係に近似できることが分かった。

従って、本研究では標準状態での試験片の板厚、きず断面積の変化は ΔB_y 信号に線形な関係があることを利用して、以下の手順で ΔB_{y_s} を計算することにした。

- (1) ある検査システムで得られた $\Delta B_y(T)$ 信号(ここで、板厚 T)に対応するきずのサイズを他の方法(例えば、超音波計測法)で予め測定する。(例えば、測定結果、きず開口幅: W 、きず深さと板厚の比率: H)
- (2) 開口幅 W 、深さ($H \times 5$)を有するきずの断面積を計算し、Fig.5.3 の板厚 5mm の検量線を利用し、きずの断面積から、 $\Delta B_{y_s}(5\text{mm})$ を計算する。
- (3) 開口幅 W 、深さ($H \times 12$)を有するきずの断面積を計算し、Fig.5.3 の板厚 12mm の検量線を利用し、 $\Delta B_{y_s}(12\text{mm})$ を計算する。
- (4) $\Delta B_{y_s}(5\text{mm})$ 、 $\Delta B_{y_s}(12\text{mm})$ と $\Delta B_{y_s}(T)$ が同じ W 、 H であるので、Fig.5.4 よる、

この三者の間に比率関係を利用して、 $\Delta By_s(5\text{mm})$ と $\Delta By_s(12\text{mm})$ から $\Delta By_s(T)$ を計算する。

以上の方法で、いくつかの ΔBy_s を計算した後、次式を用いて、得られた ΔBy_s と実測の ΔBy 信号の平均変化率を求めた。これにより板状試験片の ΔBy 信号を補正した。この補正した信号を ΔBy_c とする。

$$\Delta By_c = \frac{1}{N} \sum_N \frac{\Delta By_{s_n}}{\Delta By_n} \times \Delta By \quad (5.4)$$

ここで、 N は ΔBy (ΔBy_s) 信号の数、 ΔBy_n 、 ΔBy_{s_n} はそれぞれ n 番目の ΔBy 、 ΔBy_s 信号である。補正した ΔBy_c を設計・学習したNNに適用し、板状試験片のきずの定量的評価を行った。

5.4.2 NNによる板状試験片のきずの定量的評価

得られた ΔBy_c 信号をテスト信号として、本研究で設計・学習したNNに適用させ、板状試験片におけるきずの定量的評価精度の確認を行った。9個のテスト信号のきずの定量的評価結果をTable 5.2のOutputsに示す。精度は多少低下しているが、全体的にきずサイズを良好に評価することができた。従って、実際の測定信号を標準状態(飽和磁化状態、lift-ott=1mm)での信号 ΔBy_c に補正し、この ΔBy_c と設計・学習したNNを用いることで異なる検査システム及び検査対象物のきず評価を行うことができることが分かった。

また、補正した板状試験片でのデータと棒状試験片でのデータは基本的に異なる検査システムから得られたものである。従って、この補正した信号をNNに適用し、十分に学習させることによって、NNのきずの評価精度を向上させることができると考えた。ここで、九個のテスト信号の中で、三つの信号(1、5、9番)を選択し、NNに学習させ、残った六個のテスト信号をこのNNに適用させた。その結果をTable 5.3に示す。きず深さに対して、誤差は試験片の板厚の5.6%から、2.2%に減少した。このように学習させたNNのきずの定量的評価精度を向上されることが分かった。

5.5 第5章の結論

本章では、far-side 漏洩磁束探傷法における NN を用いたきず定量的評価手法を検討した。本章で設計・学習した NN は棒状試験片のきず開口幅において誤差は 1mm 以内、きず深さを 10% 以内の誤差で定量的に評価することができ、NN を用いたきずの定量的評価手法の有効性を明らかにした。さらに、有限要素シミュレーションの結果を利用して、実測定データを標準状態での信号に補正した上で、提案した NN を石油タンク底板のような板状試験片の検査データに適用した。ここでもきずは精度良く評価でき、設計した NN が高い実用性を持つことを証明した。従って、NN は十分に学習させることによって、実際の複雑なきずに対しても精度の良い評価ができることが期待できる。

