T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	電位差法を用いたCFRP直交積層板のはく離同定に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	上田政人
Author(English)	MASAHITO UEDA
出典(和文)	学位:博士（工学）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第6427号, 授与年月日:2006年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:轟章
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第6427号, Conferred date:2006/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

電位差法を用いた CFRP 直交積層板の はく離同定に関する研究

東京工業大学大学院
理工学研究科　機械物理工学専攻
上田　政人

目　　次

第 1 章　緒　　論　1

1.1.　研究背景　1
1.2.　従来の非破壊検査手法　2
1.3.　近年のヘルスモニタリング手法　2
1.4.　電位差法　3
1.5.　CFRP 積層板はく離検知への電位差法の適用　4
1.6.　研究目的　5
1.7.　本論文の構成　5

第 2 章　電位差法の問題点　17

2.1.　緒言　17
2.2.　電位差法による層間はく離同定　17
2.2.1. 解析モデル　17
2.2.2. はく離同定手法　19
2.2.3. はく離形状　20
2.2.4. 同定結果　21
2.3. はく離形状が同定精度に与える影響　22
2.3.1. マトリックス割れを有するはく離　22
2.3.2. 同定結果　23
2.4. はく離形状に起因した同定誤差原因　27
2.5. 結言　34

第 3 章　2 段階同定電位差法による改善　37

3.1.　緒言　37
3.2.　はく離同定の原理　37
3.3.　有限要素法解析による検討　39
3.4.　繊維体積含有率による影響　47

3.5.　はく離実験による検討　54
3.5.1.　試験片形状　54
3.5.2.　はく離作成方法　55
3.5.3.　電極間電位差変化測定回路　56
3.5.4.　電位差変化の測定及び同定手順　58
3.5.5.　多数回のはく離実験による応答曲面作成　59
3.5.6.　同定結果　59
3.6.　結言　63

第 4 章　非対称電流負荷電位差法による改善　65

4.1.　緒言　65
4.2.　試験片形状及び解析方法　65
4.3.　はく離同定の原理　66
4.4.　はく離同定方法　71
4.5.　有限要素法解析による検討　72
4.5.1.　応答曲面作成　72
4.5.2.　同定結果　73
4.6.　はく離実験による検討　75
4.6.1.　試験片形状　75
4.6.2.　電極間電位差変化測定回路　75
4.6.3.　電位差変化の測定及び同定手順　75
4.6.4.　多数回のはく離実験による応答曲面作成　76
4.6.5.　同定結果　76
4.7.　結言　78

第 5 章　等価導電率による実験回数削減法　79

5.1.　緒言　79
5.2.　等価導電率について　79
5.3.　CFRP 積層板の導電率の範囲　80
5.4.　等価導電率の探索方法　82
5.5.　2 段階同定電位差法への適用　83

5.5.1.　等価導電率の探索　83
5.5.2.　等価導電率を用いた FEM 解析結果より作成した応答曲面でのはく離同定　86
5.5.3.　繊維体積含有率による影響　90
5.6.　非対称電流負荷電位差法への適用　92
5.6.1.　等価導電率の探索　92
5.6.2.　等価導電率を用いた FEM 解析結果より作成した応答曲面でのはく離同定　95
5.7.　結言　97

第 6 章　電位差法及び電気抵抗変化法の同定精度比較　101

6.1.　緒言　101
6.2.　試験片形状　101
6.3.　はく離同定方法　101
6.4.　はく離同定　102
6.4.1.　解析方法　102
6.4.2.　応答曲面作成　103
6.4.3.　同定結果　103
6.5.　各手法の特徴及び電極間隔による同定精度の比較　108
6.5.1.　2 段階同定電位差法　108
6.5.2.　非対称電流負荷電位差法　110
6.5.3.　電気抵抗変化法　113
6.5.4.　電極間隔の影響　116
6.6.　ノイズによる影響　127
6.7.　結言　141

第 7 章　結　　論　145

印刷論文 153
その他の業績一覧 154

Appendix A　―逆問題解析手法（応答曲面法）― 159

A.1.　最小二乗法 159
A.2.　t 検定による回帰係数の有意性判定 161
A.3.　実験計画法 162

Appendix B　―電極間電位差変化測定回路での測定値― 165

Appendix C　―はく離実験結果― 169

C.1.　2 段階同定電位差法に対するはく離実験結果 169
C.2.　非対称電流負荷電位差法に対するはく離実験結果 171

第 1 章

緒　論

1.1.　研究背景

構造物を安全かつ合理的に運用するために構造ヘルスモニタリング技術が注目されている．航空機，船舶，鉄道及び自動車などの輸送機器，ビルや橋梁，トンネルなどの土木建築構造物，また，圧力容器や発電プラントなどの機械構造物の重大事故は社会的影響が大きく，企業の損失のみならず人的被害や環境汚染など，その被害は多岐に渡る可能性を有している．材料の破壊現象は一般的に確率論的，統計的性質を有しており，かつ様々な外力作用や使用環境の違いにより劣化や磨耗，破壊プロセスも異なるために複雑であるため，正確な予測は難しい．また，人的過失や偶発的要因などからも事故をなくすことは非常に困難である．

これまでの事故に学べば[(1)]，構造物の健全性を常時監視することで磨耗や損傷状況を把握し，評価することが必要である．このことは，事故を未然に防ぐだけではなく，運用状況の異なる構造物でもそれぞれに部品交換時期の最適化や余寿命予測などに利用することできるため，運用コストの削減や検査サイクルの最適化による稼働率の向上にも役立つ．このような社会的背景から，構造ヘルスモニタリング技術の発展が期待されている[(2-6)]．

炭素繊維強化複合材料（Carbon Fiber Reinforced Plastic：CFRP）は従来金属と比較して優れた比強度，比剛性や耐疲労特性を有しており，航空宇宙産業や輸送機器産業，土木建築産業において適用が拡大している．特に航空機分野においては環境負荷や運用コスト削減のために更なる構造の軽量化が求められており，破損が直接墜落を導かない二次構造から，翼や胴体などの一次構造へと適用され始めている[(7-11)]．しかしながら，CFRP 積層板が構造強度部材として使用される場合，積層構造であることから小さな衝撃でも容易に層間はく離を生じ，強度が著しく低下することが問題となっている．

CFRP 積層板は異物衝撃損傷（Foreign object damage: FOD）によって圧縮強度・剛性が大きく低下するため，衝撃後圧縮（Compression after impact: CAI）強度が重要な材料評価項目となっている[(12-15)]．これは，外部衝撃などにより積層板内部に層間はく離が発生することで，積層板の座屈荷重が著しく低下することに起因する．層間はく離は目視検査での発見が困難であり，航空機構造設計では，実際の CFRP 強度の約 20～30%での設計を行っているのが実情である．

複合材料の適用を妨げている要因の一つは破壊メカニズムの複雑さであり, 従来金属と比べてその解明は十分ではない. 構造物の健全性を保証するため, 更には定期検査に要する膨大なコスト削減のために, CFRP 積層板に適用可能なヘルスモニタリングシステムの構築が急務となっている.

1.2.　従来の非破壊検査手法

CFRP に適用可能な従来非破壊検査法としては, 超音波探傷検査, X 線検査, AE（Acoustic Emission）検査, 渦電流探傷検査, サーモグラフィー検査, コインタッピング検査や目視検査などが用いられている. しかしながら, 特に超音波探傷検査や X 線検査などは小さな欠陥も検出することが可能であるが, 一般的に装置の制約から検査対象の大きさに制限があること, 探触子などで構造全体を走査する必要があるために要する時間やコストが膨大であること, 構造物の稼動時の損傷モニタリングが困難であることなどの問題点がある. また, 構造物の分解を伴う場合には, 経済的, 時間的損失は更に大きくなる. このような背景から, 稼動中もしくは定期検査時に簡便で非破壊的に層間はく離を精度良く検出するヘルスモニタリングが望まれている.

1.3. 近年のヘルスモニタリング手法

CFRP に適用可能なヘルスモニタリング手法としては, 光ファイバセンサーや圧電材料を用いるもの, CFRP 自体の振動特性変化, 電気特性変化を利用する方法が研究されている.

光ファイバを用いる方法[16-18]では, 電磁気的なノイズに強く, 一本の光ファイバに測定点を多数配置することにより任意の点における測定や, 分布センシングも可能である. また, 近年では細径のファイバ（一次被覆までの直径が約 50μm）も開発されており, ファイバ埋め込みによる強度低下[19, 20]を低減している[21, 22]. しかしながら, 光ファイバは非常に高価であること, 修復が困難であり, ファイバの一部損傷が他の部分でのモニタリングにも影響を与えること, 更に, センサから離れた場所では検出が困難であることなどの問題点がある.

圧電材料は応力の負荷による電圧の発生や, 逆に電圧負荷によって伸縮する性質を利用し, 圧電フィルムや素子を表面に実装したり, 積層板内部へ埋め込むことによって衝撃や損傷をモニタリングする研究がされている[23-27]. 例えばFu-Kou Changらは高分子フィルム上に圧電素子をプリントした SMART レイヤー[28-32]を積層板内部に埋め込み, パッシブセンシングによる衝撃荷重測定, アクティブセンシングによる損傷同定を提案している. しかしながら, この方法では衝撃力の推定やその位置同定は可能であるが, 衝撃力とはく離発生及びはく離の大きさなどを直接的に関係付けることが困難であるという問題点がある. また, アクチュエータから弾性波を発生させて探傷する方法では, 小さなはく離の検出が困難であり, 検出方法も研究段階である.

振動特性変化を利用する方法[33-37]では, 既存のセンサや装置を用いて容易に測定できる利点がある. しかしながら, 使われる周波数帯は対象構造物の一次固有振動数から高くても数 kHz 程度であり, 小さな損傷では構造物の振動特性は大きく変化しないために高精度な同定は難しい. また, システムが稼動中でないときには検出できない.

CFRP は強化材である炭素繊維が導電性を有していることから[38, 39], はく離に起因した積層板の電気特性変化を利用したモニタリングが可能である. この方法ではセンサ埋め込みによる強度低下が発生せず, はく離に起因した電気特性変化を測定するためには電極を設置するだけでよく安価である. 更に, 既存の構造物にも適用可能であり, システム補修も容易であるという利点を有する. 電気特性変化を利用したモニタリング手法である電位差法について次に説明する.

1.4.　電位差法

電位差法は従来金属の表面及び内部欠陥, 損傷状態を定量化する非破壊検査方法としてこれまでに多数の研究がなされている. 欠陥（き裂等）を有する導電性部材に電流を流した場合, 欠陥はその寸法や位置, 向きに応じて電流の流れを妨げるために, 部材内部での電位分布に乱れが生じる. 電位差法はこの変化を測定することにより, 欠陥の位置, 寸法, 深さなどを評価する方法である.

電位差法には直流電流（直流電位差法）を用いるものと, 交流電流（交流電位差

法）を用いるものがある．直流電位差法では金属の表面き裂[40-43]や埋没き裂[44, 45]，分岐き裂[46, 47]，複数き裂[48]など様々検討がなされ，数値解析を用いた逆問題解析手法によりき裂位置や形状の推定が可能であることが示されている[49-57]．

一方，交流電位差法は負荷電流の周波数を上げると，電流が表面近傍だけに流れる表皮効果を利用することで，表面欠陥に対する感度が上げられる特徴がある．従って，表皮効果により負荷電流が小さくても表面欠陥による電位差変化が測定可能となるため，装置の小型化や熱の発生による影響を低減することができる．また，電位分布に加えて位相及び周波数特性に関する情報も測定することができ，欠陥推定のための情報量は多い．しかしながら，電位差変化とはく離との関係を数値解析により得るためには動電磁場解析を行わなければならず，磁化特性の取り扱いや，導体まわりの空気層の電磁界変化も解析する必要があるために複雑となる[58-61]．

CFRP 積層板では多数の導電性の炭素繊維が絶縁体である樹脂に埋め込まれた状態であり，繊維方向については繊維一本一本をそれぞれ抵抗とみなした並列回路に部分的に繊維同士が接触した複雑なネットワークを形成している[62-63]．また，繊維直交方向には繊維間に樹脂が存在するためにキャパシタンス成分が生じ，RC 回路モデルとなる[64-66]．従って，CFRP 積層板として導電性を有することから，電位差法を用いたヘルスモニタリングが可能である．

1.5.　CFRP 積層板はく離検知への電位差法の適用

電位差法の等方性導体材料以外への適用も多数研究されており，特に CFRP 積層板については，層間はく離やマトリックス割れ，スプリッティングや繊維破断[67-76]，負荷ひずみ[77-82]，疲労[83-86]などをモニタリングする研究がなされている．しかしながら，これらはひずみや損傷に伴う電気特性変化のモニタリングのみであり，損傷の位置や範囲を詳細に検出することを目的とした論文は少なく[87-92]，CFRP を用いて実験的にもはく離同定を成功している研究はない．一方，轟ら[93-96]は層間はく離の位置及び寸法を同定する方法を提案し，実験的にもその有効性を示している．

轟らははく離に伴う CFRP 積層板の電気特性変化を利用したはく離同定を実施してきた．これまでの研究において，CFRP 積層板の表面に複数電極を設置し，隣接電極間電流負荷時の電極間電気抵抗変化からはく離の位置とその大きさの同定

が可能であることが示された[93-96]．ここで，電気抵抗変化法とは，電位差法における電流負荷電極と電圧測定電極とが同一の場合である．轟らは，ひずみゲージ測定に用いられる一般的なブリッジ回路を用いてはく離に伴う電極間電気抵抗変化率を測定している[93-95]．しかし，この電気抵抗変化法は同定精度が高いが，測定回路を順次切替えて多数回の電流負荷が必要であるために測定に時間が掛かり，システム回路も複雑となる．また，2 電極法を用いるために電極不都合の影響を受けて，大きく誤同定する可能性を有している．

これらの問題を改善する方法としては，一対の電流電極と多数の電圧電極を設置する電位差法を採用し，電流を構造全体に流した状態で電圧電極間電位差を測定すればよい．この方法では電気抵抗変化法のように多数回の電流負荷が必要なく，また，電流電極と電圧電極を分離するために電極不具合の影響も分離可能となる．しかしながら，平板全体に電流を流す轟らの研究では，電気抵抗変化法と比べて同定精度が大幅に低下することが示されている[97,98]．

1.6.　研究目的

本論文では，航空機など CFRP 積層板を強度部材として使用する構造物の健全性評価の観点から，電位差法を用いた簡便で低コストかつ，リアルタイムモニタリング可能な精度良い層間はく離同定方法に関する研究を行った．多数回の電流負荷が必要であり，電極部での接触抵抗に影響を受けて大きく誤同定する可能性を有する電気抵抗変化法の問題点を改善し，かつ電気抵抗変化法と同等な同定精度を持つ新しい電位差法を提案し，その有効性を実証することを目的とした．

1.7. 本論文の構成

本論文の構成は以下に示す 7 章からなる．

第 1 章「緒論」

研究背景として CFRP 積層板に対するはく離モニタリングの必要性と，従来の研究について述べ，本研究の目的を示した．

第 2 章「電位差法の問題点」

はく離に起因した電位差変化からはく離を同定する逆問題解析方法について述べた．CFRP 積層板の層間はく離は表面欠陥でないこと，数値解析が容易であること，測定に必要な機器が低コストであることから直流電流を用い，一般的な電位差法を適用し，CFRP 積層板内に存在する層間はく離同定を解析的に行った．その結果, 電位差法ではは く離形状に依存して大きな誤同定を導く可能性があることを示した．更に，はく離形状によって誤同定を導く原因を明らかとし，電位差法の問題点を示した.

第 3 章「2 段階同定電位差法による改善」

電位差法の問題点を解決するために，2 段階同定電位差法を提案した．この方法によりはく離形状に依存せずに精度良くはく離が同定可能であることを解析的に示した．電位差法では，炭素繊維の導電性を利用するため，はく離同定精度は積層板の導電率に依存する．従って，繊維体積含有率の差異による積層板の導電率の違いを考慮し，同定精度を検討した．また，梁型試験片による多数回のはく離実験を実施し，実はく離も同定可能であることを合わせて示し，その有効性を明らかとした.

第 4 章「非対称電流負荷電位差法による改善」

電位差法の問題点を解決するもう一つの方法として, 非対称電流負荷電位差法を提案した．この方法がはく離形状に依存しない原理を説明し，解析及び実験的にはく離を同定して提案手法の有効性を示した.

第 5 章「等価導電率による実験回数削減法」

2 段階同定電位差法と非対称電流負荷電位差法では，逆問題解析手法として応答曲面法を用いた．応答曲面作成には多数の学習データが必要であるため，第 3 及び 4 章では多数回のはく離実験を実施することによりそのデータを得た．しかしながら，本手法の実機構造への適用を考慮した場合，はく離試験を多数回実施することは非常に高コストとなる．本章では，多数回のはく離実験を行わずに，かつ精度良くはく離を同定するため，等価導電率を用いた FEM 解析により応答曲面作成用学習データを取得する実験回数削減法を提案した.

第 6 章「電位差法と電気抵抗変化法の同定精度比較」

提案した 2 つの電位差法と電気抵抗変化法の同定精度の比較を行った．また，電極間隔が同定精度に与える影響や，電磁ノイズによる影響について検証し，電気抵抗変化法と比較して提案手法の有効性を示した．

第 7 章「結論」

各章において得られた結果をまとめ，本論文による成果を述べた．

参　考　文　献

[1] 失敗知識データベース http://shippai.jst.go.jp/fkd/Search, 独立行政法人 科学技術振興機講.

[2] スマートコンポジットに関する調査, 財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会, 平成 6 年度調査報告書, NEDO-IT-93001.

[3] 知的構造システムの先導研究, 財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会, 平成 7～8 年 先導研究報告書, NEDO-PR-9611, NEDO-PR-95011

[4] 知的材料・構造システムの研究開発, 財団法人 次世代金属・複合材料研究開発協会,平成 10 年度～14 年度 成果報告書.

[5] 非破壊検査, 特集　構造ヘルスモニタリング, 52(4), (2003), 173-193.

[6] 日本複合材料学会編, 複合材料活用辞典, 産業調査会, (2001), 775-813.

[7] 天岡和昭, 神山隆之, こんなところに複合材料―航空機複合材料部品の適用化と展開―（紹介）, 27(5), (2001), 251-254.

[8] C.E.Harris, J.H.Starnes Jr, and M.J.Shuart, “An assessment of the state-of-the-art in the design and manufacturing of large composite structures for aerospace vehicles”, NASA/TM-2001-210844.

[9] 日本複合材料学会編, 複合材料活用辞典, 産業調査会, (2001), 6-38.

[10] 景山正美, 荒田昇, 横山映, 小祝弘道, 吉田慎一, 吉田幹根, 星恒憲, XF-2 の一体成形複合材主翼構造の開発, 複合材料学会誌, 28(2), (2002), 80-84.

[11] 酒井康行, 超大型旅客機 A380 の構造材料技術（解説）, 日本複合材料学会誌, 29(5), (2003), 171-176.

[12] 日本複合材料学会編, 複合材料ハンドブック, 日刊工業新聞社, (1989), 112.

[13] 三木光範, 福田武人, 元木信弥, 北條正樹, 複合材料, 共立出版, (1997), 164-166.

[14] 炭素繊維強化プラスチックの衝撃後圧縮試験方法, JIS-K7089, (2004).

[15] Composite Materials Handbook, volume 3. Polymer matrix composites materials usage, design, and analysis, MIL-HDBK-17, Department of defense, USA, (1997).

[16] 村山英晶, 景山和郎, 成瀬央, 島田明佳, 鵜沢潔, 光ファイバセンサによる大型複合材料構造のヘルスモニタリング, 日本複合材料学会誌, 28(5), (2005), 176-188.

[17] S.Takeda, Y.Okabe, and N.Takeda, “Delamination detection in CFRP laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors”, Composites: Part A, 33, (2002), 971-980.

[18] Y.Okabe, R.Tsuji, and N.Takeda, “Application of chirped fiber Bragg grating sensors for identification of crack locations in composites”, Composites: Part A, 35, (2004), 59-65.

[19] M.Surgeon and M.Wevers, “The influence of embedded optical fibres on the fatigue damage progress in quasi-isotropic CFRP laminates”, Journal of Composite Materials, 35(11), (2001), 931-939.

[20] K.Levin and R.Jarlas, “Vulnerability of embedded EFPI-sensors to low-energy impacts”, Smart Materials and Structures, 6, (1997), 369-382.

[21] K.Satori, Y.Ikeda, Y.Kurosawa, A.Hongo, and N.Takeda, “Development of small-diameter optical fiber sensors for damage detection in composite laminates”, Sensory phenomena and measurement instrumentation for smart structures and materials, SPIE 2002; 4328:285-295.

[22] N.Takeda, Y.Okabe, J.Kuwahara, S.Kojima, and T.Ogisu, “Development of smart composite structures with small-diameter fiber bragg grating sensors for damage detection: quantitative evaluation of delamination length in CFRP laminates using lamb wave sensing”, Composites Science and Technology, 65, (2005), 2575-2587.

[23] S.S.Kessler, S. M.Spearing, and C.Soutis, “Damage detection in composite materials using Lamb wave methods”, Smart Materials and Structures, 11, (2002), 269-278.

[24] S.Grondel, C.Paget, C.Delebarre, J.Assaad, and K.Levin, “Design of optimal configuration for generating A_0 Lamb mode in a composite plate using piezoceramic transducers”, Journal of Acoustical Society of America, 112, (2002), 84-90.

[25] C.Bois and C.Hochard, “Monitoring of laminated composites delamination based on electro-mechanical impedance measurement”, Journal of intelligent material systems and structures, 15, (2004), 59-67.

[26] 田島賢典, 松本賢, 福永久雄, PZT 圧電センサによる CFRP 積層板の衝撃荷重同定（第 1 報, 衝撃荷重同定の定式化と数値シミュレーション）, 日本機械学会論文集（A 編）, 70(699), (2004), 1566-1573.