第5章の参考文献

1. 楊 旭, 笠井 尚哉, 関根 和喜, 丸山 裕章: Far-side 漏洩磁束探傷法における信号処理によるきず検出精度の向上, 安全工学, 43 巻, 5 号, pp.298-305, (2004)
2. K. Sekine and A. Iizuka: Improvement of the magnetic flux leakage signals for far-side defects of ferromagnetic specimens, Journal of the JSNDI, Vol.46(10), pp.748-751, (1997)
3. G. S. Park and E. S. Park: Improvement of the Sensor System in Magnetic Flux Leakage-Type Nondestructive Testing (NDT), IEEE Trans. Magn., Vol.38(2), pp.1277-1280, (2002)
4. L. Udapa and S. S. Udapa: Eddy current defect characterization using neural network, Materials evaluation, Vol.48(3), pp.342-347, (1990)
5. K. Hwang, S. Mandayam, S. S. Udpa, L. Udpa, W. Lord and M. Atzal: Characterization of gas pipeline inspection signals using wavelet basis function neural networks, NDT& E International, Vol.33(8), pp.531-545, (2000)
6. M. S. Obaidat, M. A. Suhail and B. Sadoun: An intelligent simulation methodology to characterize defects in materials, Information Sciences, Vol.137, pp.33-41, (2001)
7. Balqies Sadoun: An efficient simulation scheme for testing materials in a nondestructive manner, Information Sciences, Vol.137, pp.43-51, (2001)
8. K. Passadis, T. Meydan and P. Beckley: Neural-network-based single-sided non-enwrapping power loss tester, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 254-255, pp.385-387, (2003)
9. 社団法人日本非破壊検査協会: 非破壊評価工学, pp.1-101, (1998)
10. 社団法人日本非破壊検査協会: 非破壊試験概論, pp.1-90, (1993)
11. 関根 和喜, 日向 直之: 石油タンクの保安全管理技術の現状と課題, 圧力技術, Vol.35(6), pp.300-307, (1997)
12. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 12 年度経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-80~3-104, (2001)
13. 笠井 尚哉, 関根 和喜, 丸山 裕章: Far-side 漏洩磁束探傷法による開口端に角度のあるきずの評価, 非破壊検査, 51 巻, 10 号, pp.657-666, (2002)
14. N. Kasai, K. Sekine and H. Maruyama: Non-destructive evaluation method for far-side corrosion type flaws in oil storage tank bottom floors using magnetic flux leakage technique, J. Jpn. Petrol. Inst, Vol.46(2), pp.126-132, (2003)
15. 楊 旭, 笠井 尚哉, 関根 和喜: 差動型センサーを用いた far-side 漏洩磁束探傷法の基礎

- 的検討, 第 32 回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.113-116, (1999)
16. 笠井 尚哉, 楊 旭, 関根 和喜: Far-side 漏洩磁束探傷法による鋼板裏面腐食の評価技術, 社団法人日本非破壊検査協会保守検査特別研究委員会資料, pp.21-24, (1999)
 17. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 9 年度 石油タンクの耐震性と健全性評価に関する調査・研究, pp.3-194~3-202, (1998)
 18. N. Kasai, K. Sekine, K. Nonaka: The Non-destructive Evaluation for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates by MFL Method, Proc. Japan-U.S. Symp. on Advances in NDT, pp.254-269, (1999)
 19. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 10 年度 経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-84~3-103, (1999)
 20. K. Sekine, N. Kasai, H. Maruyama: The Non-destructive Evaluation Method for Far-side Corrosive Type Flaws in Steel Plates Using Magnetic Flux Leakage Technique, Proc.15th WCNDT, IDN100(6 pages), (2000)
 21. 社団法人日本高圧力技術協会: 平成 11 年度 経年劣化を考慮した長期備蓄タンクの診断・保全技術に関する調査・研究, pp.3-64~3-85, (2000)
 22. S. Lukyanets, A. Snarskii, M. Shamonin and V. Bakaev: Calculation of magnetic leakage field from a surface defect in a linear ferromagnetic material: an analytical approach, NDT& E International, Vol.36, pp.51-55, (2003)

Table 5.1 Calculated result of the flaws in test specimens by the neural network

Flaw number		1	2	3	4	5	6
Inputs	Specimen thickness (mm)	5	5	5	12	12	12
	Lift-off (mm)	1	1	1	1	1	1
	ΔP (mm)	32	20	13	53	34	14
	ΔBy (mT)	61.3	16.4	39.0	84.3	70.7	10.9
Targets	Flaw width (mm)	30	20	12	50	30	10
	Flaw depth (mm)	2	1	3	8	6	4
Outputs	Flaw width (mm)	30	20	12	50	29	10
	Flaw depth (mm)	1.5	1.0	3.1	8.0	5.8	4.1
Errors	Flaw width (mm)	0	0	0	0	1	0
	Flaw depth (mm)	0.5	0	0.1	0	0.2	0.1
	D (%)	10	0	2	0	1.7	0.8

D (%) = Error of flaw depth (mm) / Specimen thickness (mm)

Table 5.2 Calculated result with the large plate by the neural network

Flaw number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Inputs	ΔP (mm)	12	12	12	16	16	16	30	30	30
	ΔB_y (mT)	0.14	0.39	0.71	0.30	0.73	1.30	0.69	1.21	2.33
	ΔB_{y_c} (mT)	5.0	13.8	25.0	10.5	25.9	45.9	24.2	42.7	82.0
Targets	Flaw width (mm)	8	8	8	15	15	15	30	30	30
	Flaw depth (mm)	1.8	3.6	5.4	1.8	3.6	5.4	1.8	3.6	5.4
Outputs	Flaw width (mm)	7.8	7.9	8.1	14.4	14.2	14.1	30.2	30.2	30.2
	Flaw depth (mm)	1.8	3.8	5.4	1.8	3.1	4.9	1.9	3.1	5.5
	Flaw width (mm)	0.2	0.1	0.1	0.6	0.8	0.9	0.2	0.2	0.2
Error	Flaw depth (mm)	0	0.2	0	0	0.5	0.5	0.1	0.5	0.1
	D (%)	0	2.2	0	0	5.6	5.6	1.1	5.6	1.1

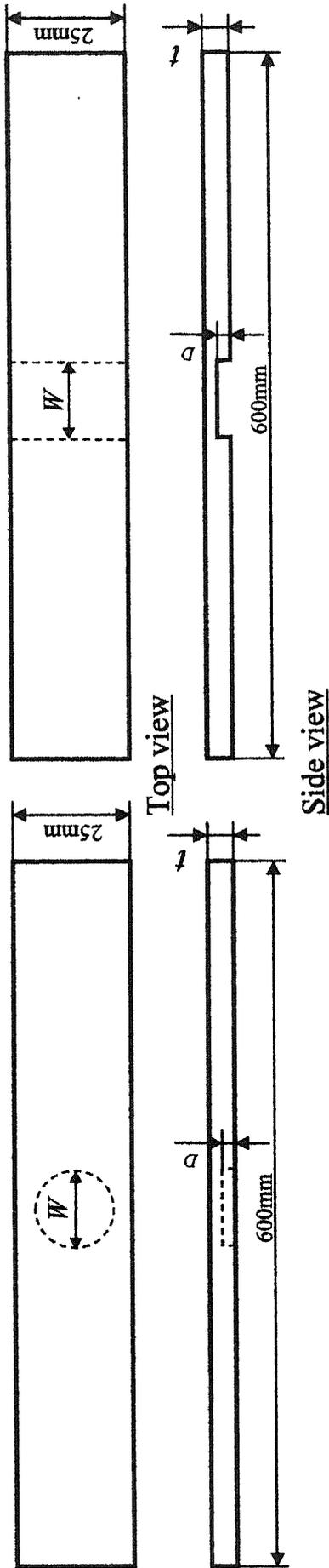
D (%) = Error of flaw depth (mm) / Plate thickness (mm)