[27] 田島賢典, 松本賢, 福永久雄, PZT 圧電センサによる CFRP 積層板の衝撃荷重同定（第 2 報, 実験による検証）, 日本機械学会論文集（A 編）, 70(700), (2004), 1747-1754.

[28] C.H.Keilers and F.K.Chang, “Identification delamination in composite beams using built-in piezoelectrics: Part Ⅰ- Experimental and analysis”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 6, (1995), 649-663.

[29] C.H.Keilers and F.K.Chang, “Identification delamination in composite beams using built-in piezoelectrics: Part Ⅱ- An identification method”, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 6, (1995), 664-672.

[30] R.Seydel and F.K.Chang, “Impact identification of stiffened composite panels: Ⅰ. System development”, Smart Materials and Structures, 10, (2001), 354-369.

[31] R.Seydel and F.K.Chang, “Impact identification of stiffened composite panels: Ⅱ. Implementation studies”, Smart Materials and Structures, 10, (2001), 370-379.

[32] H.Fukunaga, N.Hu, and F.K.Chang, “Structural damage identification using piezoelectric sensors”, International journal of Solids and Structures, 39, (2002), 393-418.

[33] A.S.Islam and K.C.Craig, “Damage detection in composite structures using piezoelectric materials (and neural net)”, Smart Materials and Structures, 3, (1994), 318-328.

[34] A.C.Okafor, K.Chandrashekhara, and Y.P.Jiang, “Delamination prediction in composite beams with built-in piezoelectric devices using modal analysis and neural network”, Smart Materials and Structures, 5, (1996), 338-347.

[35] 邉吾一, 西恭一, 黄一正, 藤川由美, ニューラルネットと実験データによる CFRP 積層板の損傷同定, 日本機械学会論文集（A 編）, 62(602), (1996), 2338-2343.

[36] 邉吾一, 山口達也, 福田行義, 青木義男, K.C. Park, 局所フレキシビリティー法による CFRP 積層材の損傷同定, 日本機械学会論文集（A 編）, 66(644), (2000), 721-726.

[37] 荻芳郎, 福永久雄, 亀山正樹, 動的残差力に基づく積層板の損傷同定, 日本複合材料学会誌, 26(6), (2000), 236-242.

[38] C.N.Owston, “Electrical properties of single carbon fibres”, Journal of Physics D: Applied Physics, 3, (1970), 1615-1626.

[39] X.Wang and D.D.L.Chung, “Piezoresistive behavior of carbon fiber in epoxy”, Carbon, 35(10-11), (1997), 1649-1679.

[40] 矢川元基, 福田俊彦, 破壊力学における電位差法の適用（1）, 機械の研究, 35(11), (1983), 1224-1337.

[41] 矢川元基, 福田俊彦, 破壊力学における電位差法の適用（2）, 機械の研究, 35(12), (1983), 1324-1330.

[42] 矢川元基, 福田俊彦, 破壊力学における電位差法の適用（3）, 機械の研究, 36(1), (1984), 27-32.

[43] 坂田信二, 林真琴, 清水翼, 志田茂, 電気ポテンシャル法による表面き裂の解析, 材料, 32(354), (1983), 96-101.

[44] 阿部博之, 坂真澄, 和知豪, 直流電位差法による埋没き裂の非破壊検査, 非破壊検査, 35(5), (1986), 326-332.

[45] 阪上隆英, 久保司郎, 橋本健, 山脇弘, 大路清嗣, マルチ電流負荷方式を用いた電気ポテンシャル CT 法による未知内部き裂の位置及び傾斜角の測定, 日本機械学会論文集（A 編）, 53(492), (1987), 1598-1605.

[46] M.Saka, D.Yuasa, H.abe, and K.Sugino, “Nondestructive characterization of bifurcated crack by potential drop technique”, Nondestructive Testing and Evalustion, 7,(1992), 61-72.

[47] 坂真澄,　油浩一郎,　阿部博之, 電流入出力端子と電位差計測端子を近接させた直流電位差法による分岐き裂の非破壊評価, 日本機械学会論文集（A 編）, 63(606), (1997), 352-357.

[48] N.Tada, Y.Hayashi, T.Kitamura, and R.Ohtani, “Analysis on the applicability of direct current electrical potential method to the detection of damage by multiple small internal cracks”, International Journal of Fracture, 85, (1997), 1-9.

[49] 林眞琴, 坂田信二, 清水翼, 志田茂, 直流ポテンシャル法による表面き裂形状の検出, 材料, 33(368), (1984), 94-100.

[50] 大路清嗣, 久保司郎, 阪上隆英, 電気ポテンシャル CT 法による二次元，三次元き裂形状測定に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集（A 編）, 51(467), (1985), 1818-1827.

[51] T.Sakagami, S.Kubo, and K.Ohji, ”Crack identification by the electric potential CT inverse analyses incorporating optimization technique” Engineering analysis with boundary elements, 7(2), (1990), 59-65.

[52] 嘉納豊, 阿部博之, 直流電位差法による三次元き裂の形状評価法の提案, 日本機械学会論文集(A 編), 58(547), (1992), 412-419.

[53] 嘉納豊, 阿部博之, 直流電位差法による溶接部に存在する三次元き裂の形状評価, 日本機械学会論文集(A 編), 58(547), (1992), 420-425.

[54] N.Tada, “Monitoring of a surface crack in a finite body by means of electrical potential technique”, International Journal of Fracture, 57, (1992), 199-220.

[55] M.Saka, A.Oouchi, and H.Abe, “NDE of a Crack by Using Closely Coupled Probes for DCPD Technique”, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 118(2), (1996), 198-202.

[56] M.Saka, D.Hirota, H.Abe, and I.Komura, “NDE of a 3-D Surface Crack Using Closely Coupled Probes for DCPD Technique”, Transactions of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, 120(4), (1998), 374-378.

[57] M.Akama and M.Saka, “Nondestructive sizing of a 3D surface crack generated in a railway component using closely coupled probes for direct-current potential drop technique”, Engineering Fracture Mechanics, 72, (2005), 319-334.

[58] Y.Isono, M.Sakane, M.Ohnami, and K.Fujiyama, “Multiaxial low-cycle fatigue damage evaluation using a.c. potential method for alloy 738LC superalloy”, Journal of Engineering Materials and Technology, 116(4), (1994), 488-494.

[59] 片山晴彦, 坂根政男, 大南正瑛, 交流電位差法による表面き裂検出の実験及び有限要素法による検討, 日本機械学会論文集（A 編）, 62(602), (1996), 2216-2223.

[60] 高木圭介, 坂根政男, 大南正瑛, 岡部永年, 藤山一成, 交流電位差法による耐食コーティング超合金 Inconel 738LC の高温低サイクル疲労き裂検出, 材料, 46(1), (1997), 58-64.

[61] 李年慶, 坂根政男, 交流電位差法による複数き裂検出法の開発, 日本機械学会論文集（A 編）, 68(672), (2002), 72-79.

[62] J.Xiao, Y.Li, and W.X.Fan, “A laminate theory of piezoresistance for composite laminates”, Composites Science and Technology, 59, (1999), 1369-1373.

[63] K.Ogi and Y.Takao, “Characterization of piezoresistance behavior in a CFRP unidirectional laminate”, Composites Science and Technology, 65, (2005), 231-239.

[64] W.M. Banks, F.Dumolin, S.T.Halliday, D.Hayward, Z.C.Li, and R.A.Pethrick, “Dielectric and mechanical assessment of water ingress into carbon fibre composite materials”, Computers & Structures, 76(1-3), (2000), 43-55.

[65] 島村佳伸, 占部貴之, 轟章, 小林英男, 電気インピーダンス変化による CFRP の吸湿モニタリング, 日本複合材料学会誌, 30(5), (2004), 175-181.

[66] 稲田貴臣, 轟章, 電気容量変化の交流周波数依存を用いた CFRP の成形モニタリング, 材料, 52(8), (2003), 922-926.

[67] K.Schulte and C.Baron, “Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements”, Composites Science and Technology, 36, (1989), 63-76.

[68] K.Moriya and T.Endo, “A study on flaw detection method for CFRP composite laminates (The measurement of crack extentsion in CFRP composites by electrical potential method)”, Transactions of the japan society for aeronautical and space sciences, 32(98), (1990), 184-196.

[69] R.Prabhakaran, “Damage assessment through electrical resistance measurement in graphite fiber-reinforced composites”, Experimental Techniques, 14, (1990), 16-20.

[70] J.C.Abry, Y.K.Choi, A.Chateauminois, B.Dalloz, G.Giraud, and M.Salvia, “In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements”, Composites Science and Technology, 61, (2001), 855-864.

[71] J.C.Abry, S.Bochard, A.Chateauminois, M.Salvia, and G.Giraud, “In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements”, Composites Science and Technology, 59, (1999), 925-935.

[72] J.W.Cho and J.S.Choi, “Relationship between electrical resistance and strain of carbon fibers upon loading”, Journal of Applied Polymer Science, 77, (2000), 2082-2087.

[73] M.Kupke, K.Shulte, and R.Schüler, “Non-destructive testing of FRP by d.c. and a.c. electrical methods”, Composites Science and Technology, 61, (2001), 837-847.

[74] T.Prasse, F.Michel, G.Mook, K.Schulte, and W.Bauhofer, “A comparative investigation of electrical resistance and acoustic emission during cyclic loading of CFRP laminates”, Composites Science and Technology, 61, (2001), 831-835.

[75] O.Ceysson, M.Salvia, and L.Vincent, “Damage mechanisms characterization of carbon fibre/epoxy composite laminate by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis”, Scripta Materialia, 32(8), (1996), 1273-1280.

[76] K.Yuse, F.Dalmas, L.Flandin, and J-Y.Cavaillé, “Coupled mechanical and conductivity measurements: Damage detection”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 21, (2002), 183-192.

[77] A.S.Kaddour, F.A.R.Al-Salehi, and S.T.S.Al-Hassani, “Electrical resistance measurement technique for detecting failure in CFRP materials at high strain rates”, Composites Science and Technology, 51 (1994), 377-385.

[78] X.Wand and D.D.L.Chung, “Continuous carbon fibre epoxy-matrix composite as a sensor of its own strain”, Smart Materials and Structures, 5, (1996), 796-800.

[79] S.Wang and D.D.L.Chung, “Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix composite”, Polymer Composites, 21(1), (2000), 13-19.

[80] S.Wang and D.D.L.Chung, “Electrical behaviour of carbon fiber polymer-matrix composites in the through-thickness direction”, Journal of Materials Science, 35, (2000), 91-100.

[81] D.D.L.Chung, “Structural health monitoring by electrical resistance measurement”, Smart Materials and Structures, 10, (2001), 624-636.

[82] N.Angelidis, C.Y.Wei, and P.E.Irving, “The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain”, Composites: Part A, 35, (2004), 1135-1147.

[83] X.Wang and D.D.L.Chung, “Self-monitoring of fatigue damage and dynamic strain in carbon fiber polymer-matrix composite”, Composites: Part B, 29B, (1998), 63-73.

[84] P.E.Irving and C.Thiagarajan, “Fatigue damage characterization in carbon fibre composite materials using an electrical potential technique”, Smart Materials and Structures, 7, (1998), 456-466.

[85] D.C.Seo and J.J.Lee, “Damage detection of CFRP laminates using electrical resistance measurement and neural network”, Composite Structures, 47, (1999), 525-530.

[86] I.Weber and P.Schwartz, “Monitoring bending fatigue in carbon-fibre/epoxy composite strands: a comparison between mechanical and resistance techniques”, Composites Science and Technology, 61(2001), 849-853.

[87] R.Schueler, S.P.Joshi, and K.Schulte, “Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping”, Composites Science and Technology, 61, (2001), 921-930.

[88] S.Kubo, M.Kuchinishi, T.Sakagami, and S.Ioka, “Identification of delamination in layered composite materials by the electric potential CT method”, Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 15, (2002), 261-268.

[89] L.Hou and S.A.Hayes, “A resistance-based damage location sensor for carbon-fibre composites”, Smart Materials and Structures, 11, (2002), 966-969.

[90] T.A.Anderson and G.I.Lemoine, “An artificial neural network based damage detection scheme for electrically conductive composite structures”, 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, (2003), 1-9.

[91] G.I.Lemoine, K.W.Love, and T.A.Anderson, “An electric potential-based structural health monitoring technique using neural networks”, The 4th international workshop, structural health monitoring, (2003), 387-394.

[92] N.Angelidis, N.Khemiri, and P.E.Irving, “Experimental and finite element study of the electrical potential technique for damage detection in CFRP laminates”, Smart Materials and Structures, 14, (2005), 147-154.

[93] 田中雄樹, 轟章, 島村佳伸, 複数電極電気抵抗変化の応答曲面を用いた CFRP はく離検出知的構造の開発, 日本機械学会論文集(A 編), 65(640), (1999), 2432-2438.

[94] A.Todoroki and Y.Tanaka, “Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method”, Composites Science and Technology, 62 (2002), 629-639.

[95] A.Todoroki, Y.Tanaka, and Y.Shimamura, “Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method”, Composites Science and Technology, 62, (2002), 1151-1160.

[96] A.Todoroki, M.Tanaka, and Y.Shimamura, “High performance estimations of delamination of graphite/epoxy laminates with electric resistance change method”, Composites Science and Technology, 63, (2003), 1911-1920.

[97] 轟章, 鈴木洋之, 島村佳伸, 電気ポテンシャル法を用いた CFRP 層間はく離き裂の同定, 日本機械学会論文集（A 編）, 65(634), (1999), 1330-1336.

[98] 轟章, 田中雄樹, 島村佳伸, 小林 英男, 多点電圧変化による CFRP 平板の埋没はく離知的検出構造, 日本機械学会論文集（A 編）, 67(658), (2001), 1002-1008.

第 2 章

電位差法の問題点

2.1.　緒　言

本章では，積層板片側表面の両端に 1 対の電流電極と，その間に多数の電圧電極を設置した電位差法を適用し，はく離に起因した電極間電位差変化よりはく離位置及び寸法を同定する方法について述べる．ここで，電極を積層板片側表面にのみ設置するのは，航空機構造への適用を考慮した場合には電極を構造外側には設置できないことが多いためである．従って，本論文では以降全て，電極は積層板片側表面にのみ作成する．

電気抵抗変化法では，はく離に起因した電極間電気抵抗変化を測定するために，全隣接電極間にそれぞれ電流を負荷して電気抵抗を測定する必要があるため，測定システムが複雑となる．また，電流干渉の影響を避けるために電極間ごとに順次通電し，測定する必要があることから，測定時間も長い．更に，電流電極と電圧測定電極が同一であるため，2 電極法による接触抵抗の影響を受けて測定値が大きく変化する可能性があり，大きな誤同定を導く．一方，電位差法では，電流は試験片端部から他端部に負荷するため，試験片全体に通電した状態ではく離に起因した電圧電極間電位差変化を同時に測定することができる．また，電流電極と電圧電極を分離して 4 電極法を用いるために，接触抵抗の影響を無視することが可能である．

ここでは，積層板表面に 7 個の電極を設置したモデルを用いて，FEM 解析によるはく離同定を実施した．また，前節で述べたとおり，CFRP 積層板は薄板であり層間はく離は表面欠陥でないこと，数値解析が容易であること，測定に必要な機器が低コストであることから，本稿では直流電位差法を用いた．

2.2.　電位差法による層間はく離同定

2.2.1.　解析モデル

本研究では，汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いて FEM 解析を行った．試験片形状は長さ 200mm，厚さ 1mm の二次元梁である（図 2-1 参照）．積層構成は直交積層$[0/90]_s$である．ここでは 1 層の厚さを 0.5mm にしている．梁型試験片の片側表面には 7 個の電極を取り付けてある．

直交積層$[0/90]_s$では，電流を試験片両端部表面から負荷すると，試験片全体で厚さ方向電流が生じる（図 2-2 参照）．層間はく離発生によって CFRP 積層板内で電気的ネットワークが局所的に分断されるため, 積層板内で電位変化が生じることから, はく離発生前後での電極間電位差変化を測定することではく離の検出が可能となる．

FEM 解析では四角形四節点要素を用い，要素分割は x 方向を 0.25mm，z 方向を 0.0625mm とした．電極寸法は 5mm であり，電極での節点を結合して電位を等しくしている．また解析に用いた CFRP の導電率は参考文献[1]で，繊維体積含有率 V_f = 47.2%である CFRP で実測した値である．これを表 2-1 に示す．表 2-1 において，σ_0は繊維方位導電率，σ_{90}は繊維直交方位（90°方位）導電率，σ_tは厚さ方位導電率であり，厚さ方向導電率は層間樹脂リッチ層の影響も含んだ値である．

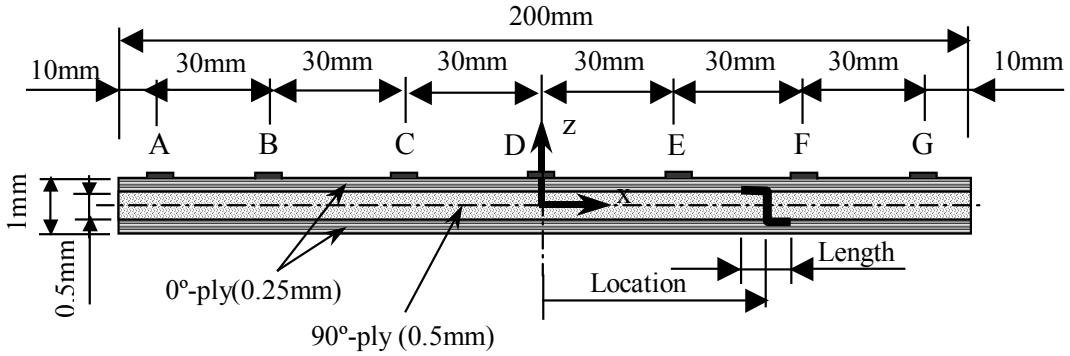


Fig. 2-1 Analytical model of laminated CFRP

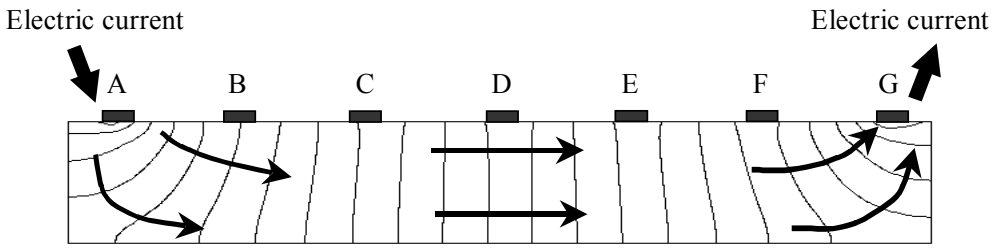


Fig. 2-2 Contour plot of electric potential

Table 2-1 Conductivity ratio σ

V_f [vol%]	σ_0 [S/m]	σ_{90}/σ_0	σ_t/σ_0
47.2	4.6×10^{3}	1.05×10^{-3}	2.24×10^{-4}

V_f : Fiber volume fraction
σ_0 : Conductivity of longitudinal direction
σ_{90}: Conductivity of transverse direction
σ_t : Conductivity of thickness direction

2.2.2. はく離同定手法

梁型試験片の端部電極から他端部電極まで電流を負荷するため，電極 A に電流を負荷し，電極 G の電位を 0V とした．はく離のない状態で電極 AD，BD，CD，DE，DF，DG 間の電位差 P_{i0} (i=1～6)を算出する．

次に，はく離を作成した状態で電流を負荷し，これらの電極間での電位差 P_i (i=1～6)を同様に求める．設定したはく離寸法は 5，7，10，15，20，25，30，35，40mm の 9 通りであり，はく離の位置は-90mm から 90mm までの区間において 5mm 間隔の位置で作成し，合計 315 通りの FEM 解析を実施する．ただし，はく離寸法が 20mm 以上の場合については，端部に貫通したはく離が生じないように 5mm づつ内側にはく離を設定した．

以上で得られたはく離発生に起因する電極間電位差からその変化率 $\Delta P_i/P_{i0}$ を算出し，規格化する．ここで，規格化とは 6 個の電極間電位差変化ベクトルを，その大きさで除して単位ベクトル化することである．はく離の位置及び寸法は規格化電極間電位差変化より応答曲面法を用いて推定される．応答曲面法については Appendix A 及び参考文献[(2)]を参照されたい．応答曲面の被説明変数がはく離位置の場合には，説明変数は規格化電極間電位差変化ベクトル $\Delta p_i/p_{i0}$ の 6 個であり，はく離寸法の場合にはノルム L も加えた計 7 個とした．

$$\Delta p_i = \frac{\Delta P_i / P_{i0}}{L} \quad (i = 1 \sim 6)$$
$$L = \sqrt{\sum_{k=0}^{6} \left(\Delta P_k / P_{k0} \right)^2} \tag{2-1}$$

応答曲面には 2 次多項式を採用する．

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^{\,2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i=i+1}^{n} \beta_{ji} x_j x_i \quad (n=6) \tag{2-2}$$

応答曲面作成の際には，有意水準を 5%とした t 検定により回帰寄与の低い項は削除し，自由度調整済み決定係数が最大になるようにした(Appendix A 参照).

2.2.3.　はく離形状

FEM 解析で模擬するはく離形状は図 2-3(a)に示す直線状の層間はく離である．梁型試験片は左右対称であるため，梁中央を原点とする．はく離位置は原点から層間はく離中央までの距離とし，はく離寸法は積層板表面への投影全長と定義する．ここで，直線状の層間はく離は電極側の層間に生じさせた．これは一般的に，衝撃を受けた反対側の層間に大きなはく離が発生するためである．FEM 解析において，はく離作成の際は，節点を二重に定義して要素分割を行い，はく離時に節点を分離して完全に電流が流れない状態を模擬している．

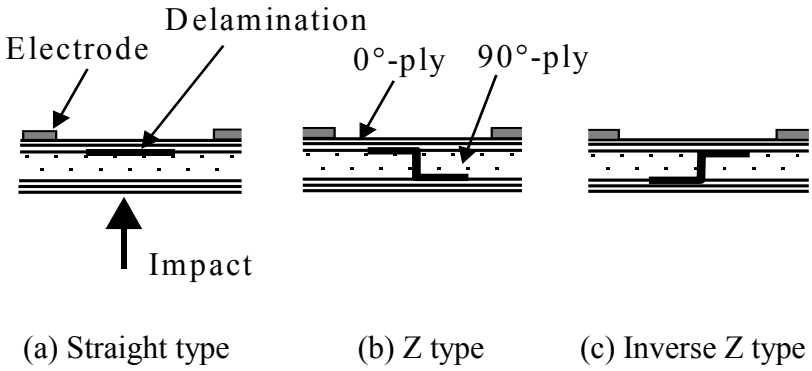
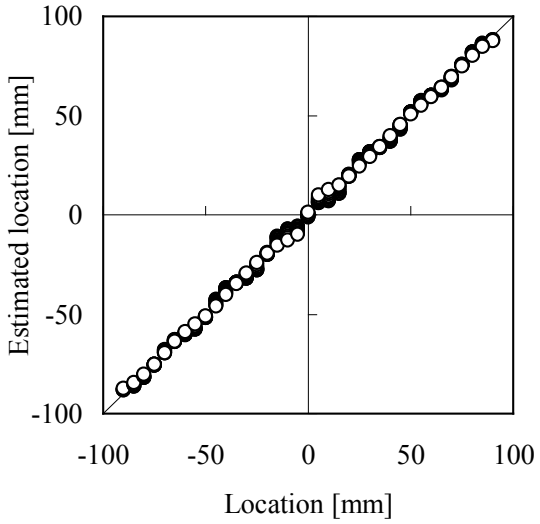


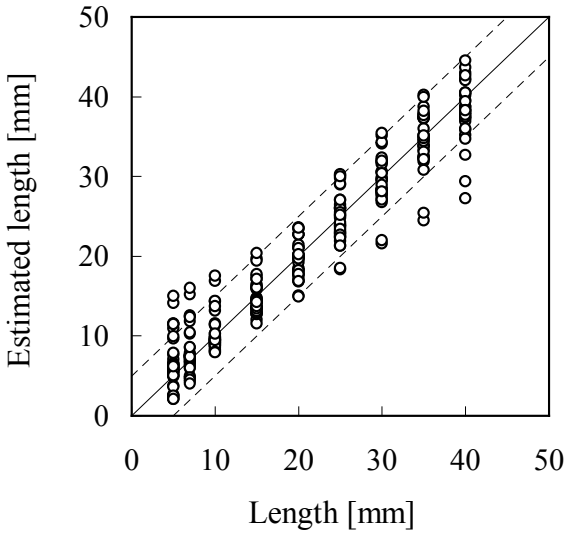
Fig. 2-3 Shapes of delamination crack

2.2.4.　同定結果

梁型試験片の端部電極から他端部電極まで電流 50mA を負荷し、FEM 解析により得られた直線状の層間はく離発生に起因した電極間電位差変化からはく離の位置と寸法を推定する 2 つの応答曲面を作成した．作成した応答曲面を用い，学習データである直線状の層間はく離の位置および寸法を同定した結果を図 2-4 に示す．



(a) Estimated location



(b) Estimated length

Fig. 2-4 Estimation results of straight delaminations using the response surfaces obtained from the analyses of straight delaminations

図の横軸は実際のはく離位置および寸法であり, 縦軸は応答曲面で推定したはく離の位置と寸法である. 従って, 対角線上に位置する結果は正確な推定を意味する. はく離位置及び寸法同定用応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 はそれぞれ 0.9988 および 0.9251 であり，学習データとして用いた直線状の層間はく離のみであれば，電位差法の同定精度は十分に高い.

2.3.　はく離形状が同定精度に与える影響

2.3.1.　マトリックス割れを有するはく離

実機において積層板に生じるはく離の形状は様々である. 前節で仮定した直線状の層間はく離だけではなく，実際のはく離形状はマトリックス割れを伴い，ジグザグ状の複雑な形をしている．しかしながら，はく離形状に依存して電極間電位差変化が大きく異なる場合には, それらを全て考慮して応答曲面を作成することは非常に困難であり，また，精度良く同定することも難しくなる．ここでは，直線状の層間はく離から作成した応答曲面を用いてマトリックス割れを伴うジグザグ形状のはく離の同定可能性を検討し, はく離形状の差異による同定精度への影響について検討する.

はく離の形状については直線状の層間はく離と, マトリックス割れを伴うジグザグ型はく離の例として Z 型及び逆 Z 型のはく離の 3 種類を想定した（図 2-3 参照）. Z 型のはく離とは, マトリックス割れを挟んで左上と右下に等長の層間はく離を持つはく離であり，逆 Z 型はその対称形である．上部と下部のはく離長さの比率はそれぞれ等しい場合が最も直線状の層間はく離との差異が大きいため, ここでは等長の Z 型および逆 Z 型のはく離の影響だけを考えた[3].

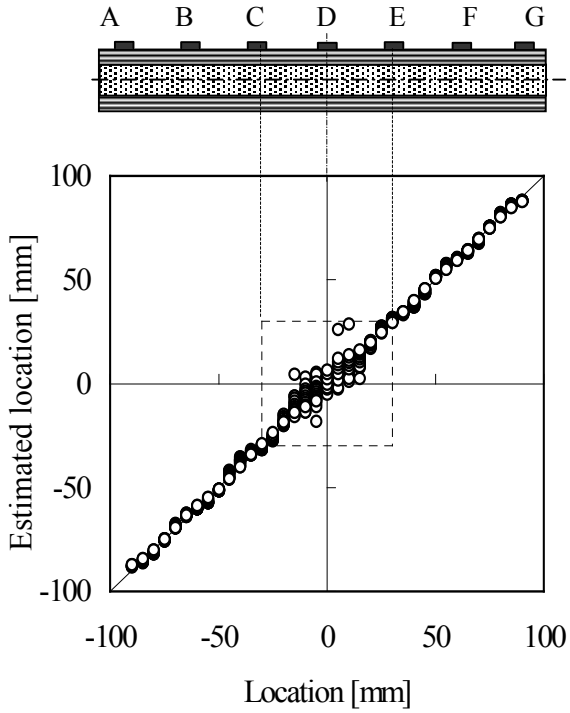
Z型及び逆Z型のはく離の位置についてはマトリックス割れの位置（はく離中央）までの距離をその位置と定義する．また，はく離寸法は積層板表面への投影全長である.

2.3.2.　同定結果

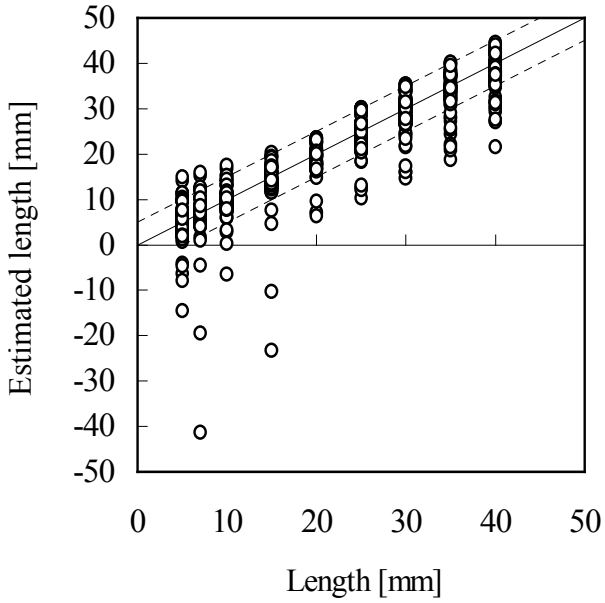
直線状の層間はく離発生に起因する電極間電位差変化から作成した応答曲面を用いて Z 型及び逆 Z 型のはく離位置及び寸法を同定した結果を図 2-5 に示す. 縦軸及び横軸は図 2-4 と同様である．図中実線で示した対角線は厳密な同定を表し，はく離寸法同定結果（図 2-5b）での破線は±5mm の誤差範囲を示している．
この結果から，梁中央付近において同定精度の低下が認められるが，直線状の層間はく離から求めた応答曲面にもかかわらず, はく離位置については非常に精度良く同定している．はく離寸法の同定では，非常に大きく誤同定しているものが存在している．大きく誤同定しているはく離は，位置同定で若干の誤差が生じた場合と同様に，はく離が電流電極間中央付近に存在する場合であった．

はく離が電流電極間中央付近に存在するときの規格化した電極間電位差変化を図 2-6 に示す．横軸は電圧測定位置の電極であり，縦軸は規格化した電極間電位差変化である．これより，電流電極間中央から離れた場所にはく離が存在する場合には，規格化電極間電位差変化ははく離の形状によらずほぼ同一になっているが，電流電極間中央付近に存在する場合には, はく離の形状に影響を受けて大きな差異を生じている．はく離形状に起因した規格化電極間電位差変化の違いが，大きな誤同定を生じた原因となっている．

電気抵抗変化法でははく離形状の差異が同定精度に影響を与えなかった[(3)]．しかしながら，電流を梁試験片の端から端に負荷した電位差法では，はく離が電流電極間中央付近に存在する場合にのみはく離形状の差異による影響を受け, 大きく誤同定することが明らかとなった．電位差法の実用化のためには，はく離形状の差異による誤同定を改善する必要があることが明らかとなった．

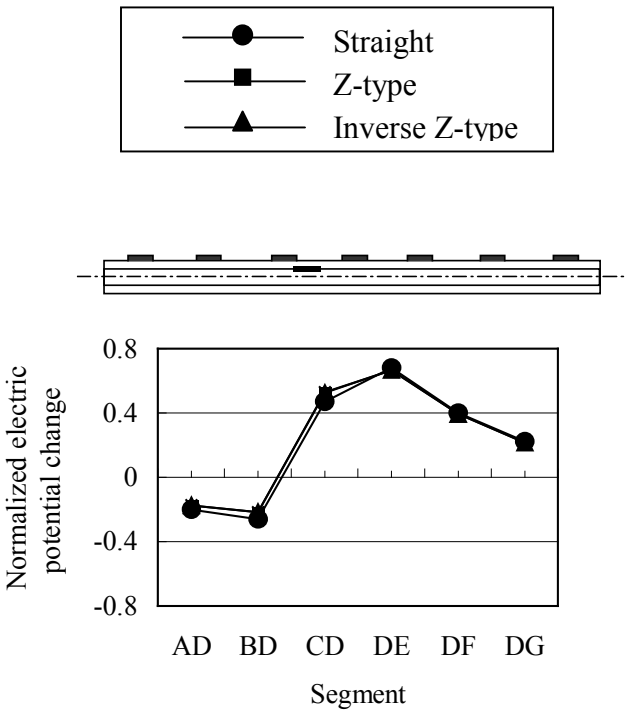


(a) Estimated location

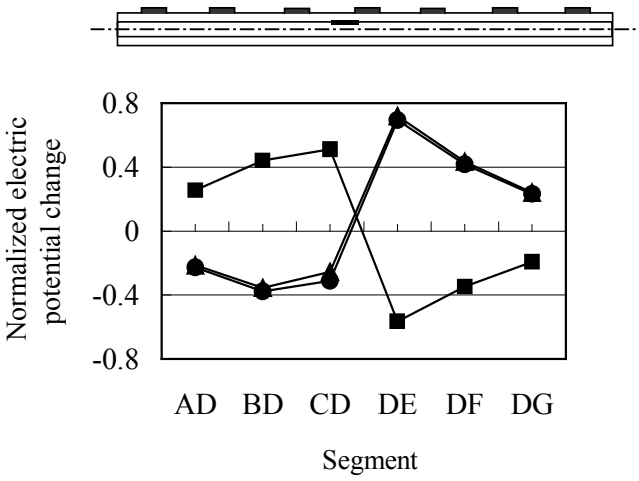


(b) Estimated length

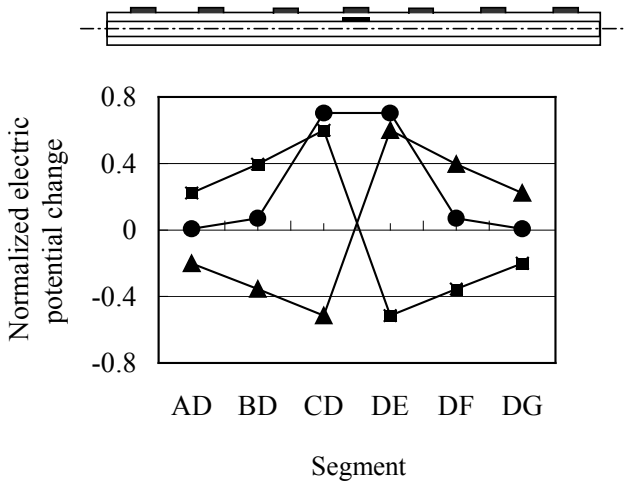
Fig. 2-5 Estimation results of Z-type and inverse Z-type delamination crack using the response surfaces obtained from the analyses of straight delaminations



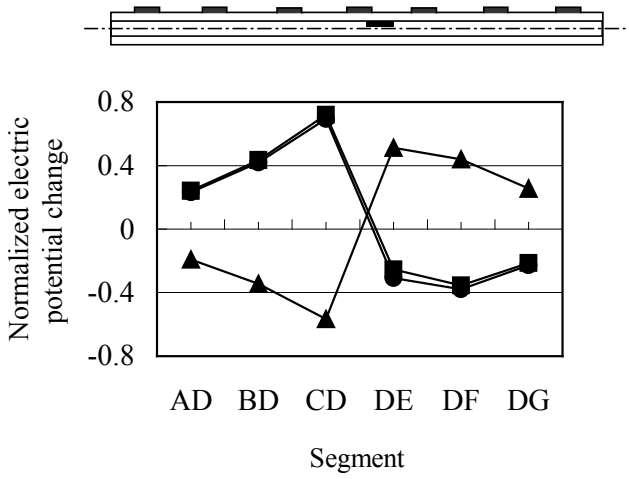
(a) Delaminations exist at x=-20mm



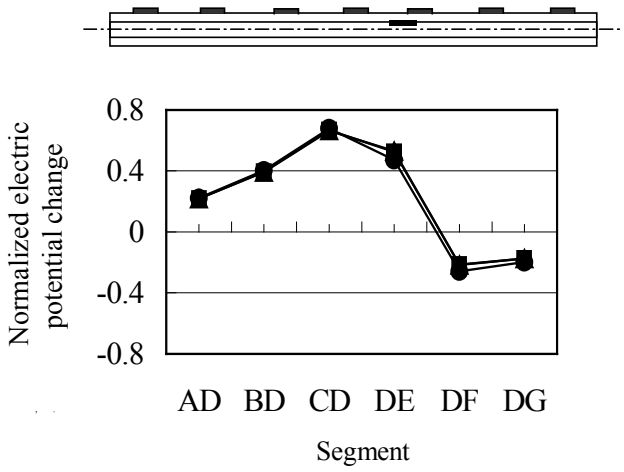
(b) Delaminations exist at x=-10mm



(c) Delaminations exist at x=0mm



(d) Delaminations exist at x=10mm



(e) Delaminations exist at x=20mm

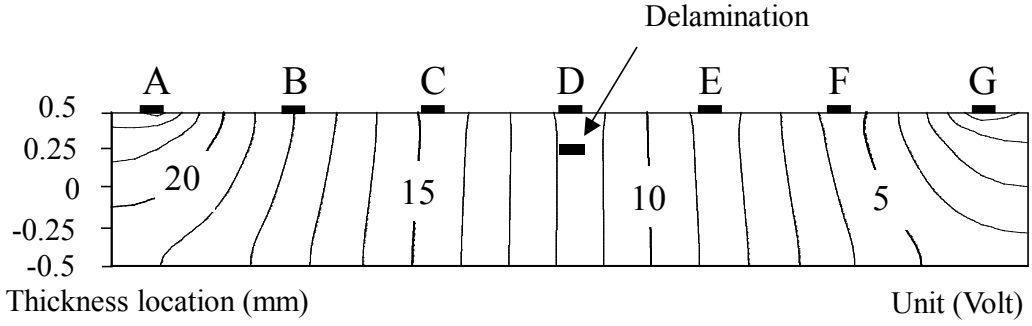
Fig. 2-6 Normalized electric potential changes between electrodes
(Delamination length is 5mm)

2.4.　はく離形状に起因した同定誤差原因

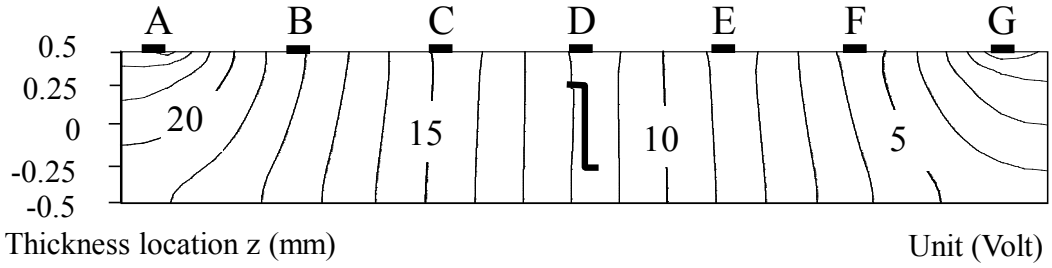
電位差法を CFRP 積層板に適用する場合，電流電極間中央付近にはく離が存在するときには，はく離形状に依存して大きく誤同定することが明らかとなった．これは，はく離が電流電極間中央に存在する場合には，応答曲面の説明変数である規格化電極間電位差変化がはく離形状に依存して大きく異なるためであった．次に，はく離が電流電極間中央に存在する場合に，はく離形状に依存した電極間電位差変化が生じる原因について検討する．

図 2-7 に，はく離形状によって規格化電極間電位差変化が大きく異なった，はく離が電流電極間中央に存在する場合の，CFRP 積層板内部での電位分布を示す．図の横軸は試験片長手方位位置，縦軸は厚さ方位位置であり，試験片内に示している数字は等電位線を意味している．ここで，FEM では 2 次元解析を行っているために紙面奥行方向は単位長さとして計算しており，また，用いた導電率も比率であるため，電位の絶対値は実際の積層板によるものとは異なることに注意されたい．また，図 2-8 は，図 2-7 のはく離周辺部のみを拡大したものである．これらの図から，CFRP 積層板内部の電位分布は，はく離形状によって大きくは変化していないことがわかる．

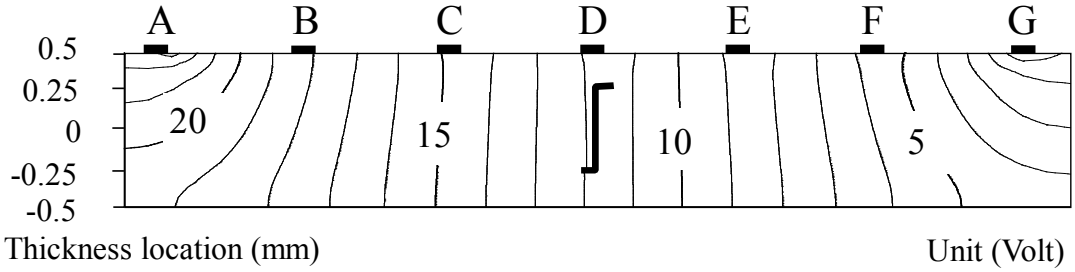
電極 A に電流を負荷し，電極 G を 0V に設定した際の，はく離がない場合の CFRP 積層板内部での電位分布を図 2-9 に示す．図中矢印は電流の流れを示す．この図から明らかなように，電流電極 A および G の近傍では厚さ方位に電位分布があり，電流が厚さ方位に流れていることを示している．これは電極設置側の 0°層だけでなく，反対側の 0°層にも電流が流れていることを意味している．しかしながら，電流電極間中央付近では等電位線が試験片表面に垂直になり，電流は完全に試験片表面に水平に流れている．図 2-10 には電極側表面 0°層と中央部 90°層の層間を流れる厚さ方位の電流密度を示す．横軸が長手方位位置であり，縦軸が電流密度である．この図から試験片の中央（x=0mm）では厚さ方向に流れる電流密度が 0 になっていることがわかる．このため，はく離が電流電極間中央付近に存在する場合には，厚さ方向電流の消滅により電流を妨げる効果がほとんどなくなる．図 2-11 には，厚さ方向電流が存在しない梁中央（x=0mm）における長手方位の電流密度分布を示す．横軸は電流密度であり，縦軸は厚さ方位位置である．この図から，



(a) Straight delamination



(b) Z-type delamination



(c) Inverse Z-type delamination

Fig. 2-7 Contour plot of electric potential when delaminations exist at x=0mm and delamination length is 5mm