Plate thickness: 9mm, Lift-off: 1mm

Table 5.3 Comparison of calculated result before correction and one after correction

Flaw number		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Outputs	Before correction	7.8	7.9	8.1	14.4	14.2	14.1	30.2	30.2	30.2
	Flaw width (mm)									
	Flaw depth (mm)	1.8	3.8	5.4	1.8	3.1	4.9	1.9	3.1	5.5
	Flaw width (mm)	/	8.1	8.5	15.3	/	15.4	29.3	29.0	/
	Flaw depth (mm)	/	3.4	5.2	1.9	/	5.2	1.7	3.5	/
Error	Flaw width (mm)	0.2	0.1	0.1	0.6	0.8	0.9	0.2	0.2	0.2
	Flaw depth (mm)	0	0.2	0	0	0.5	0.5	0.1	0.5	0.1
	D (%)	0	2.2	0	0	5.6	5.6	1.1	5.6	1.1
	Flaw width (mm)	/	0.1	0.5	0.3	/	0.4	0.7	1.0	/
	Flaw depth (mm)	/	0.2	0.2	0.1	/	0.2	0.1	0.1	/
	D (%)	/	2.2	2.2	1.1	/	2.2	1.1	1.1	/

D (%) = Error of flaw depth (mm) / Plate thickness (mm)
 Plate thickness: 9mm, lift-off: 1 mm