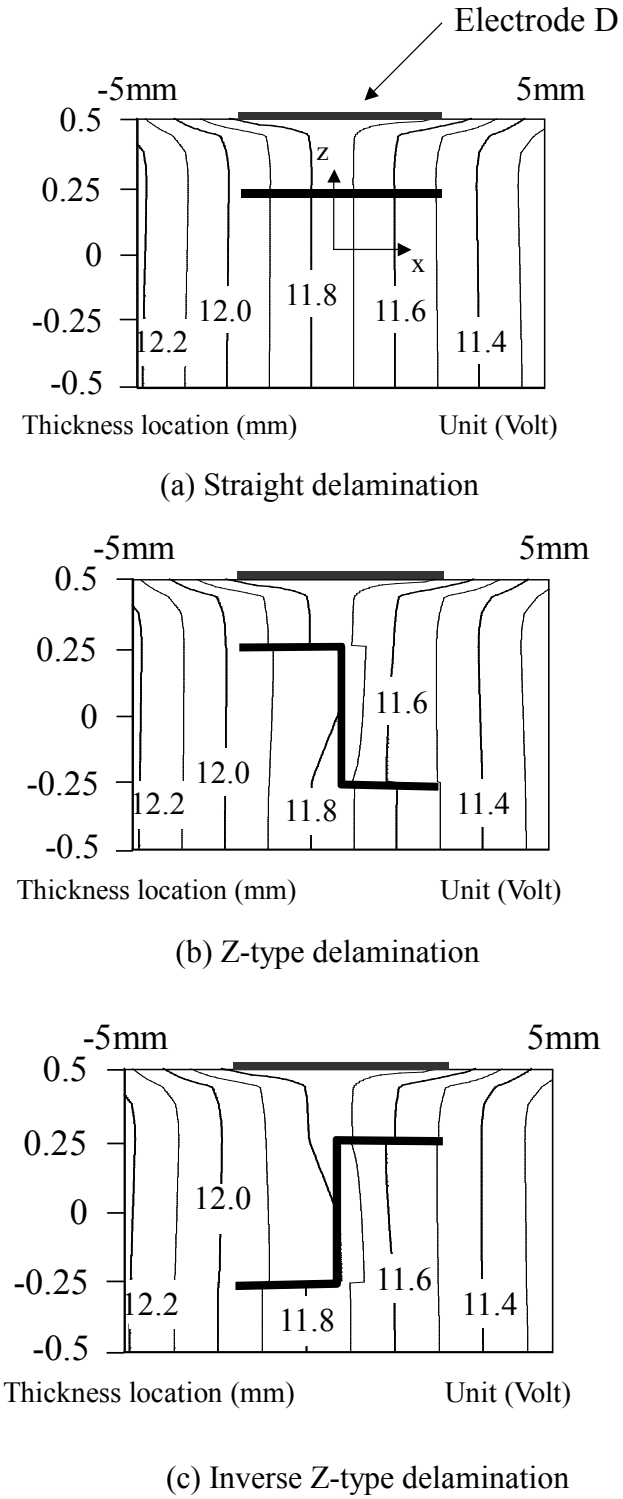


Fig.2-8 Contour plot of electric potential around the delaminations when delaminations exist at x=0mm and delamination length is 5mm

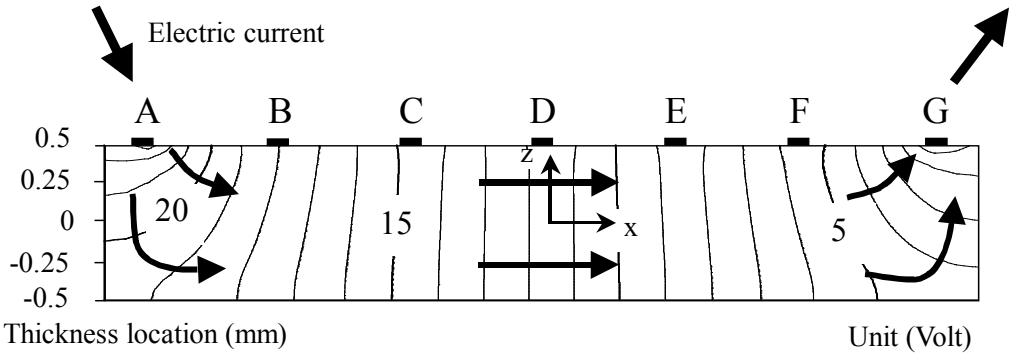


Fig.2-9 Contour plot of electric potential in CFRP beam

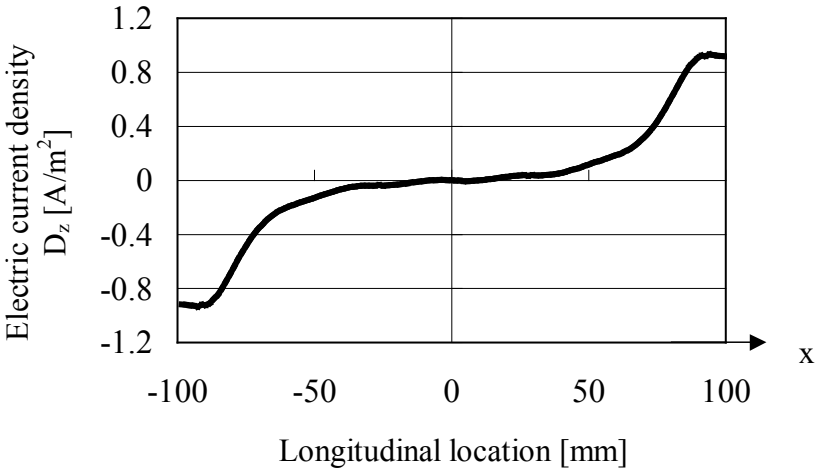


Fig. 2-10 Electric current density to the thickness direction at z=-0.25mm

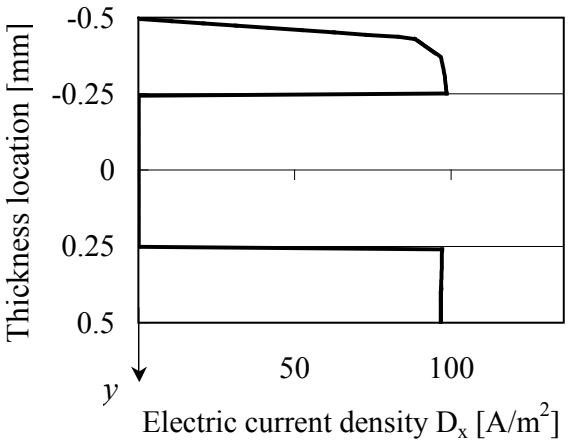
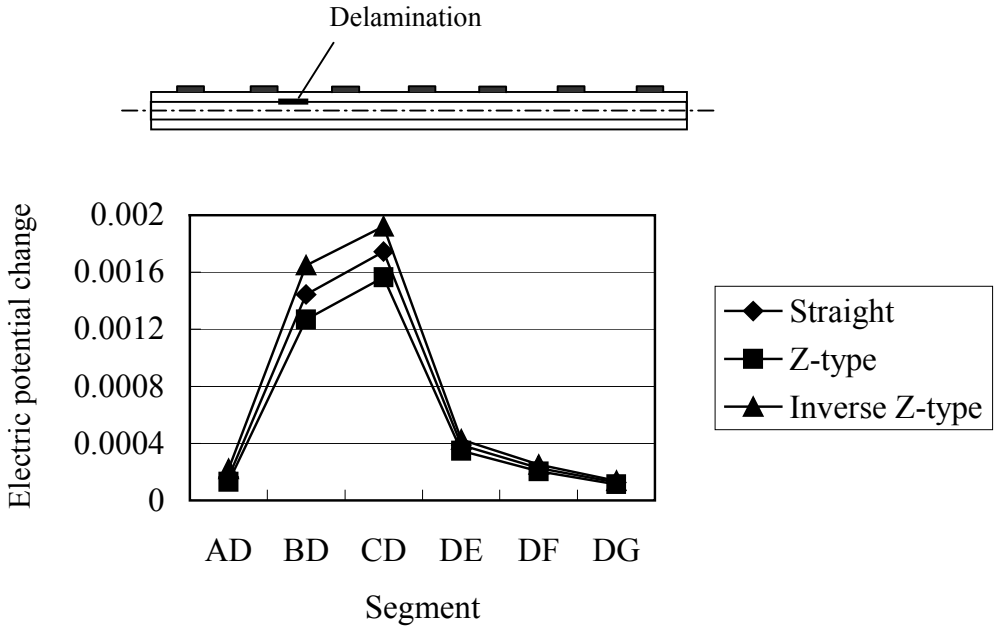


Fig. 2-11 Electric current density to the longitudinal direction at x=0

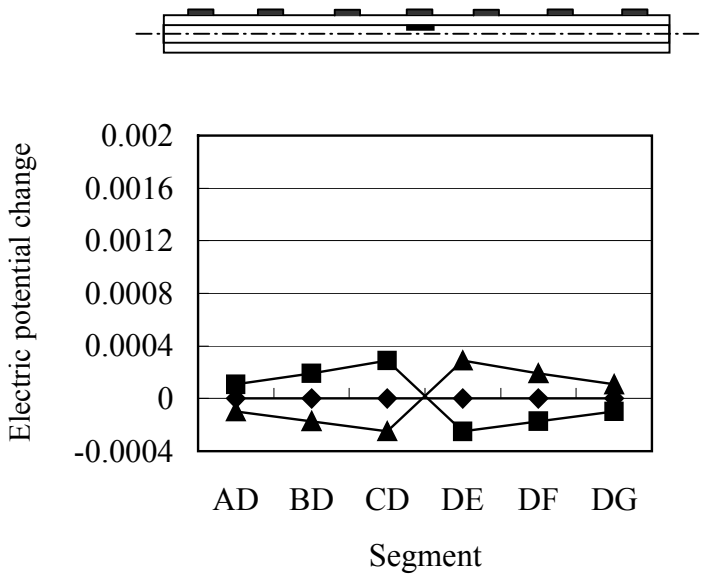
梁中央ではほぼ半分の電流が下表面 0°層を流れていることがわかる．また，微小ではあるが，90º層を長手方向に流れる電流も存在する．

寸法が 5mm のはく離が，試験片中央(x=0mm)に存在するときの，規格化していない電極間電位差変化を図 2-12 に示す. はく離位置が, 電流電極 A に近い図 2-12(a)の場合, はく離のジグザグ形状に無関係に電極間電位差変化はほぼ同じ分布になっている．これは 90°層内を流れる電流がマトリックス割れによって妨げられる影響と比較して, 層間での直線状のはく離が厚さ方位に流れる電流を妨げる影響が大きいため，はく離形状による影響が無視できるほど小さいためである．これに対して同じ 5mm のはく離が電流電極間中央に存在する図 2-12(b)の場合，厚さ方位電流の消滅のために，電極間電位差変化の大きさも小さい．このために，マトリックス割れによる 90º層を流れる微量な電流の阻害の影響など，はく離形状に起因する微小な差異が大きく表れている．次に，図 2-12 に示した電極間電位差変化を規格化したものを図 2-13 に示す．この図から，はく離形状に起因した電極間電位差変化のごくわずかな差異が規格化によって大きく拡大されていることがわかる．

電気抵抗変化法では隣接電極間に電流を通電するために電流電極間距離が狭く，板厚方位の電流が極端に低下する領域がほとんどない．従って，はく離形状に依存して電極間電気抵抗変化が大きく異なることはなかった．一方，電位差法では電流電極間距離が広いために，図 2-10 に示したように電流電極間中央付近においては厚さ方位の電流の流れが極端に少なくなる領域が生じる．このため，はく離が電流電極間中央付近に存在する場合には, はく離形状に依存したごくわずかな差異が規格化作業によって拡大されてしまうことが誤同定の原因となった．



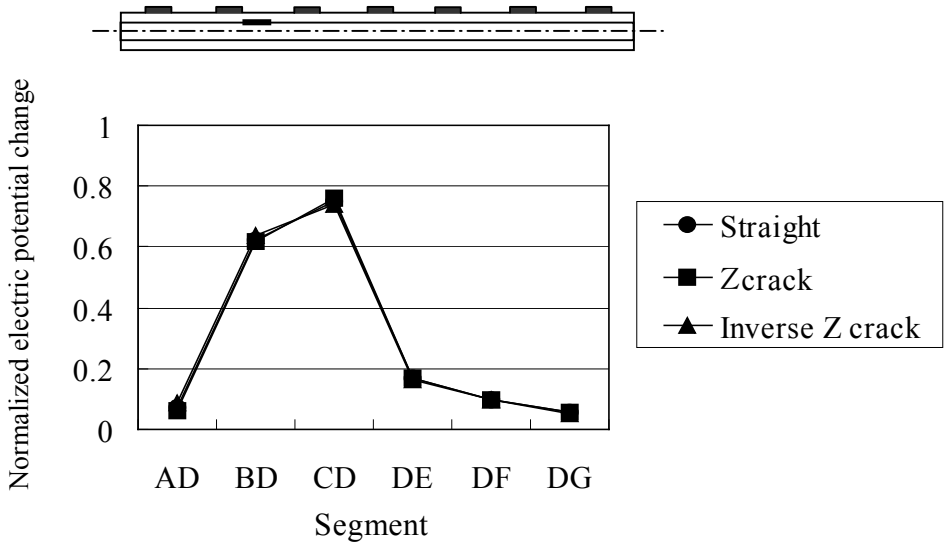
(a) Delaminations exist at x=-50mm



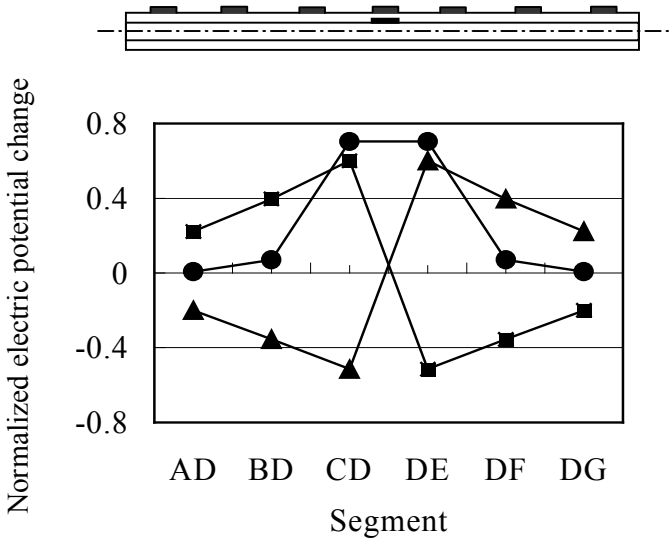
(b) Delaminations exist at x=0mm

Fig. 2-12 Electric potential changes without normalization

(Delamination length is 5 mm)



(a) Delaminations exist at x=-70mm



(b) Delaminations exist at x=0mm

Fig. 2-13 Normalized electric potential changes between electrodes

(Delamination length is 5mm)

2.5. 結　言

直交積層 CFRP 積層板の端部から他端部まで電流を負荷して表面に複数設置した電極間の電位差を測定する電位差法を採用し，FEM 解析を用いてはく離同定を行なった．実構造にて生じるはく離の形状は様々であるが，それらを全て考慮して応答曲面を作成するのは困難である．従って，はく離形状に依存せずに同定が可能である必要がある．マトリックス割れを伴う Z 型および逆 Z 型のはく離を，直線状の層間はく離の FEM 解析結果から得られた応答曲面を用いて同定し，同定精度におよぼすはく離形状の影響を評価した. 得られた結果を要約すると以下の通りである.

(1) 電極間電位差変化を規格化することで, 電位差法においても高い精度で直線状の層間はく離の位置及び寸法が同定可能であることを示した.

(2) 直線状の層間はく離の FEM 解析結果から作成した応答曲面を用いてマトリックス割れを伴う Z 型および逆 Z 型はく離の同定を実施すると，電流電極間中央付近以外では精度良く同定が可能であることが明らかになった.

(3) 電流電極間中央付近においては, はく離形状に依存して規格化電極間電位差変化が大幅に異なり，マトリックス割れを伴う Z 型及び逆 Z 型のはく離の同定には大きな誤差が生じた.

(4) 電位差法では電流電極間隔が広いために, その中央部において厚さ方向電流密度が大きく低下する部分が生じる．この部分にはく離が発生した場合，はく離は厚さ方向電流を妨げることができず，90º層を x 方向に流れる微量な電流を妨げることなどによる, はく離形状に依存した差異を有する電極間電位差変化が生じる．その差異は非常に小さいが，規格化によって誤差が拡大されることが誤同定の原因となった.

参　考　文　献

[1] A.Todoroki, M.Tanaka, and Y.Shimamura, “Measurement of Orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method” Composites Science and Technology, 62(5), (2002), 619-628.

[2] R.H.Myers, D.C.Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", second edition, John Wiley & Sons. Inc., New York, (2002).

[3] 轟章, 田中美帆, 島村佳伸, 小林英男, 電気抵抗変化の CFRP 積層板の知的はく離検出法におけるはく離形状の影響解析, 日本複合材料学会誌, 29(3), (2003), 113-119.

This page intentionally left blank

第 3 章

2 段階同定電位差法による改善

3.1.　緒　言

第 2 章にて, 電流を端部から他端部に通電する電位差法ではは く離が電流電極間中央付近に存在する場合, はく離形状に依存して大きく誤同定してしまう問題点を示し，その原因を明らかにした．本章では，その結果より電位差法の問題点を改善する方法として 2 段階同定方法を提案する．まず，FEM 解析を用いて数値解析的にはく離同定の可能性について検討し，その後，多数回のはく離実験を行い，提案手法の有効性を検討した.

3.2.　はく離同定の原理

電位差法では，はく離が電流電極間中央付近に存在する場合，厚さ方向電流の不足のために電極間電位差変化が小さく, 規格化によってはく離形状に起因した微小な差異が拡大された. その結果, はく離が電流電極間中央付近に存在する場合のみ, 同定精度が著しく低下した．しかしながら，電極 CE 間の外側にはく離が発生する場合には十分な精度で同定が可能であり，また，電極 CE 間にはく離がある場合でも，はく離が電極 CE 間にあることは推定可能であった（図 2-5a の破線で囲まれた内側領域）．そこで，はく離が電極 CE 間（-30mm≦x≦30mm）にあると判定された場合のみ，別の方法で精度の良い同定を実施する．具体的には，電流電極間中央付近での板厚方位に流れる電流を増加させるため，電極 CE 間にはく離が存在すると判定された場合には，電流の通電の仕方を変えた 2 段階の同定を行う．すなわち，中央電極 D を電流電極とし，端部電極 A 及び G を電位 0V に設定した状態で，各電極間での電位差変化を再度測定する．図 3-1 は，中央電極 D に電流を負荷し，電極 A 及び G を電位 0V としたときの積層板内部での電位分布を FEM により算出した結果である．電流を中央電極 D から負荷することで，電極 CE 間では厚さ方向に流れる電流が生じている．これより，試験片中央付近に存在しているはく離は，厚さ方向電流を大きく妨げるために同定が可能となる. 端部から他端部に電流負荷することによって得られた電極間電位差変化での同定を 1st stage と呼び, この 1st stage にてはく離が電極 CE 間に存在すると判定された場合にのみ，電流を中央電極から端部電極に通電することによって得られる電極間電位差変化を用いた 2nd stage で

の同定を実施する．この 2 段階同定電位差法のはく離同定の流れを図 3-2 に示す．

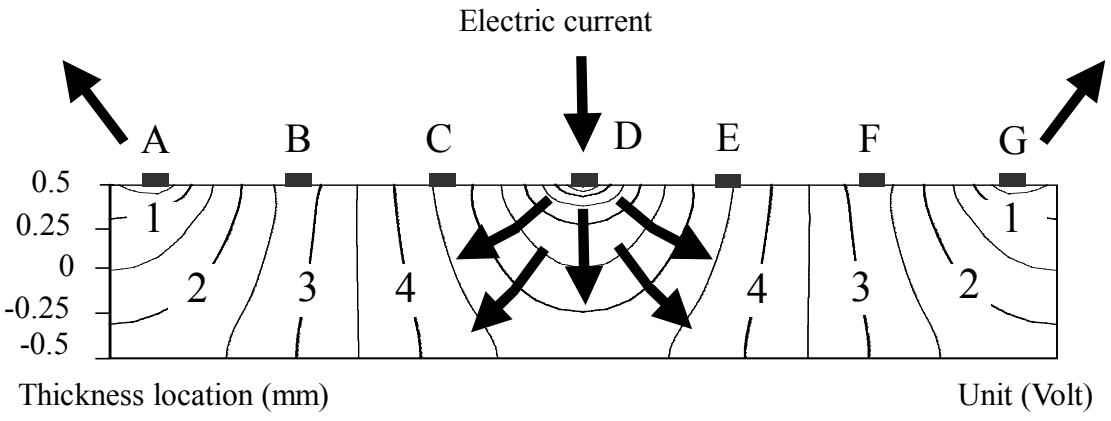


Fig. 3-1 Contour plot of electric potential in CFRP beam when electric current is charged at center electrode D and electrodes A and B are set to be 0V

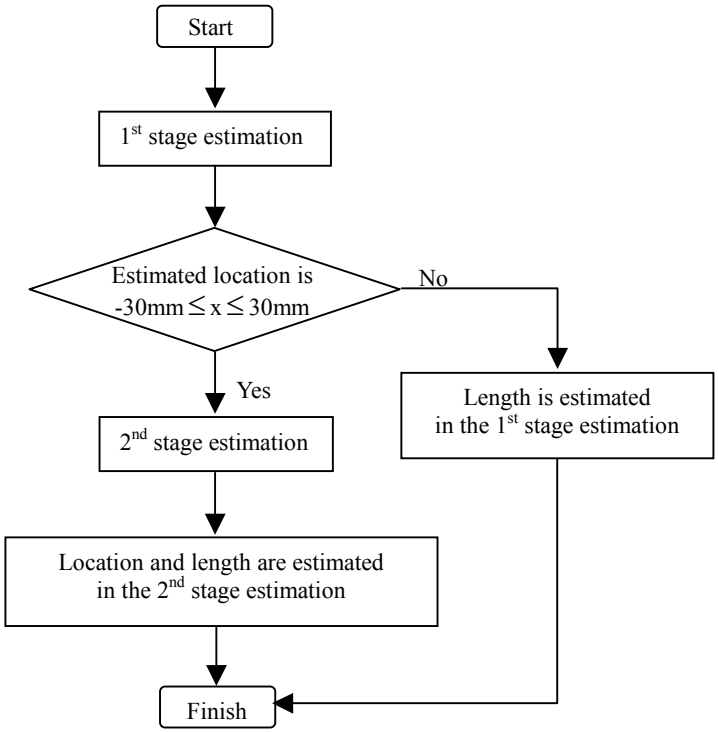


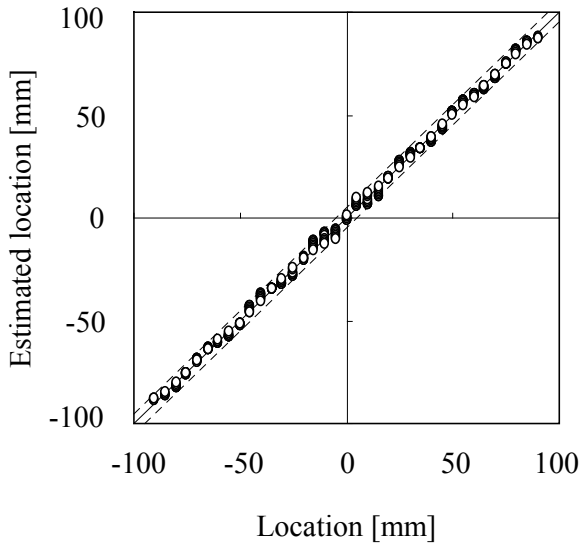
Fig. 3-2 Flow chart of estimation procedure of two-stage electric potential change method

3.3.　有限要素法解析による検討

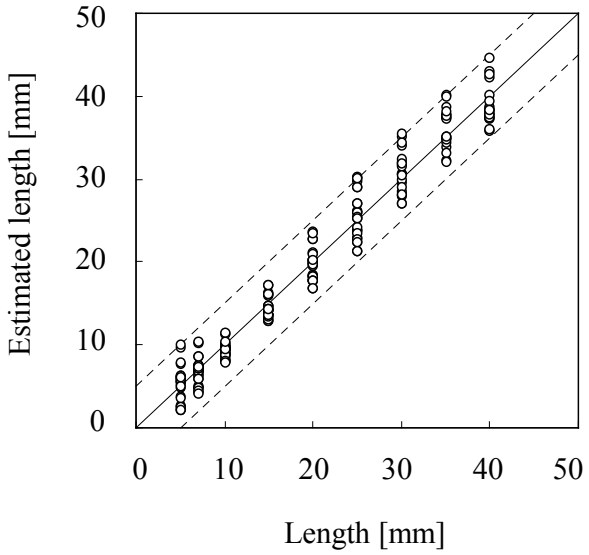
FEM 解析に用いたモデルは，第 2 章と同様に 7 個の電極を 30mm の間隔で設置した, 図 2-1 に示した積層板である. 1st stage として電極 A に電流 50mA を負荷し，電極 G の電位を 0V とする．はく離寸法は 5，7，10，15，20，25，30，35，40mm の 9 通り，はく離の位置は-90mm から 90mm までの区間において 5mm 間隔の位置で作成し，合計 315 通りの FEM 解析を実施した．直線状の層間はく離に起因した応答曲面より直線状の層間はく離を同定した結果を図 3-3 に，Z 型及び逆 Z 型のはく離を同定した結果を図 3-4 に示す．なお，はく離位置の同定結果において，-30mm≦x≦30mm の範囲内に存在すると推定されたはく離については，寸法の同定結果を図 3-3b 及び図 3-4b には示していない．これは，はく離が-30mm≦x≦30mm に存在すると同定された場合には，その寸法は電流を中央から通電する 2nd stage にて同定するためである.

次に，2nd stage として中央電極 D に 50mA の電流を負荷し，試験片両端の電位 A と G を 0V とした．はく離発生前後にて，電極 AB，AC，AD，EG，FG 間の電位差を求め，規格化電位差変化を算出した．計算に使用したはく離寸法は，先と同様に 5，7，10，15，20，25，30，35，40mm の 9 通り，はく離の位置は試験片中央付近の-30mm（電極 C）から 30mm（電極 E）の区間に 5mm の間隔で作成し，合計 117 通りの FEM 解析を実施した．直線状の層間はく離に起因した FEM 解析結果より，位置と寸法を同定する応答曲面を作成し，学習データである直線状の層間はく離を同定した結果を図 3-5 に示す．なお，応答曲面には 1 次式を用いた．その理由は，区間が狭いために 1 次式でも同定が高い精度で可能であること，また，次数が低いほど変動に対するロバスト性が高いためである．応答曲面作成の際には，有意水準を 5%とした t 検定により回帰寄与の低い項は削除し，自由度調整済み決定係数が最大になるようにした（Appendix A 参照）．位置同定用の応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は 0.9996，寸法同定用については 0.9472 であり，同定精度は非常に高い.

次に，この直線状の層間はく離から求めた応答曲面を用いて，Z 型および逆 Z 型のはく離位置と寸法を同定した．結果を図 3-6 に示す．図から，はく離が試験片中央にあるにもかかわらず，Z 型，逆 Z 型のはく離同定結果が図中の対角線付近にあ

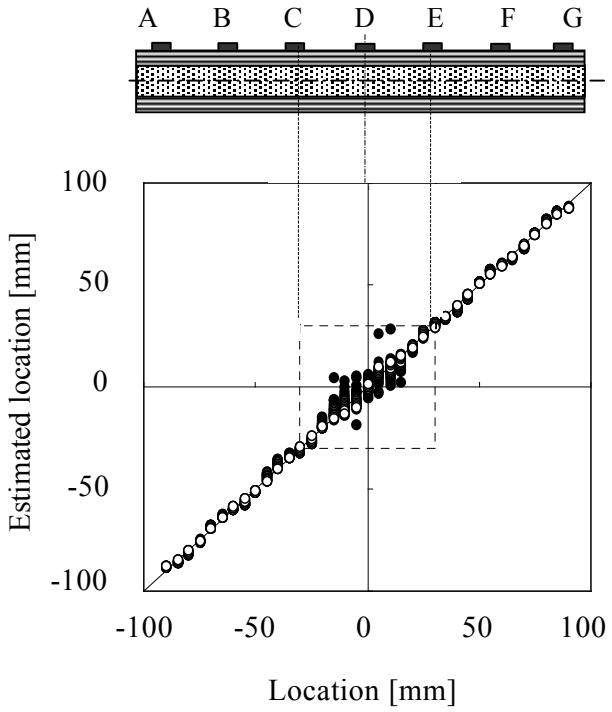


(a) Estimated location (R_{adj}^2=0.9988)

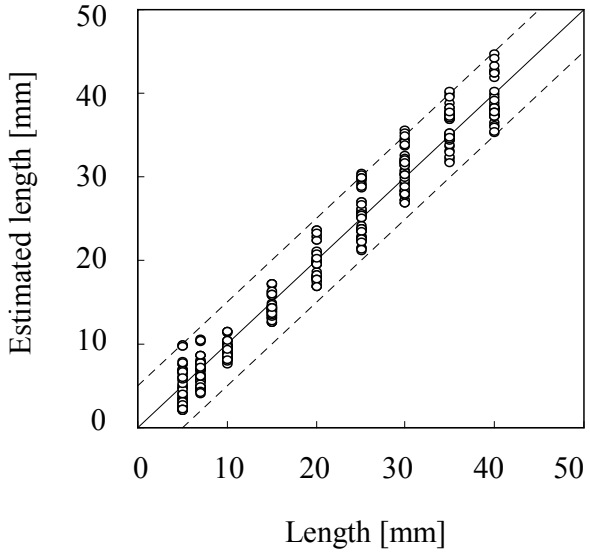


(b) Estimated length (R_{adj}^2=0.9251)

Fig. 3-3 1st stage estimation results of straight delamination using the response surfaces obtained from the analyses of straight delamination

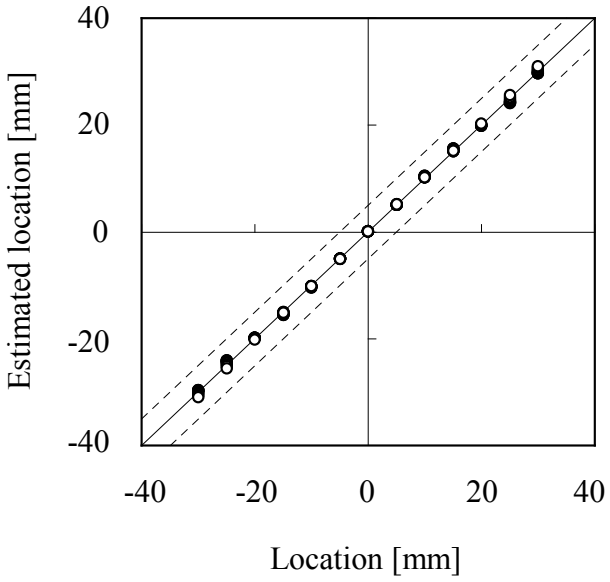


(a) Estimated location

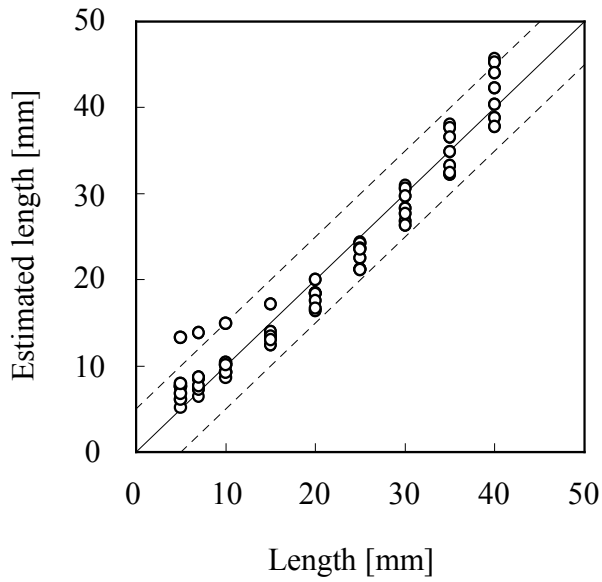


(b) Estimated length

Fig. 3-4 1st stage estimation results of Z-type and inverse Z-type delamination crack using the response surfaces obtained from the analyses of straight delamination

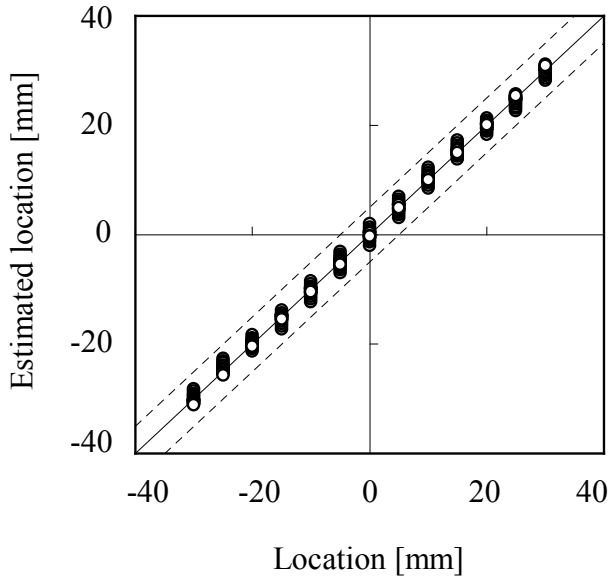


(a) Estimated location (R_{adj}^2=0.9996)

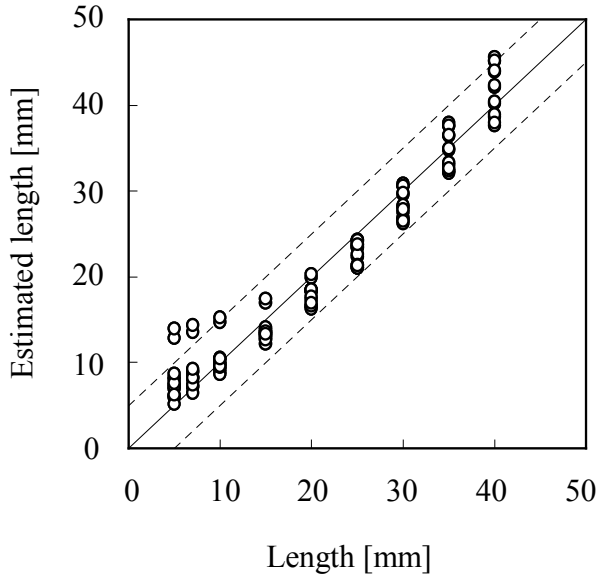


(b) Estimated length (R_{adj}^2=0.9472)

Fig. 3-5 2nd stage estimation results of straight delamination using the response surfaces obtained from the analyses of straight delamination



(a) Estimated location

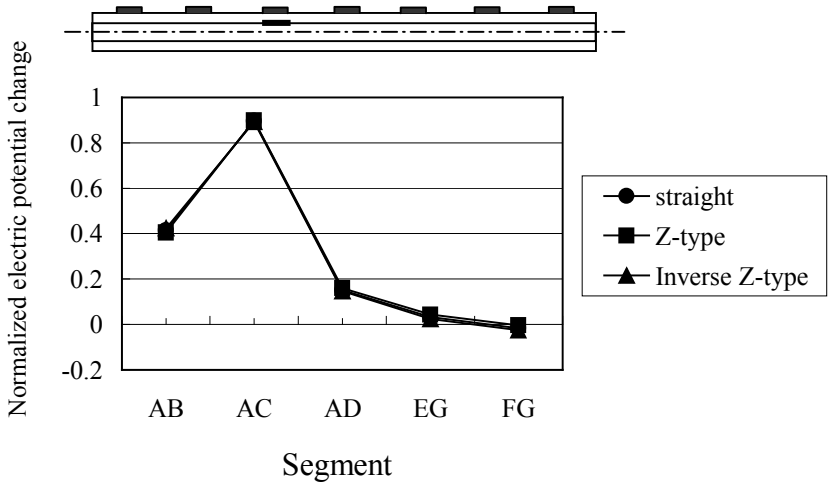


(b) Estimated length

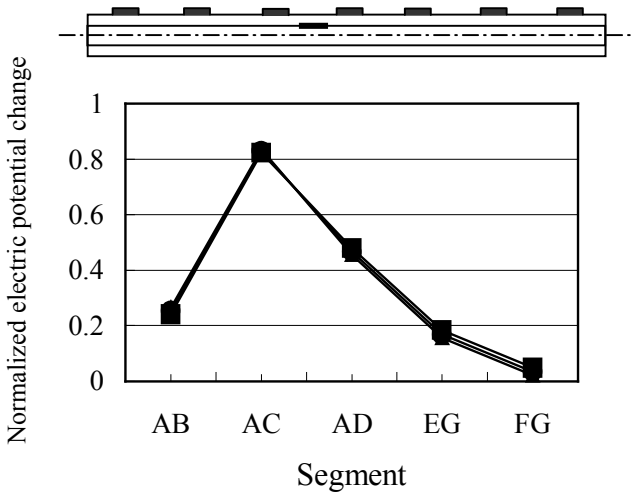
Fig. 3-6 2nd stage estimation results of Z-type and inverse Z-type delamination crack using the response surfaces obtained from the analyses of straight delamination

り, 直線状の層間はく離から作成した応答曲面で精度良く同定できていることがわかる．また，直線状の層間はく離とほぼ同じ同定の傾向を示していることから，はく離形状の差異による影響をほとんど受けていない.

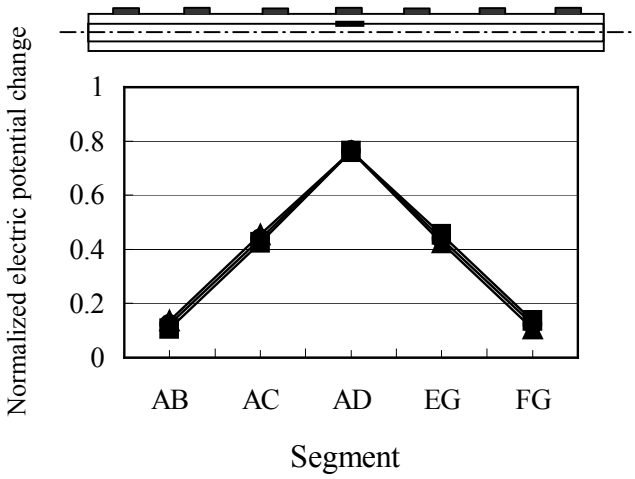
寸法が 5mm のはく離が試験片中央に存在する場合に，中央電極 D から端部電極 A，G に電流を負荷したときの規格化後の電極間電位差変化を図 3-7 に示す．図中横軸は電圧測定位置の電極であり，縦軸は規格化した電極間電位差変化である．長さ 5mm のはく離が試験片中央に発生した場合でも，直線状の層間はく離と，Z 型及び逆 Z 型のはく離による電極間電位差変化との差異は非常に小さくなっている．これは，中央電極から電流を負荷することで，試験片中央付近での厚さ方位電流密度が高くなり, 層間部でのはく離に起因する電位差変化が大きくなったためである．さらに，狭い範囲のはく離を同定するために拡大応答曲面となっており，同定精度は一層向上している.



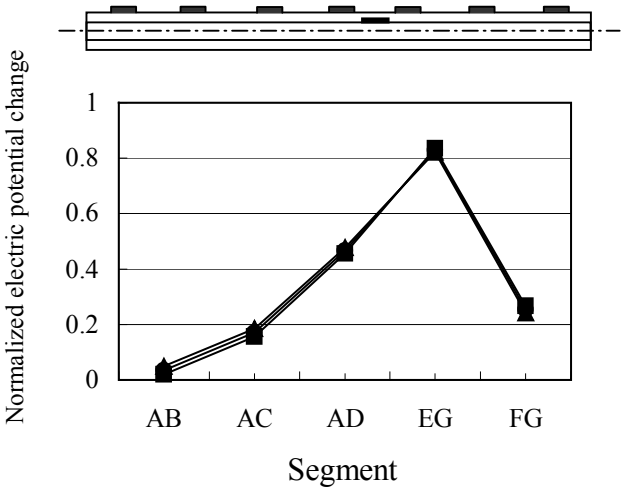
(a) Delaminations exist at x=-30mm



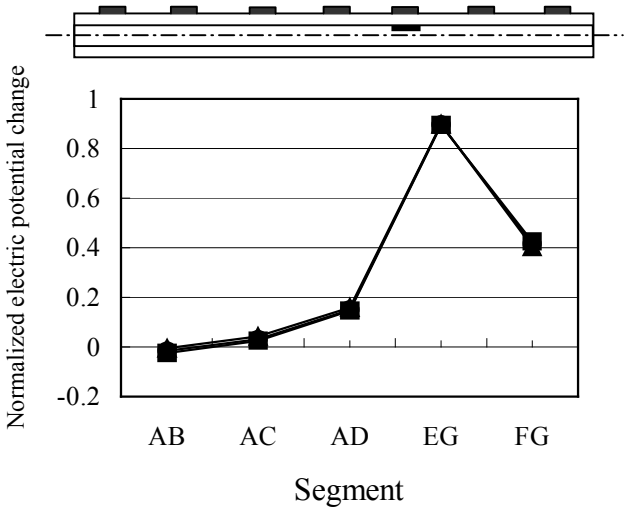
(b) Delaminations exist x=-15mm



(c) Delaminations exist x=0mm



(d) Delaminations exist x=15mm



(e) Delaminations exist x=30mm

Fig. 3-7 Normalized electric potential changes when electric current is applied at the electrode D (delamination length is 5 mm)

3.4.　繊維体積含有率による影響

電位差法では CFRP 自身の導電性を利用するため，同定精度は積層板の導電率に強く影響を受ける. 航空機構造部材として使用される CFRP 積層板の繊維体積含有率 V_f は一般的に 60～65%程度であるため，繊維体積含有率が異なる積層板への有効性について検討する必要がある．ここでは，繊維体積含有率が異なる積層板に 2 段階同定電位差法を適用し, 繊維体積含有率が同定精度に及ぼす影響について検討した.

繊維体積含有率が異なる場合の，CFRP 積層板の導電率は参考文献(1)にて測定されている．これを表 3-1 に示す．前節にて用いた繊維体積含有率が 47.2%の積層板よりも低い繊維体積含有率 39.8%の積層板と，高い 62.1%の積層板を用いて測定された導電率を使用して，2 段階同定電位差法によりはく離同定を解析的に行った. 解析モデルは前章と同様である（図 2-1）. 直線状の層間はく離に起因した応答曲面を作成し，直線状の層間はく離，Z 型及び逆 Z 型のはく離を同定した.

作成した応答曲面の回帰精度を表す自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は繊維体積含有率が 39.8%，62.1%のとき，それぞれはく離位置同定用応答曲面で R_{adj}^2=0.9993, 0.9925，また，寸法同定用応答曲面で R_{adj}^2=0.9710, 0.5397 であった（図 3-8）. 繊維体積含有率が低い場合には回帰精度は高いが, 繊維体積含有率の増加につれて回帰精度は低下している.

図 3-9 に繊維体積含有率が 39.5％の積層板での 1st stage 及び 2nd stage 同定結果を示す．繊維体積含有率が 47.2%のときと同様に，ステージ切り替えのはく離位置を -30≤x≤30mm としてあり，1st stage のはく離寸法同定結果には 2nd stage にて同定される-30≤x≤30mm に存在するはく離は示していない. 繊維体積含有率が低いときには，はく離位置及び寸法ともに精度良く同定されている.