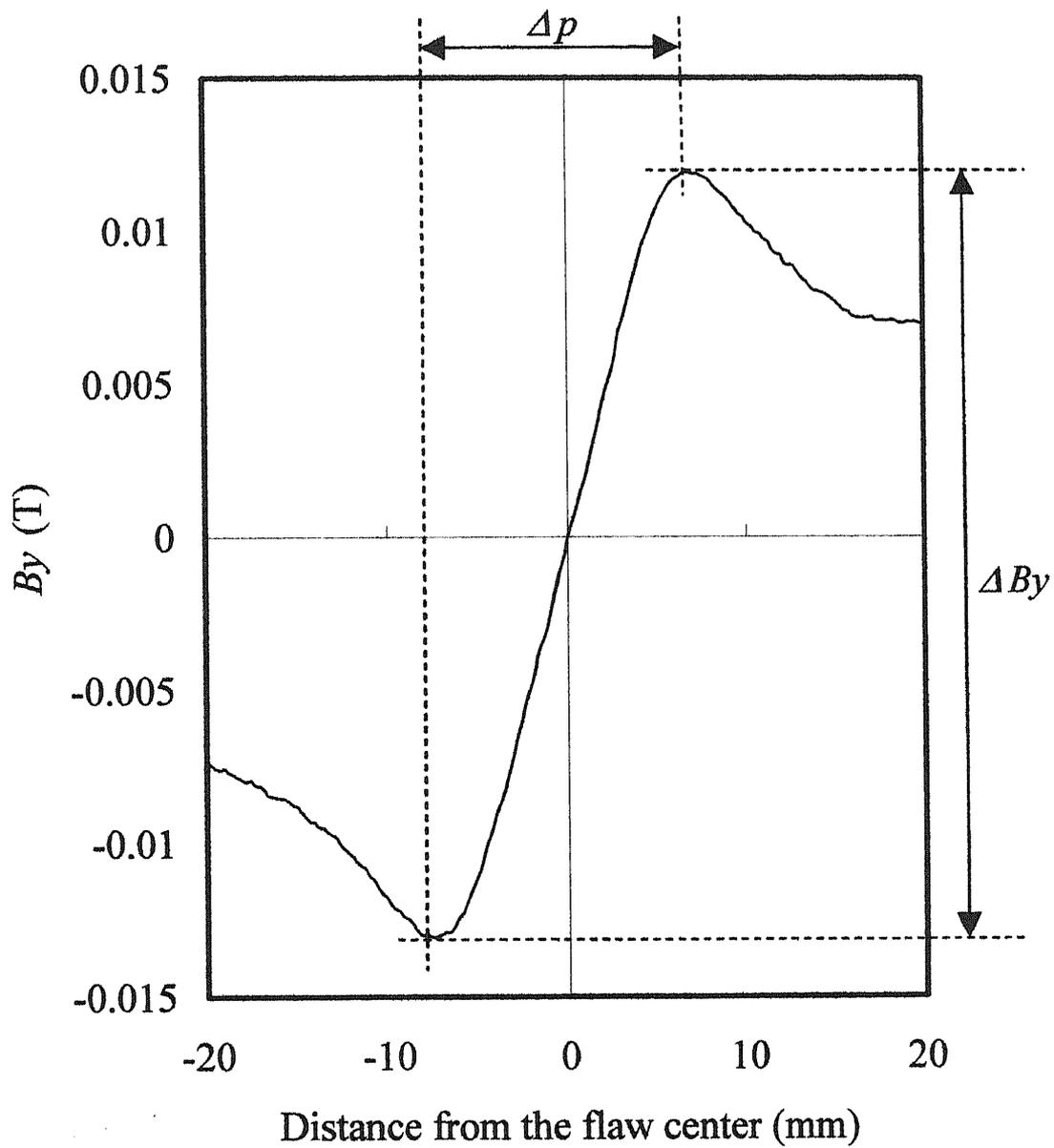


t (mm)	D (mm)	W (mm)		
12.0	2	8.0	10.0	12.0
	4	8.0	10.0	12.0
	6	8.0	10.0	12.0
	8	8.0	10.0	12.0
5.0	1	8.0	10.0	12.0
	2	8.0	10.0	12.0
	3	8.0	10.0	12.0
	4	8.0	10.0	12.0

t (mm)	D (mm)	W (mm)	
12.0	2	30.0	50.0
	4	30.0	50.0
	6	30.0	50.0
5.0	8	30.0	50.0
	1	30.0	50.0
	2	30.0	50.0
	3	30.0	50.0
4	30.0	30.0	50.0