図 3-10 は繊維体積含有率が 62.1%の積層板での 1st stage はく離同定結果である. 位置の同定結果では，繊維体積含有率 V_f=39.8, 42.1%での結果と比較して誤差が大きくなっている．また，寸法同定結果にはすべてのはく離についての同定結果を示してあるが，非常に大きく誤同定しているはく離が多数ある．この場合にも 2 段階同定によりはく離を精度良く同定できるかを検討するため，図 3-11 に寸法同定結果の誤差分布を示す．図 3-11a, b, c はそれぞれ繊維体積含有率が 39.5，47.2，62.1%

の場合のはく離寸法同定における誤差である．横軸がはく離位置であり，縦軸が寸法の同定誤差である．図 3-11a, b より，V_f＝39.5 及び 47.2%の場合には，はく離が -30≤x≤30mm に存在するときのみ寸法の誤差が大きく，それ以外の部分にはく離が生じる場合には誤差はほぼ 5mm 以下であり，このことから 2 段階同定が可能であった．しかしながら，V_f＝62.1%の場合には，はく離位置によらずはく離寸法を大きく誤同定している．従って，2 段階目領域を設定することができないことから，繊維体積含有率が 62.1%の積層板には 2 段階同定電位差法を適用することができない．

一般的には CFRP 積層板は高強度，高剛性の要求される構造部位に用いられるため，繊維体積含有率は 50%以上である．また，本研究にて目標としている航空機用構造部材に使用される CFRP 積層板の繊維体積含有率は一般に 60%以上であるため，繊維体積含有率が 60%以上の積層板に対しても適用できなければならない．この問題点については，第 5 章にて再度検討を行う．

Table 3-1 Measured electric conductivities of CFRP laminates

V_f [vol%]	σ_0 [S/m]	σ_{90}/σ_0	σ_t/σ_0
39.8	3700	1.77×10^{-4}	1.58×10^{-5}
47.2	4600	1.05×10^{-3}	2.24×10^{-4}
62.1	5500	3.71×10^{-2}	3.77×10^{-3}

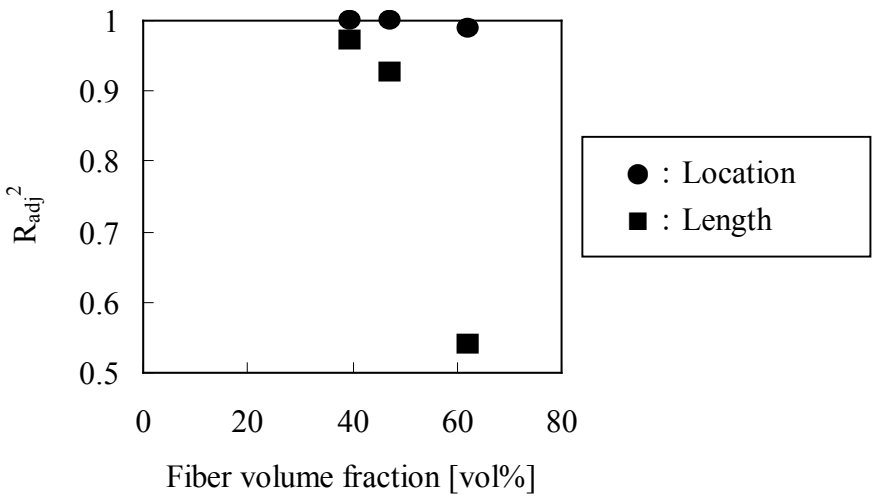
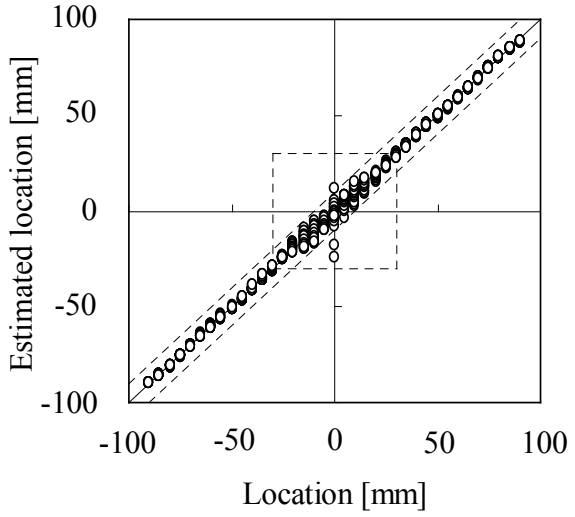
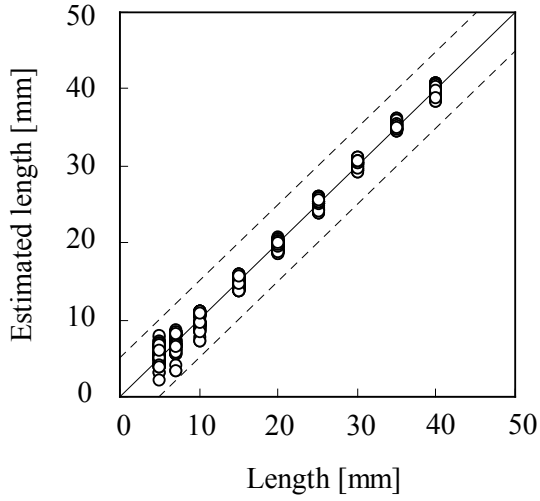


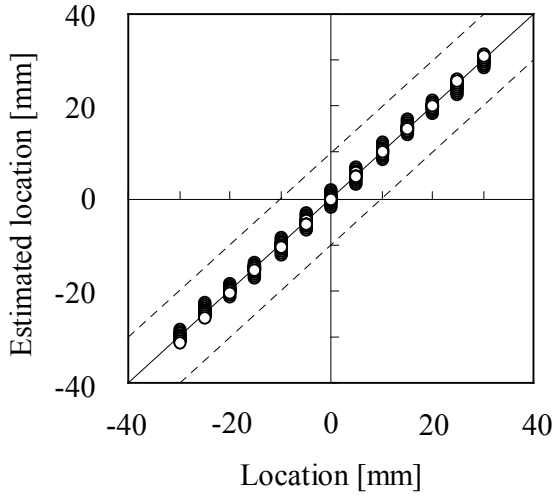
Fig. 3-8 Comparison of adjusted coefficient of multiple determination R_{adj}^2



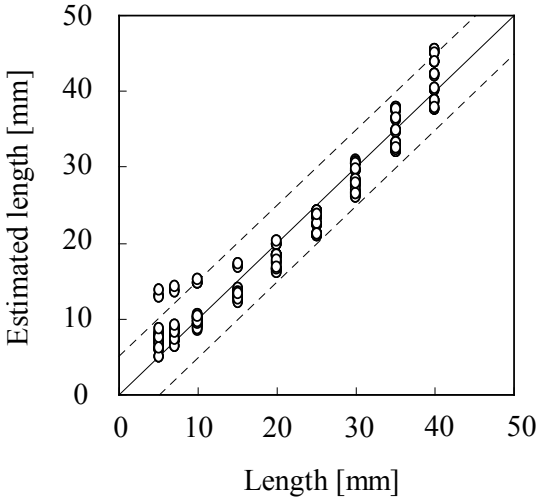
(a) Estimated location in the 1st stage



(b) Estimated length in the 1st stage

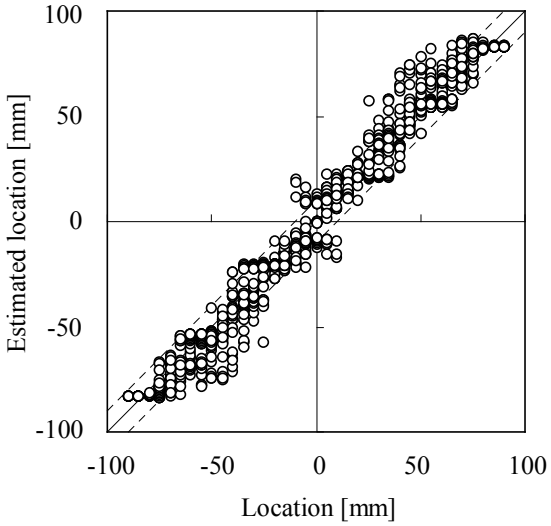


(c) Estimated location in the 2nd stage

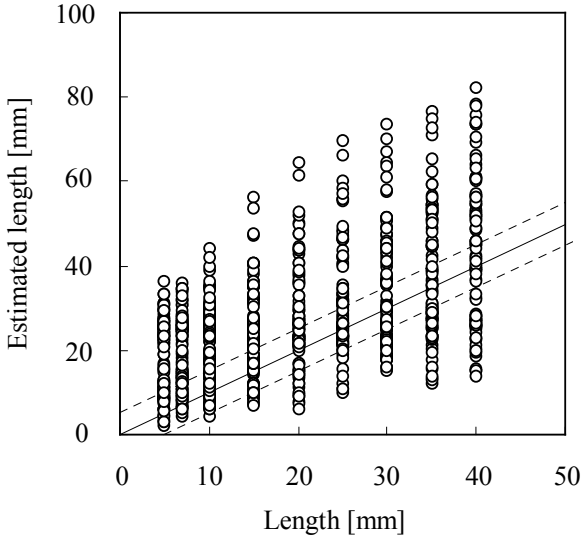


(d) Estimated length in the 2nd stage

Fig. 3-9 Estimation results of delaminations in the laminate of V_f=39.5%

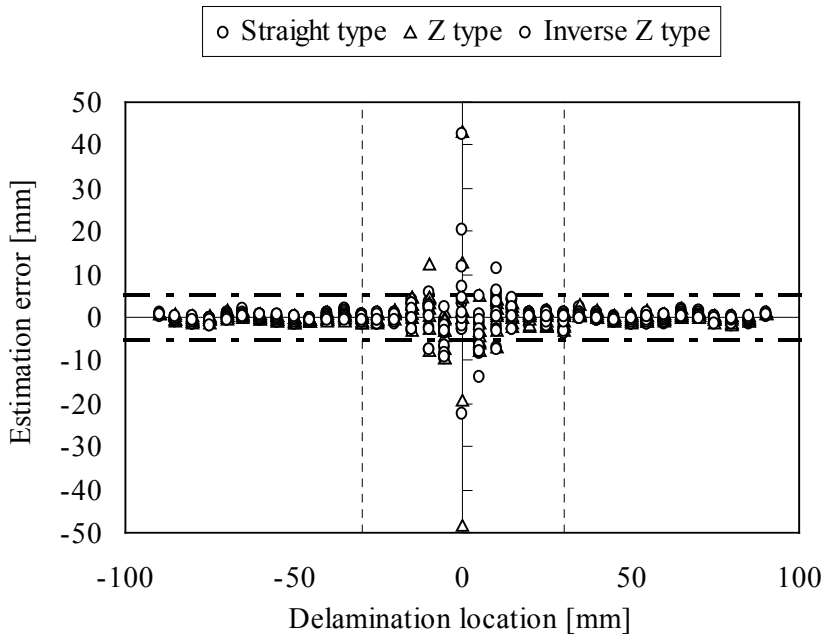


(a) Estimated location in the 1st stage

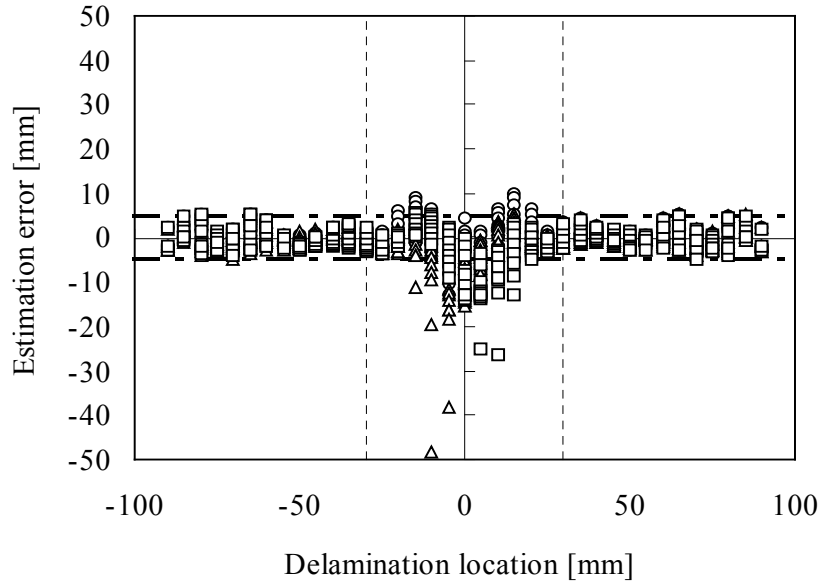


(b) Estimated length in the 1st stage

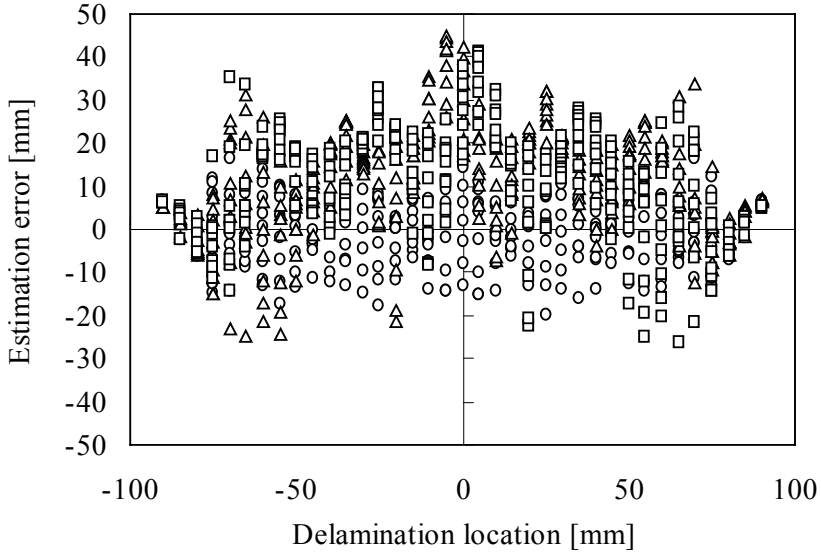
Fig. 3-10 Estimation results of delaminations in the laminate of V_f=62.1%



(a) V_f= 39.8%



(b) V_f= 47.2%



(c) V_f= 62.1%

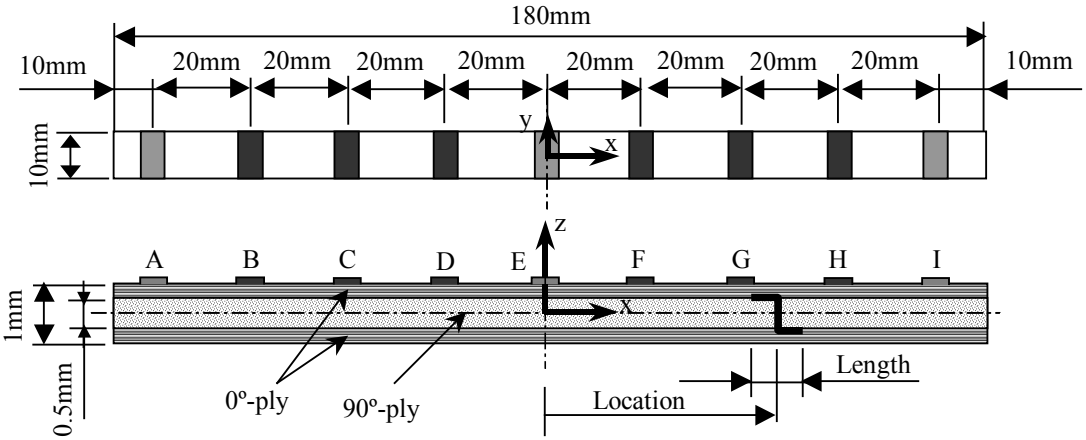
Fig. 3-11 Error distribution of estimated length

3.5.　はく離実験による検討

次に，多数の梁型試験片を作成してはく離実験を実施した．2 段階同定電位差法を用いて実験により得られた電位差変化からはく離を同定し, その有効性を検討した．

3.5.1.　試験片形状

用いた材料は三菱レイヨン製一方向プリプレグシート PYLOFIL#380 であり，オートクレーブ成形により，製造元が提供する硬化スケジュール 130Cº×0.7MPa×90min にて硬化させた．その後，長さ 180mm，幅 10mm にダイヤモンドカッターを用いて切断した（図 3-12 参照）．厚さは約 1mm である．作成した試験片の繊維体積含有率を JIS K 7075 燃焼法で測定した結果は 65.5%であった．試験片片側表面には長さ 4mm, 厚さ 0.02mm の銅箔を一体成形することにより, 9 個の電極を 20mm



(a) Configuration of specimen

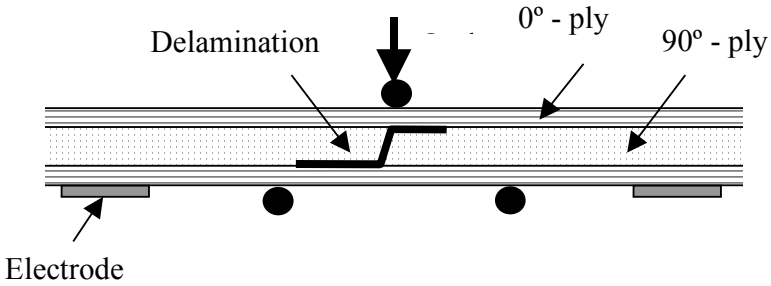
(b) Cross-ply laminate with nine electrodes

Fig. 3-12 Specimen used for delamination test

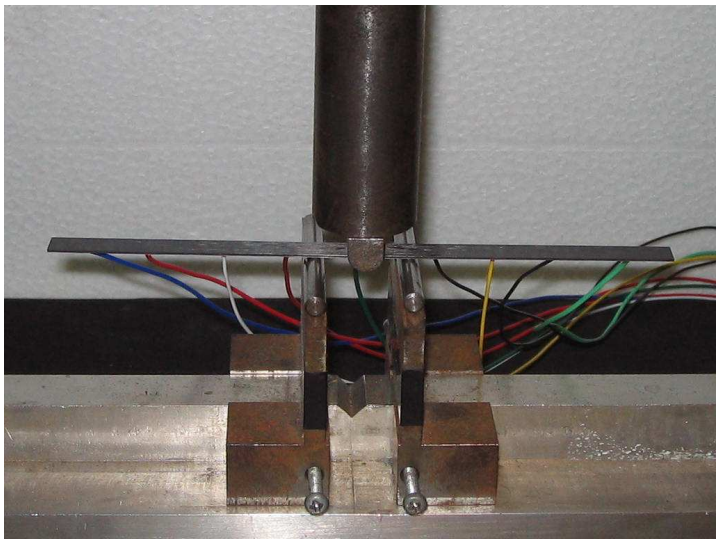
の間隔で設置している．電極数が前節より 2 個増えているが，これは実験で 4 電極法を採用するためである．すなわち，電極 A，E，I が電流負荷電極，電極 B，C，D，F，G，H が電圧測定電極となり，電位差は 4 電極法での測定となる．

3.5.2.　はく離作成方法

積層板へのはく離の挿入には, 島津製オートグラフを用いた 3 点曲げ治具による層間せん断試験を行った（図 3-13）．はく離の位置及び寸法は光学顕微鏡を用いて



(a) Illustration of inter-laminar shear test



(b) Set up of specimen for inter-laminar test

Fig. 3-13 Inter-laminar shear test

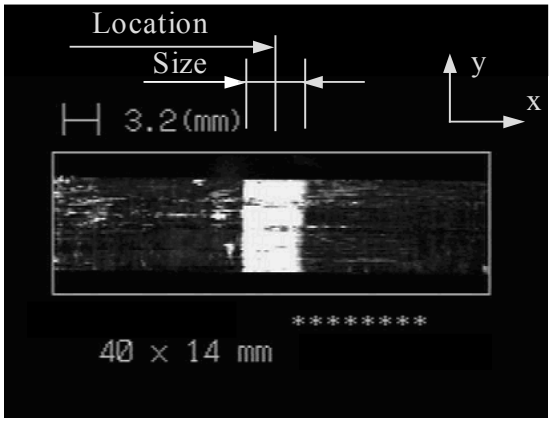
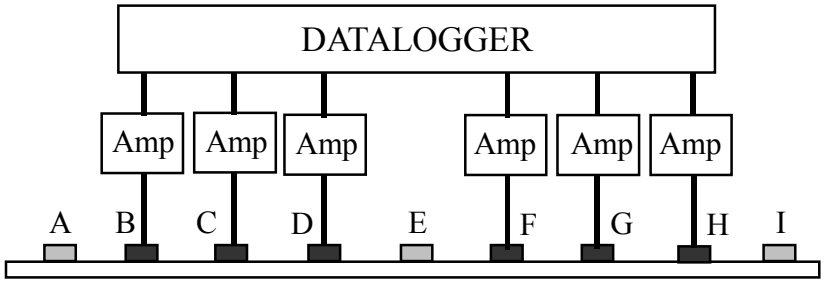


Fig. 3-14 Ultrasonic C-scan image of a delamination in the cross-ply CFRP laminate

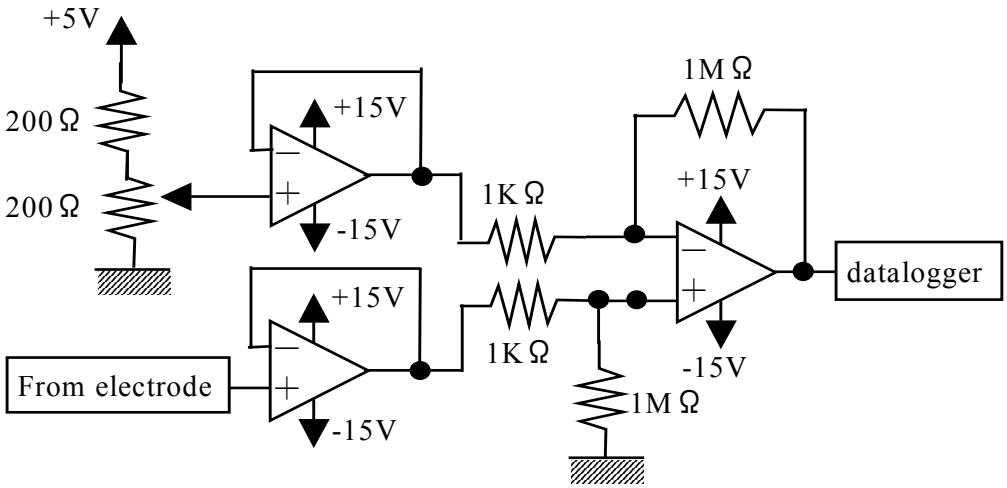
測定した. 生じたはく離のほとんどはマトリックス割れを有する層間はく離である. また，超音波探傷装置（日立建機製 AT5000）を用いた C スキャン影像による観察の結果, はく離寸法は幅方向 (y 方向) にほぼ一定であることを確認した (図 3-14) .