Material: SS400 steel D : Flaw depth W : Flaw width t : Specimens thickness

Fig.5.1 Size of test specimens and flaws



Specimen thickness : 12mm Lift-off : 1mm
 Flaw width : 12mm Flaw depth : 6mm

Fig.5.2 Vertical component of magnetic leakage flux density

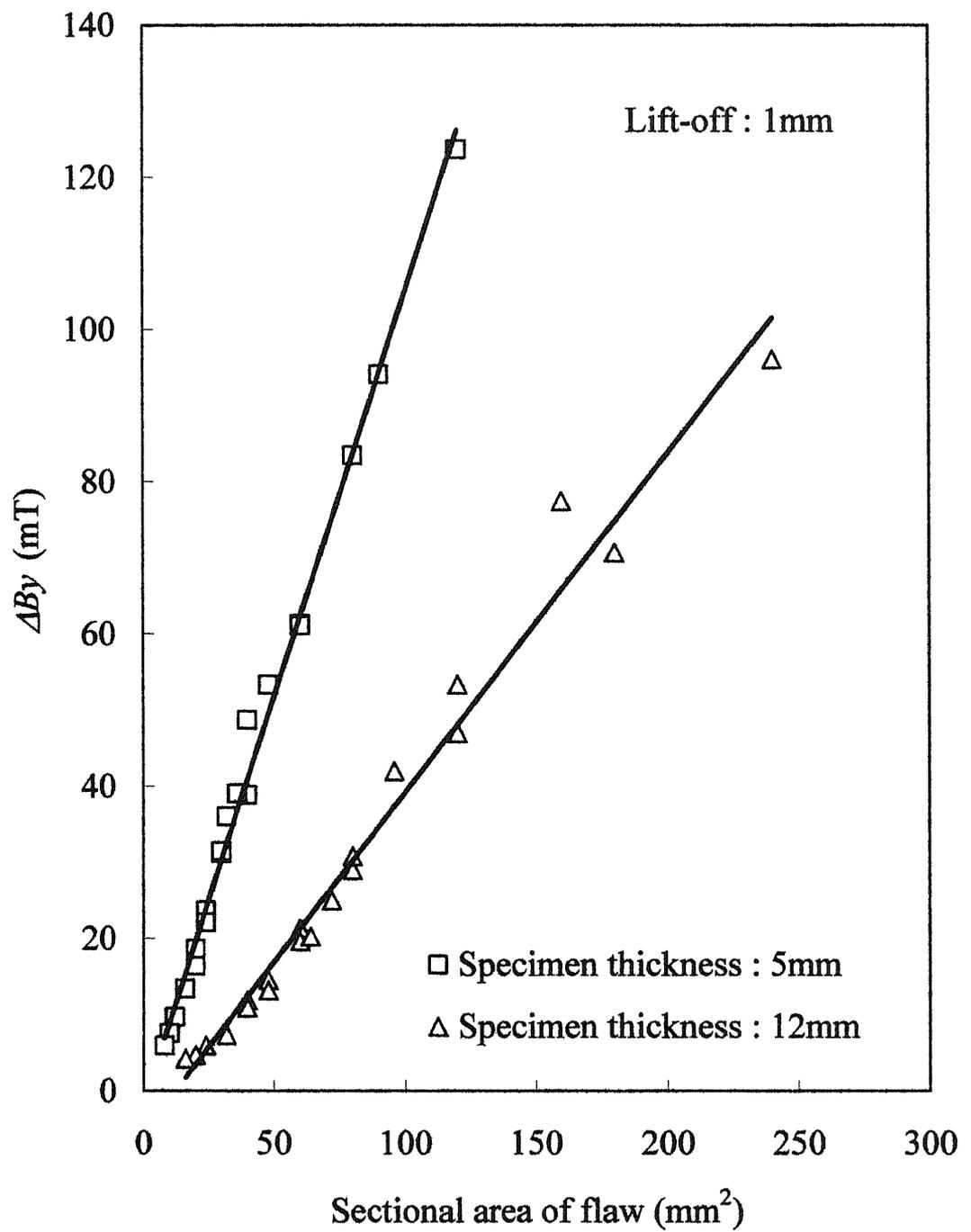


Fig.5.3 Relation between sectional area of flaw and ΔB_y by experimental result

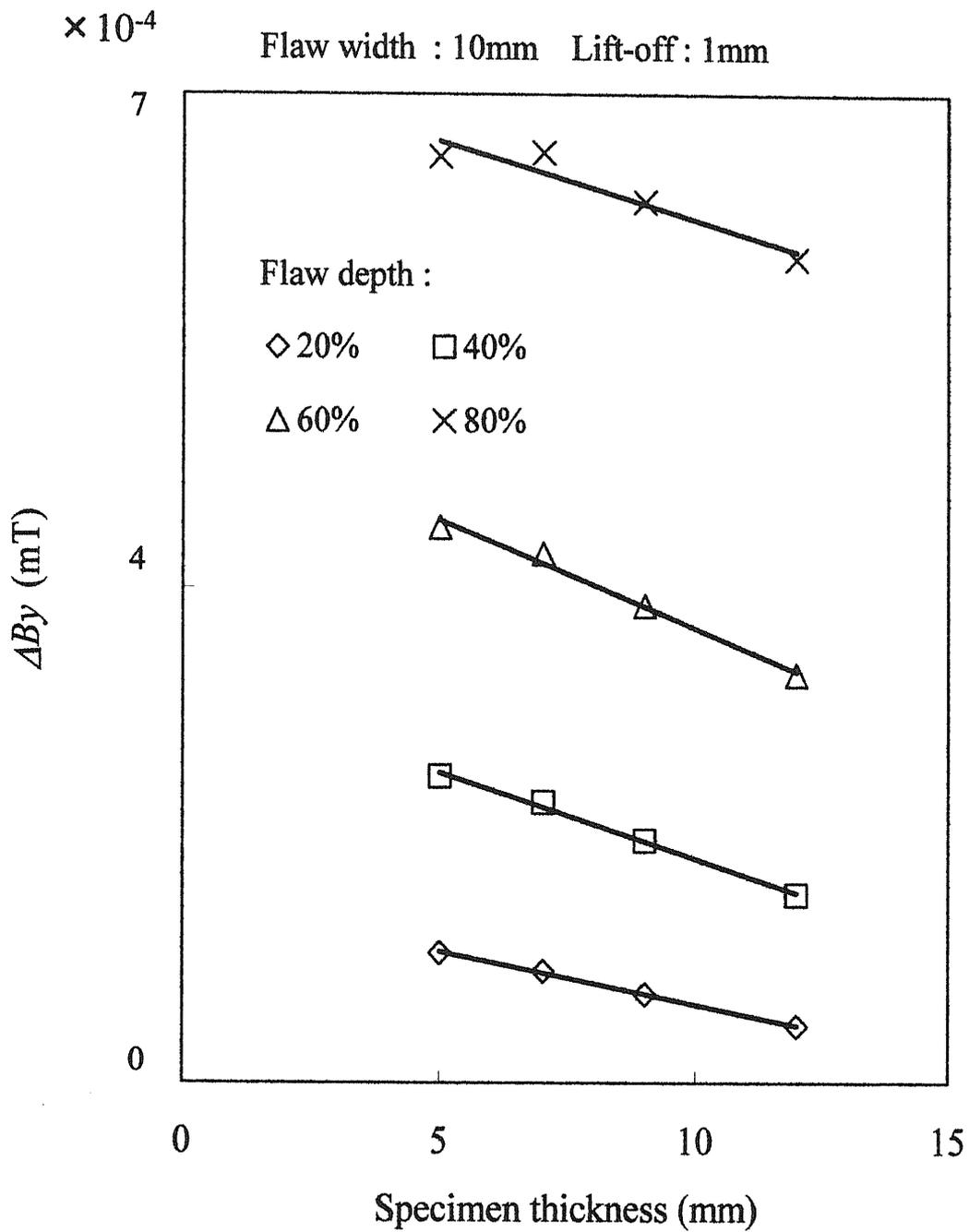


Fig.5.4 Relation between specimen thickness and ΔB_y by finite element method

第 6 章

結論

第6章 結論

本研究では、far-side 漏洩磁束探傷法を本格的に実用的なものとするために、適切な探傷条件や探傷装置及びきず検出、評価精度の向上策の検討を行った。具体的には、ソフト面からきず信号のノイズ処理と解析手法及びきずの定量的評価手法を、ハード面からは実用検査に供しうる装置の検討と作製及び磁気補助材を利用した物理的なきず信号の増幅方法を検討した。これらの研究項目においては、漏洩磁束密度分布のシミュレーションや理論解析を含んでいる。

本研究ではまず、ホール素子センサを用いた実験用 far-side 漏洩磁界計測システムを作製し、人工きずを有する試験片に対し実験を行い、裏面きず形状と far-side 漏洩磁界分布の関係を明らかにし、これに基づいた差分方式の信号処理手法による簡易的きず評価手法を提案した。また、有限要素法を利用し、鋼板中の内部磁場、きず漏洩磁界及び磁気補助材の影響を解析した。この得られた知見を基に本手法を現実のタンク底板に適用する場合の探傷条件の最適化を行う要件につき検討を試みた。さらに、離散ウェーブレット解析法を用い測定信号のきず位置情報に影響を与えない信号処理手法の適用及び、NN を利用したきずサイズの定量的評価手法を提案した。提案した各手法を広大な実腐食板又はこれを想定した板状試験板に適用し、その有効性を検証した。

第2章では、実験用きず評価システムの自動化実験装置を作製し、円柱状、溝状など単純な形状のきずを対象に far-side 漏洩磁界からきずが検出し得ること、またきず深さ、開口幅といったきず形状が評価できることを示した。また、フィールドで問題となるバックグラウンドに対し、その影響を受けにくい差分方式の信号処理法をきず信号に適用した。その結果、きずに対応する信号のみが正確に取り出せること、S/N 比が向上することが示された。さらに、far-side 漏洩磁界の水平成分及び垂直成分の差分値を計算し、 B_xDIF がきず開口幅及びきず深さの評価に適していることを見出した。より現実の局部腐食の断面形状に近い角度が有するきずに対しても、