3.5.3. 電極間電位差変化測定回路

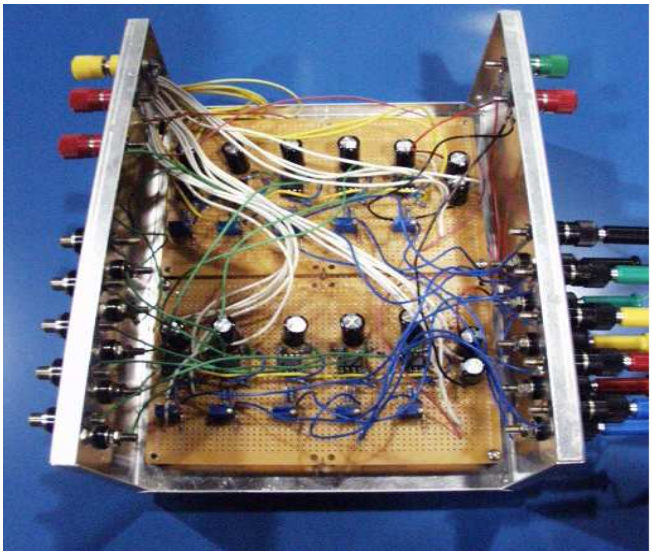
はく離発生に伴う電極間電位差変化は微小であるため，図 3-15 に示す差動増幅回路を作成した．電圧電極 B，C，D，F，G，H の電位変化を 1000 倍に増幅し，共和製データロガーPCD-320A にて測定した.



(a) Schema of electric potential difference measurement



(b-1) Differential amplifier



(b-2) Outward appearance of the differential amplifier

Fig. 3-15 Electric circuit for measurement of electric potential changes

3.5.4. 電位差変化の測定及び同定手順

まず, 150mA の電流を端部電極 A に負荷し, 他端部電極 I の電位をゼロにする. この状態で電極 BC，CD，DF，FG，GH 間の電位差を測定した．次に，150mA の電流を中央電極 E に負荷し，端部電極 A 及び I の電位をゼロにし，電極 CD，DF，FG 間の電位差を測定した．はく離発生後に再度電流を A から I に負荷し，各電極間電位差を測定し，はく離を同定した．この 1st stage での同定にてはく離が試験片中央付近，すなわち電極 DF 間に存在すると同定された場合のみ，再度電流を中央電極から負荷して得られる規格化電極間電位差変化を用いて 2nd stage でのはく離同定を行った．2nd stage にて電極 BC，GH 間の電位差変化を測定しないのは，電極 CD，DF，FG 間の電位差変化のみの説明変数で十分同定可能であったためである．

測定した電極間電位差変化（$P_i - P_{i0}$） は，その大きさ L を用いて規格化した．

$$\Delta p_i = \frac{P_i - P_{i0}}{L} \quad (i = 1 \sim n)$$
$$L = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(P_i - P_{i0}\right)^2} \tag{3-1}$$

電位差変化測定回路（図 3-15）による出力値から，上式の電極間電位差変化を算出する手順は Appendix B を参照されたい.

第 3.3.節では電極間電位差変化を初期の電極間電位差変化で除したものを応答曲面の説明変数として用いた．ここでは，測定装置の都合上及び簡便のためにはく離に起因した電極間電位差変化を直接規格化し，応答曲面の説明変数とした．はく離位置を被説明変数，規格化した電極間電位差変化 Δp_i を説明変数とし，応答曲面を作成した．また，はく離寸法に対しては，規格化電極間電位差変化に加えて大きさ L も説明変数とした．1 段階同定では 2 次多項式を，2 段階同定では 1 次多項式をそれぞれ用いた.

$$\text{Location, size}(1^{st}\ \text{stage}) = \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^{\,2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \beta_{ji} x_j x_i \tag{3-2}$$

$$\text{Location, size}(2^{nd}\ \text{stage}) = \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i \tag{3-3}$$

応答曲面作成の際には，有意水準を 5%とした t 検定により回帰寄与の低い項は削除し，自由度調整済み決定係数が最大になるようにした(Appendix A 参照)．はく離位置及び寸法はそれぞれに作成した応答曲面式(3-2)及び(3-3)を用いて同定した．

3.5.5. 多数回のはく離実験による応答曲面作成

はく離実験は計 54 回行い，はく離に起因した 54 組の電極間電位差変化を測定した．1st stage でのはく離同定用応答曲面作成のために，この中から均等に 27 組のデータを選んだ．本問題ではその対称性から，理論的にははく離位置が x=0mm を対称として電極間電位差変化も対称となる．従って，上記 27 組のデータを対称にしたものも応答曲面作成用データとして用いた．また，実験データには誤差が含まれるため，それを許容するために規格化電位差変化 Δp_i に対しては最大値 1 の 10%の誤差を，大きさ L には自身の 10%の誤差を乱数により作成し，上記データに足し合わせることによって得られる擬似的に誤差を含めたデータ 54 組も加えて応答曲面を作成した．従って，応答曲面作成に用いた全学習データは 108 組である．1st stage では 2 次式の応答曲面を作成するため，説明変数は最大で 27 個である．応答曲面作成のためのデータ数としては十分である．

2nd stage でのはく離同定用応答曲面作成には，1st stage での応答曲面作成に使用したデータの中から，はく離位置が x=-20～20mm（電極 DF 間）に存在する 7 組のデータを用い，上記と同様の手順にて合計 28 組を使用した．2nd stage では応答曲面は 1 次式であり，説明変数は最大で 4 個であるため，応答曲面作成のデータ数としては十分である．

3.5.6.　同定結果

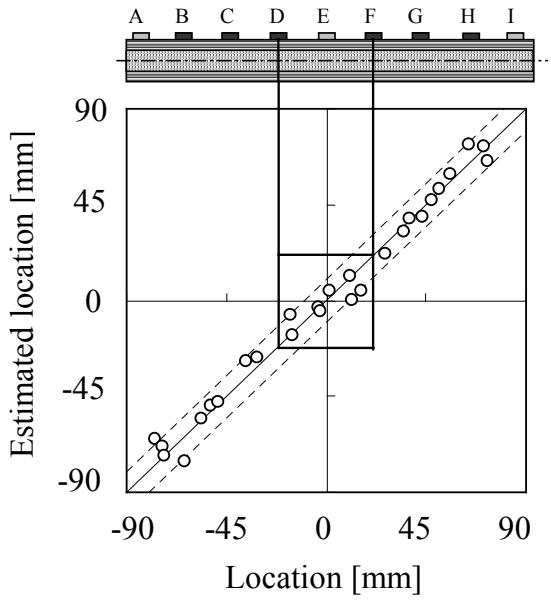
作成した応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は 1st stage の位置同定用応答曲面で 0.977，寸法同定用で 0.748 であり 2nd stage の位置同定用で 0.860，寸法同定用で 0.756 であった．作成した応答曲面を用いて，応答曲面作成に使用していない残りの実験データ 27 個のはく離同定を行い，検証した．1st stage での同定結果を図 3-16 に示す．横軸は実際のはく離位置または寸法，縦軸は同定したはく離位置または寸法であり，図中に実線で示す対角線が正確な同定を示す．また，はく離位置同

定での破線は± 10mm，はく離寸法同定での破線は± 5mm の誤差範囲を示す．位置の同定ではほぼ± 10mm の誤差範囲であり，非常に精度良く同定されている．寸法の同定では，白抜きのプロットははく離が電流電極間中央付近以外すなわち電極 DF 間より外側に存在する場合の同定結果を示し，黒塗りのプロットは電極 DF 間（試験片中央付近）に存在する場合の同定結果である．はく離が電流電極間中央付近に存在する場合には同定精度が低下しているものがあり，解析結果と一致している（図 2-5 参照）．これは電流電極間中央付近では厚さ方向電流密度が低下することが原因であったが，はく離寸法が小さいほど厚さ方向電流を妨げる影響が少なくなるために顕著となっている．

電流電極間中央付近での寸法同定精度を高めるために，はく離が電極 DF 間に存在すると同定されたはく離についてのみ 2nd stage での同定を行った．

図 3-16(a)の 1st stage でのはく離位置同定において電極 DF 間に存在すると同定されたはく離，すなわち図中の実線で囲まれた範囲に存在する 8 個のはく離に対して，再度 2nd stage での同定を行った．図 3-17 に同定結果を示す．電流をはく離に近い中央電極 E から負荷することにより得られる電極間電位差変化を用いることで，1st stage では誤差の大きかった寸法の同定精度が大幅に向上している．また，はく離位置の同定精度にも向上が見られる．実際のはく離形状は様々であるが，すべてのはく離を精度良く同定しており，2 段階同定電位差法の有効性が実証された．

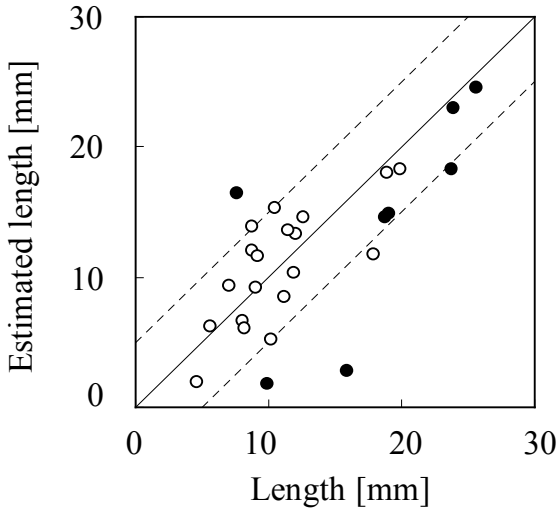
前節の解析結果より，繊維体積含有率が 62.1%と高い積層板に対しては 2 段階同定電位差法が適用できないという結果を得たが，繊維体積含有率が 65.5%の積層板では任意の位置に生じたはく離を全て精度良く同定することができ，実験的には 2 段階同定電位差法は非常に有効であることが示された．このように繊維体積含有率が高い積層板でも高精度なはく離同定が可能である理由については第 5 章にて述べる．



(a) Estimated location

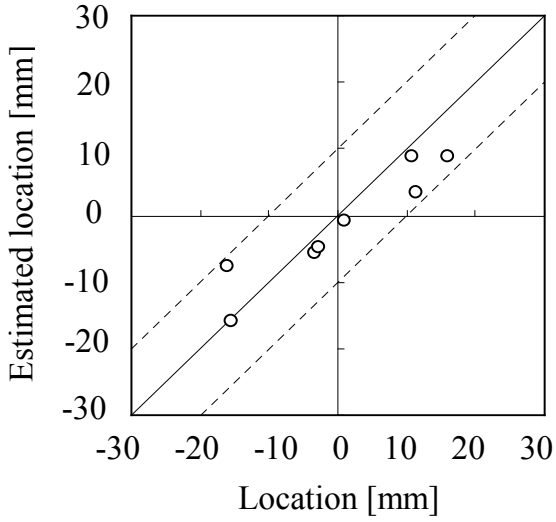
○ Delaminations exist outside electrode D and F.

● Delaminations exist inside electrodes D and F.

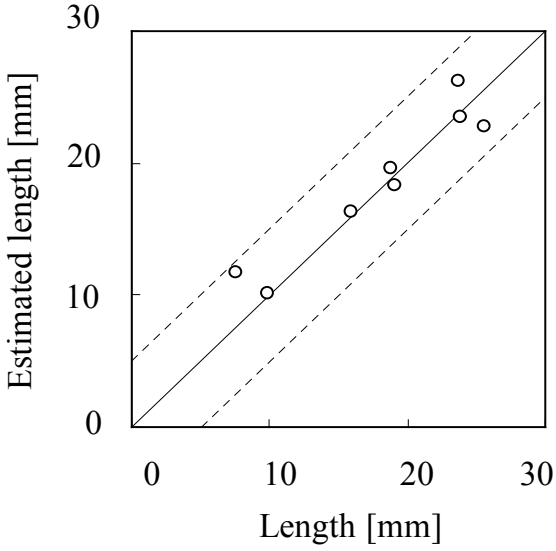


(b) Estimated length

Fig. 3-16 1st stage estimation results using the response surfaces obtained from the experimental data



(a) Estimated location



(b) Estimated length

Fig. 3-17 2nd stage estimation results using the response surfaces obtained from the experimental data

3.6. 結　言

CFRP 直交積層板の端部から他端部電極に電流を負荷する場合，電流電極間中央付近にてはく離形状に依存して同定精度が著しく低下する問題点を改善する方法を提案し，その有効性を確認した．得られた結果を要約すると以下の通りである．

(1) はく離形状に依存せずに精度良くはく離を同定するためには，電流電極間中央部での厚さ方向電流を高める必要がある．はく離が試験片中央区間に存在する場合に対してのみ，中央電極から試験片端部に電流を負荷して得られる電極間電位差変化を用いることで，はく離形状に依存せずにはく離の同定を行うことが可能である．

(2) 電流を試験片端部から他端部電極まで負荷して得られる電極間電位差変化からはく離を同定する 1st stage にて，はく離が電流電極間中央付近に存在すると推定された場合のみ，2nd stage として電流を中央電極から負荷することで得られる電極間電位差変化からはく離を同定する 2 段階同定電位差法を提案した．

(3) 提案した 2 段階同定電位差法により，直線状の層間はく離に起因した応答曲面を用いて，形状の異なる Z 型，逆 Z 型のはく離を精度良く同定可能であることが明らかになった．

(4) 多数回のはく離実験により学習データを取得して応答曲面を作成することで, 2 段階同定電位差法により CFRP 積層板に埋没するはく離の同定が可能であることを実験的に示した．

(5) 繊維体積含有率が 62.1%の積層板では，はく離同定精度が著しく低下することが FEM 解析により示されたが, 繊維体積含有率が 65.5%の積層板を用いたはく離実験では，精度良くはく離同定が可能であった．このように異なる結果となった原因については，第 5 章にて述べる．

参　考　文　献

[1] A.Todoroki, M.Tanaka, and Y.Shimamura, “Measurement of Orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method”, Composites Science and Technology, 62(5) (2002), 619-628.

第 4 章

非対称電流負荷電位差法による改善

4.1.　緒　言

第 3 章では, 電位差法の問題点を解決する方法として 2 段階同定電位差法を提案し，その有効性を示した．本章では，問題点を解決するもう一つの方法として，非対称電流負荷電位差法を提案する．まず，非対称電流負荷電位差法の原理を述べ，その有効性を解析的，実験的に検討した．

4.2.　試験片形状及び解析方法

試験片形状は，長さ 180mm，幅 10mm，厚さ 1mm の [0/90]s 直交積層板である（図 4-1）．試験片片側表面には長さ 4mm の電極が 9 個設置してあり，電極 BF 及び DH が電流負荷電極，電極 A, C, E, G, I が電圧測定電極であり，電極間電位差は 4 電極法での測定となる．積層板に生じるはく離は，試験片表面（xy 面）への投影全長をはく離寸法, 試験片中央からはく離寸法中央までの距離をはく離位置とする．なお，はく離は y 方向に一様とする．

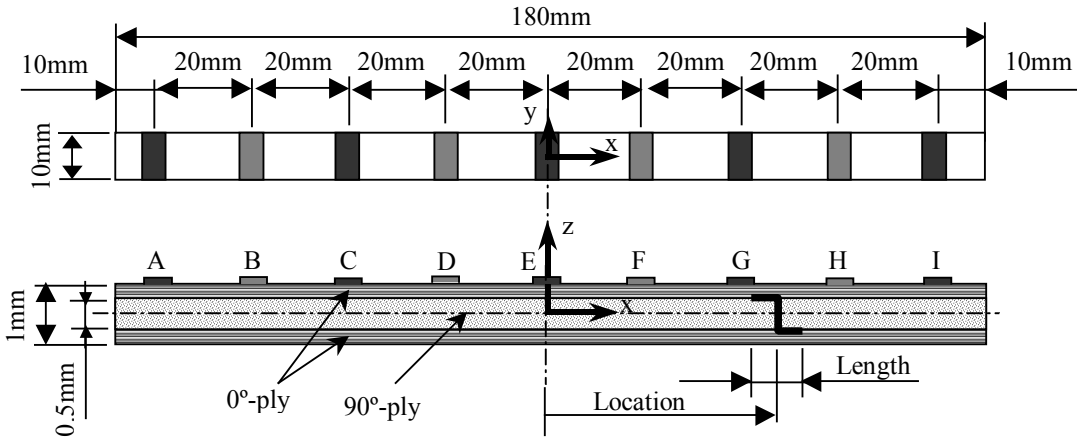


Fig. 4-1 Configuration of beam type specimen with nine electrodes

FEM 解析は汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いて行い，要素分割は x 方向を 0.25mm，z 方向を 0.0625mm とした四角形四節点要素である．y 方向には一様なため，要素分割は行っていない．電極は節点をカップリングして電位を等しくしている．はく離作成の際は，節点を二重に定義して要素分割を行い，はく離発生時に節点を分離して完全に電流が流れない状態を模擬している．また，解析に用いるはく離形状は直線状の層間はく離，マトリックス割れを有する Z 型及び逆 Z 型のはく離である．

解析に用いた CFRP の導電率は第 2 章で用いた値と同じ，繊維体積含有率が 47.2%の積層板にて実測したものである．すなわち，繊維方位導電率σ_0=4.6×10^3 [S/m]，繊維直交方位導電率σ_{90}=4.83 [S/m]，厚さ方位導電率σ_t=1.03 [S/m]であり，厚さ方位導電率は層間樹脂リッチ層も含んだ値である．

4.3.　はく離同定の原理

電流を電極 B から F に負荷した場合（電流経路①とする．図 4-2 参照），厚さ方位電流密度は電流電極間中央すなわち x=-20mm にてゼロとなる．従って，この部分にはく離が存在する場合, マトリックス割れの影響を受けて規格化電極間電位差変化ははく離形状に依存して大きく異なる．図 4-3 は，寸法 5mm のはく離が x = -20mm 付近に存在するときの電極 AC，CE，EG，GI 間の規格化電極間電位差変化を FEM により算出した結果である．横軸は電位差測定電極間であり，縦軸は規格

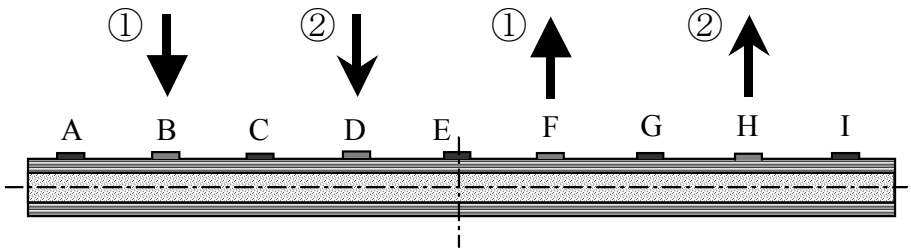
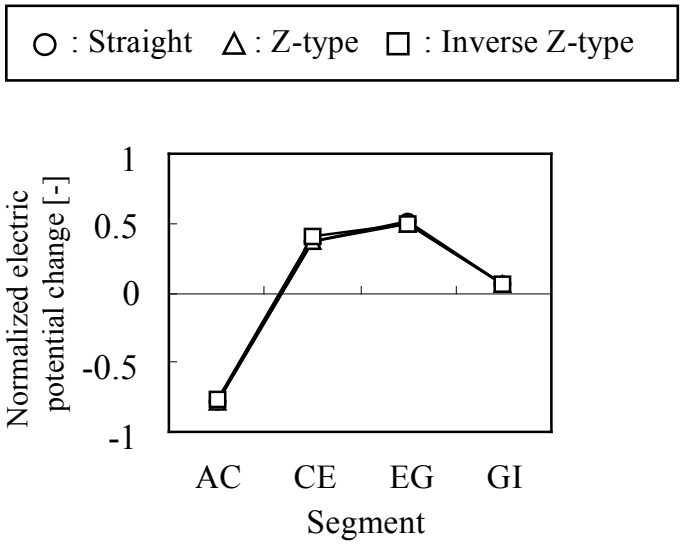
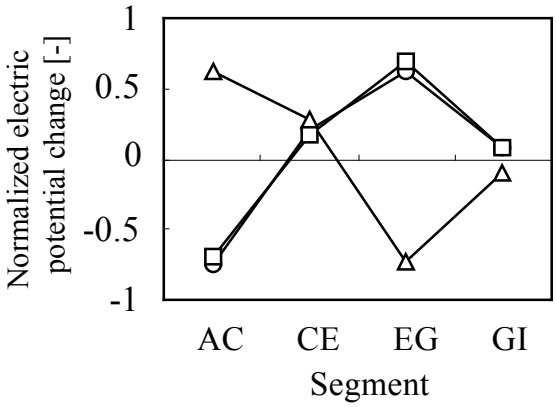