$BxDIF$ を利用すれば定量的かつ簡易的なきず評価が可能であることを示した。

第3章では、まず有限要素法によって、鋼板中の内部磁場及びきずによる far-side 漏洩磁界を理論的に解析した。この得られた結果に基づき far-side 漏洩磁束探傷法を現実のタンク底板に適用する場合のものとして、磁化器を四つ連続的に並べた探傷システムを作製した。また、離散ウェーブレット解析法を用い測定信号のきず位置情報に影響を与えない信号処理手法としきい値の適用を試みた。これによりきずに起因する信号のみを精度良く抽出し、より明確なきず信号が得られ、きず検出精度が向上した。本システムは人工きず試験片ならば、厚さ 9mm の試験片の 20%減肉までのきずの検出が可能で、実際の石油タンクから切り出した腐食試験片に対しても、信号処理を施すことによりきずが検出できることを示した。さらに、 B_y 信号を用いたきずの評価法を検討し、 B_y 信号の ΔP ときずの開口幅がほぼ同じであること、及び ΔB_y はきずの断面積に比例することを見出した。これより、きずの範囲と最大深度を定量的に評価できることを示した。実腐食に対しても同様な手法によってきずサイズの定量的評価が可能であることを明らかにした。

第4章では、“磁気補助材”を利用して物理的に B_y 信号を増幅する方法を検討した。まず磁気補助材を用いた場合のきず信号の増幅効果を三次元非線形の有限要素法により解析した。また、磁気補助材の幅、厚さ、設置位置等の各パラメータの変化によるきず信号増幅効果を検討した。この解析結果を基に磁気補助材を組み込んだ探傷システムを実際に作製し、磁気補助材の有効性を実験によって証明した。さらに、解析結果で得られた知見と実験結果の検証を行い、磁気補助材と試験片の距離である Δh が最も重要なパラメータであることを証明した。これらの知見を基に、作製した探傷システムにより、 B_y 信号の平均増幅率は 200%を超えることが分かった。

第5章では、きずの定量的評価精度をさらに高めるために、逆問題解析手法である NN を利用して、検査データからきずサイズを定量的に評価する手法を検討した。具体的には、まず飽和磁化状態である棒状試験片の測定データを用いて NN によるきずサイズの定量的評価を試みた。きずの開

口幅において誤差は 1mm 以内、きずの深さに対して、誤差は試験片の板厚の 10%以内となり、その有効性を示した。次に、有限要素シミュレーションの結果を利用して、実測定データを補正した上で、提案した NN を実タンク底板のような板状試験片の検査データに適用した。ここでもきずは精度良く評価でき、設計した NN が高い実用性を持つことを証明した。

本研究で提案した各手法及び得られた知見を実検査に生かすことで、石油タンク底板の腐食管理技術として、十分有効なものであることが明らかになった。

謝辞

本研究は、横浜国立大学大学院工学研究院、関根 和喜教授の下で、筆者の博士課程における研究題目として行われたものである。

本研究を遂行するにあたり、恩師関根 和喜教授には多方面にわたり適切な御指導、御助言を賜りましたことに対し、心から厚く感謝致します。また、横浜国立大学大学院工学研究院安藤 柱教授、小川 輝繁教授、大谷 英雄教授、福田 隆文講師には、論文審査の労をとって頂くと共に多くの有益な御教示を賜りましたことに対し、心から深く感謝致します。

日本高圧力技術協会特別研究員橘川 重郎氏、当研究室助手笠井 尚哉氏には、研究に関する幅広い分野において御指導、御助言を賜りましたことに対し、深甚なる謝意を表させていただきます。

さらに、筆者と共に学生生活を送った当研究室大学院生、学部生の皆様に多方面に渡り御協力頂きました。ここに付記して、深く感謝の意を表します。

最後に私事となりますが、いつでも暖かく励ましてくれた両親、及び筆者に代わり家庭を支えてくれた妻に対し、心より深く感謝の意をさせていただきます。