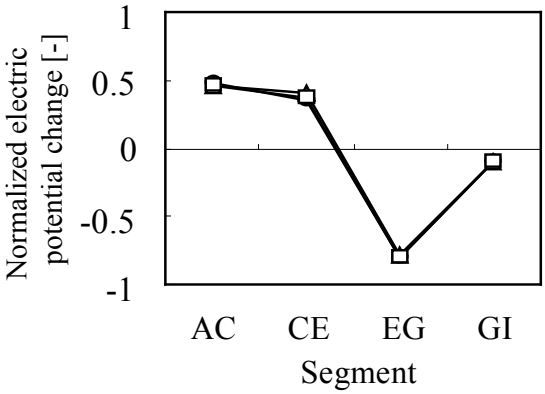
Fig.4-2 Asymmetrical electric path



(a) Delaminations exist at x= -25mm



(b) Delaminations exist at x= -20mm



(c) Delaminations exist at x= -15mm

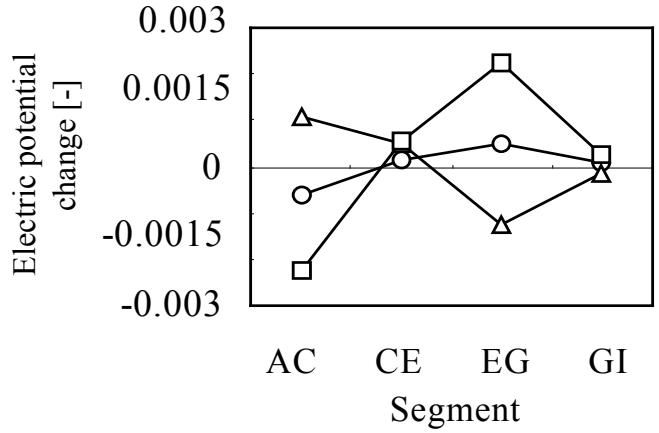
Fig. 4-3 Normalized electric potential changes

化電極間電位差変化を示す．はく離が電流電極間中央 x = -20mm に存在するときのみ，規格化電極間電位差変化ははく離形状に依存して大きく異なっている．従って，はく離が電流電極間中央付近に存在する場合のみ，はく離形状に依存した大きな誤同定を導く原因となる．

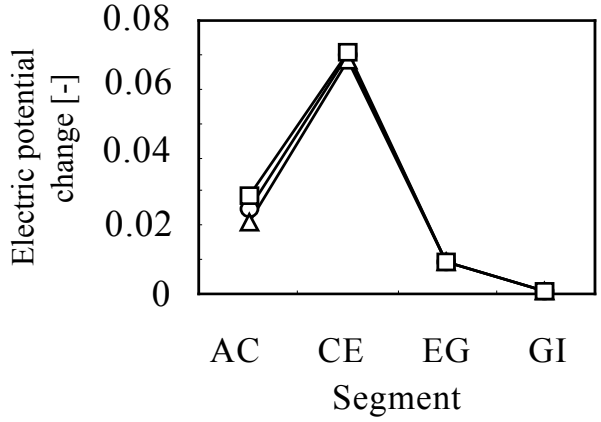
一方，図 4-4 ははく離が電流電極間中央 x= -20mm 及び電流電極部 x= -60mm に存在する場合の規格化前の電極間電位差変化を FEM により算出した結果である．はく離が電流電極間中央に存在する場合(図 4-4a)，電極間電位差変化ははく離形状に依存して大きく異なるが，厚さ方位電流の消滅のために電流阻害の影響が小さく，その絶対値ははく離が電流電極部に存在する場合(図 4-4b)と比較して非常に小さい．

次に，電流を電極 D から H（電流経路②とする．図 4-2 参照）に負荷することを考える．x=-20mm 付近に存在していたはく離は，この電流負荷経路では電流電極に近いため，厚さ方位電流密度を阻害する影響が大きく，マトリックス割れなどのはく離形状の影響をほとんど受けない大きな電極間電位差変化を得ることができる．はく離が x=-20mm に存在する場合の，電流経路①と②により得られる電極 AC，CE，EG，GI 間の電位差変化を FEM により算出し，得られた計 8 個の電極間電位差変化を 1 組として規格化したものを図 4-5 に示す．図中横軸表記の添え字は電流経路を表す．電流経路①では厚さ方位電流密度の低下のためにはく離形状に依存して電極間電位差変化は大きく異なるが，電流経路②により得られる電極間電位差変化と比較するとその大きさは非常に小さく，差異はごく僅かである．また，電流経路②ではは く離は電流電極付近に存在するため，電極間電位差変化ははく離形状にほとんど影響を受けない．従って，このように非対称に作成した電流電極を用いて電流を負荷することによりそれぞれ得られる電極間電位差変化を用いることで，はく離形状に依存しない規格化電極間電位差変化を得ることができる．つまり，はく離形状に依存せずにすべてのはく離の位置及び寸法が同定可能となる．

このように，1 回の電流電極対の選択が試験片中央（z 軸）に対して非対称であることから，非対称電流負荷電位差法と呼ぶことにする．この方法では，各電流負荷経路において電流電極に隣接する電圧電極位置までの範囲に生じる厚さ方向電流を利用し，その範囲に生じたはく離が厚さ方向電流を阻害することによる電位差変化をそれぞれ測定していることになる．図 4-6 には電流経路①及び②によって生



(a) Delaminations exist at x=-20mm



(b) Delaminations exist at x=-60mm

Fig. 4-4 Electric potential changes before normalization

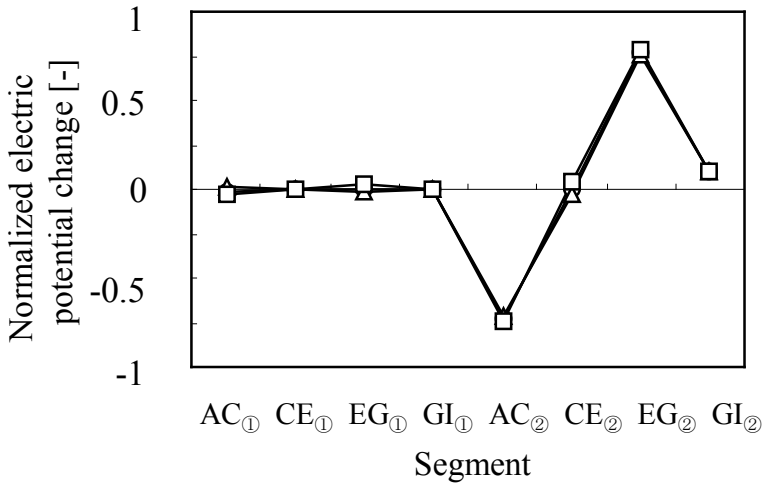
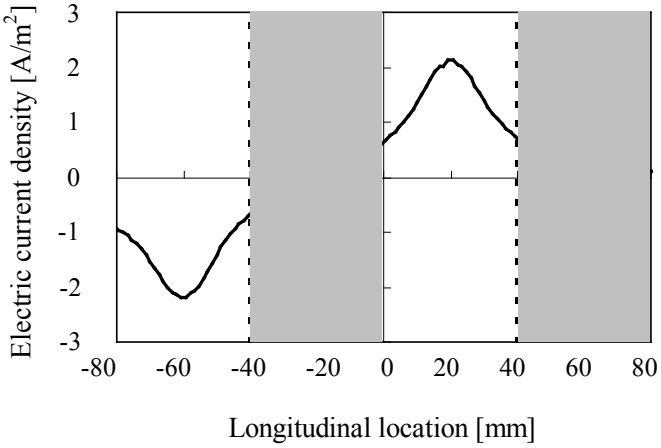
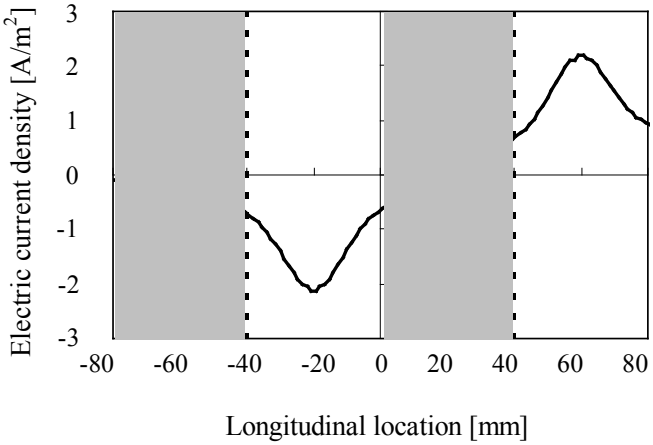


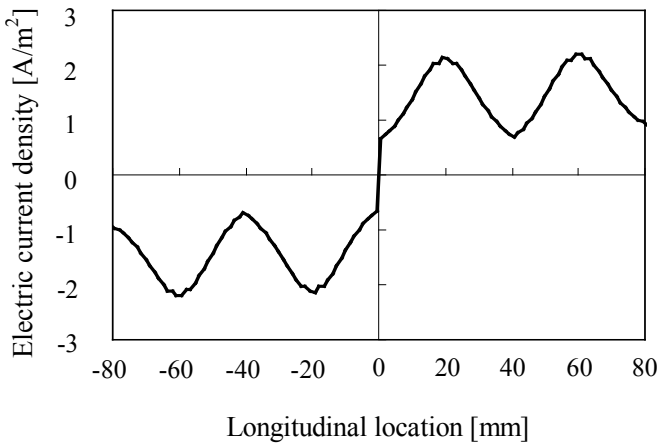
Fig. 4-5 Normalized electric potential changes obtained from asymmetrical electric charges



(a) Electric current density by current path 1



(b) Electric current density by current path 2



(c) Effective electric current density by current path 1 and 2

Fig. 4-6 Electric current density to the thickness direction

じる電極側層間（z=0.25mm）での厚さ方向電流密度を示す．非対称電流負荷電位差法では，図 4-6a 及び b の陰影されていない厚さ方向電流の高い部分のみを利用してはく離検知を実施していると考えることができ，実質的には図 4-6c に示す厚さ方向電流を有している．

ここで, 上述のように非対称にそれぞれ作成した電極から電流負荷を行なう場合には，はく離が電流電極の外側に生じる場合もある．図 4-7 は，電流経路①における積層板内部の電位分布を FEM により算出したものである．CFRP 積層板の強い電気的異方性のために，電流電極の外側にも迂回電流が生じている．従って，電流電極 BF 間よりも外側にはく離が生じる場合にも，はく離に起因して電位差変化は生じるため，はく離の検出が可能である．

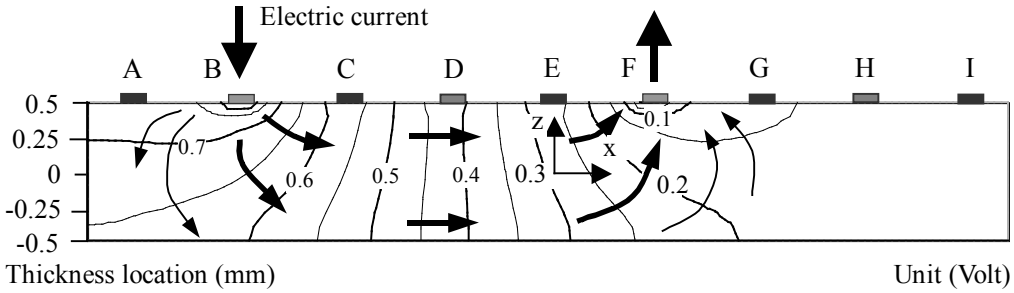


Fig. 4-7 Contour plot of electric potential in the CFRP laminates by current path 1

4.4.　はく離同定方法

はく離発生前に，電極 BF 間（電流経路①）及び電極 DH 間（電流経路②）に電流をそれぞれ負荷し，電極 AC，CE，　EG，　GI 間の電位差 $P_{①i0}$ 及び $P_{②i0}$ をそれぞれ測定する．はく離発生後にも再び電流を負荷し，各電極間電位差 $P_{①i}$ 及び $P_{②i}$ を測定し，電極間電位差変化を得る．

$$\begin{cases} \Delta P_{①i} = P_{①i} - P_{①i0} \\ \Delta P_{②i} = P_{②i} - P_{②i0} \end{cases} \quad (i = 1 \sim 4) \qquad (4\text{-}1)$$

この 2 種類のデータをすべて用い，規格化したものを応答曲面の説明変数とする．

$$\Delta p_{①i} = \frac{\Delta P_{①i}}{L},\ \Delta p_{②i} = \frac{\Delta P_{②i}}{L}$$
$$L = \sqrt{\sum_{k=0}^{4}(\Delta P_{①i}{}^2 + \Delta P_{②i}{}^2)} \tag{4-2}$$

従って，はく離位置の同定では説明変数は規格化電極間電位差変化 $\Delta p_{①i}$，$\Delta p_{②i}$ の 8 個，はく離寸法ではこれに規格化に用いたノルム L を加えた 9 個となる．応答曲面には 2 次多項式を採用する．

$$y = \sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n}\beta_{ii} x_i{}^2 + \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\beta_{ji} x_j x_i \tag{4-3}$$

はく離位置及び寸法はそれぞれに作成した応答曲面式(4-3)を用いて同定される．応答曲面作成の際には，有意水準を 5%とした t 検定により回帰寄与の低い項は削除し，自由度調整済み決定係数が最大になるようにした（Appendix A 参照）．

4.5.　有限要素法解析による検討

4.5.1.　応答曲面作成

応答曲面作成のために FEM 解析で模擬するはく離形状はマトリックス割れのない直線状の層間はく離である．解析に用いた CFRP の導電率は表 2-1 に示す．はく離寸法は 5, 10, 20, 30, 40mm の 5 通り，はく離位置は x= -80mm から 80mm までの区間において 5mm 間隔の位置で作成し，合計 306 回の FEM 解析を実施した．ただし，はく離寸法によっては端部に貫通したはく離が生じないように 5mm づつ内側に移動している．本手法のはく離形状に対するロバスト性を評価するため，作成した応答曲面を用いて Z 型及び逆 Z 型のはく離同定を行なう．また，応答曲面作成に使用していない 7, 15, 25, 35mm の層間はく離，Z 型及び逆 Z 型のはく離についても同様に電極間電位差変化を算出し，同定することで本手法の内挿の同定精度評価も行った．応答曲面作成の際には，規格化電極間電位差変化 Δp_i に対しては最大値 1 の 10%の誤差を，ノルム L には自身の 10%の誤差を乱数により作成し，足し合わせることによって得られる擬似的に誤差を含めたデータも加えて応答曲面

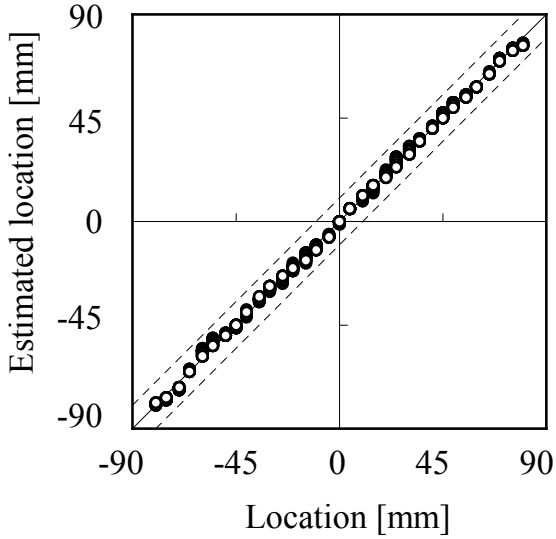
を作成した．これは，実際に実験結果よりはく離同定を行なう場合に，実験誤差を許容する応答曲面を作成することを想定している．

4.5.2.　同定結果

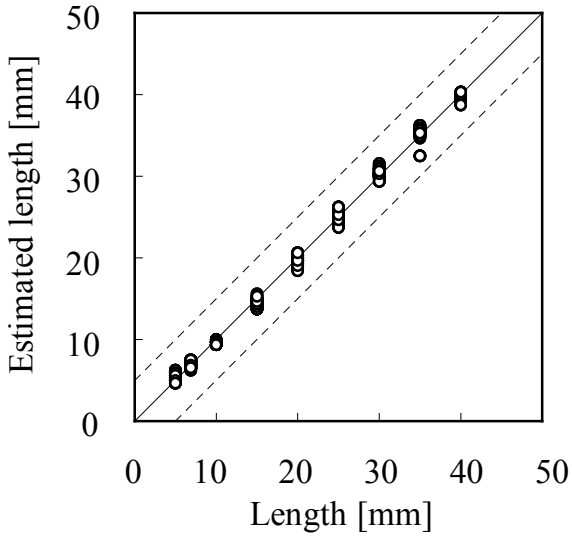
マトリックス割れのない直線状の層間はく離に起因した FEM 解析より作成した応答曲面を用いて直線状の層間はく離, Z 型及び逆 Z 型の全てのはく離位置及び寸法を同定した結果を図 4-8 に示す．ここで，作成した応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は位置同定用応答曲面で R_{adj}^2=0.9909，寸法同定用で R_{adj}^2=0.9955 であった．

横軸は実際のはく離位置または寸法, 縦軸は同定したはく離位置または寸法であり，図中に実線で表す対角線が正確な同定を示す．また，はく離位置同定結果での破線は± 10mm，はく離寸法同定結果での破線は± 5mm の誤差範囲を示す．

それぞれの電流負荷経路の中央付近にはく離が存在する場合にも同定精度の低下は生じず，また，はく離形状にも依存せずに非常に精度よく同定されている．更に, 学習に用いていないはく離についても学習データと同様に高精度に同定されている. 非対称電流負荷による電位差法の有効性が FEM 解析により明らかとなった．



(a) Estimated location



(b) Estimated length

Fig. 4-8 Estimation results of straight, Z-type, and inverse Z-type delamination cracks using the response surfaces obtained from the analyses of straight delamination

4.6.　はく離実験による検討

4.6.1.　試験片形状

用いた材料は三菱レイヨン製一方向プリプレグシート PYLOFIL#380 であり，オートクレーブ製法により，製造元が提供する効果スケジュール 130Cº×0.7MPa×90min にて硬化させた．その後，図 4-1 のように長さ 180mm，幅 10mm にダイヤモンドカッターを用いて切断した．厚さは約 1mm である．作成した試験片の繊維体積含有率を JIS K 7075 燃焼法で測定した結果は 65.5%であった．試験片片側表面には長さ 4mm，厚さ 0.02mm の銅箔を一体成形することにより，9 個の電極を設置した．

積層板へのはく離の挿入は島津製オートグラフを用い，3 点曲げ治具を用いた層間せん断試験により行なった．はく離の位置及び寸法は光学顕微鏡を用いて測定した．生じたはく離のほとんどはマトリックス割れを有する層間はく離であり，y 方向には一定の形状である．

4.6.2.　電極間電位差変化測定回路

はく離発生に伴う電極間電位差変化は微小であるため，第 3.5.節と同様に差動増幅回路を用いて電圧電極 A，C，E，G，I の電位変化を 1000 倍に増幅し，共和製データロガーPCD-320A にて測定した．

4.6.3.　電位差変化の測定及び同定手順

まず，はく離発生前に電極 BF 間（電流経路①）及び電極 DH 間（電流経路②）に電流をそれぞれ負荷し，電圧電極 A，C，E，G，I の電位 $P_{①i0}$ 及び $P_{②i0}$ をそれぞれ測定した．はく離を作成した後にも同様に電圧電極の電位 $P_{①i}$ 及び $P_{②i}$ を測定し，はく離発生による，電極 AC，CE，　EG，　GI 間の電位差変化を算出した．

$$\begin{cases} \Delta P_{①i} = P_{①i} - P_{①i0} \\ \Delta P_{②i} = P_{②i} - P_{②i0} \end{cases} \quad (i = 1 \sim 4) \qquad (4\text{-}4)$$

電位差変化測定回路（図 3-15）による測定値から，上式の電極間電位差変化を算

出する手順は Appendix B を参照されたい.

この 2 種類のデータをすべて用い, 規格化したものを応答曲面の説明変数とする. はく離位置の同定では説明変数は規格化電極間電位差変化 $\Delta p_{①i}$, $\Delta p_{②i}$ の 8 個，はく離寸法ではこれに規格化に用いたノルム L を加えた 9 個として, 2 次多項式による応答曲面を作成した．応答曲面作成の際には，有意水準を 5%とした t 検定により回帰寄与の低い項は削除し，自由度調整済み決定係数が最大になるようにした（Appendix A 参照）.

4.6.4.　多数回のはく離実験による応答曲面作成

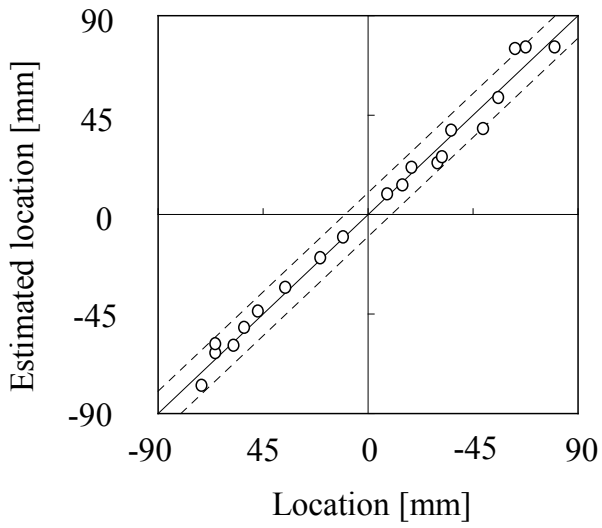
はく離実験は計 74 回行い, はく離に起因した 74 組の電極間電位差変化を測定した．はく離同定用応答曲面作成のために，この中から均等に 54 組のデータを選んだ．第 3.5 節と同様に，上記 54 組のデータを対称にしたものも応答曲面作成用データとして用いた．また，実験データに含まれる誤差を許容するために，規格化電極間電位差変化 Δp_i に対しては最大値 1 の 10%の誤差を, ノルム L には自身の 10%の誤差を乱数により作成し, 上記データに足し合わせることによって得られる擬似的に誤差を含めたデータ 108 組も加えて応答曲面を作成した．従って，応答曲面作成に用いた全データは 216 組である．応答曲面には 2 次多項式を採用したため，説明変数は最大で 54 個であり，学習データ数としては十分である.

4.6.5.　同定結果

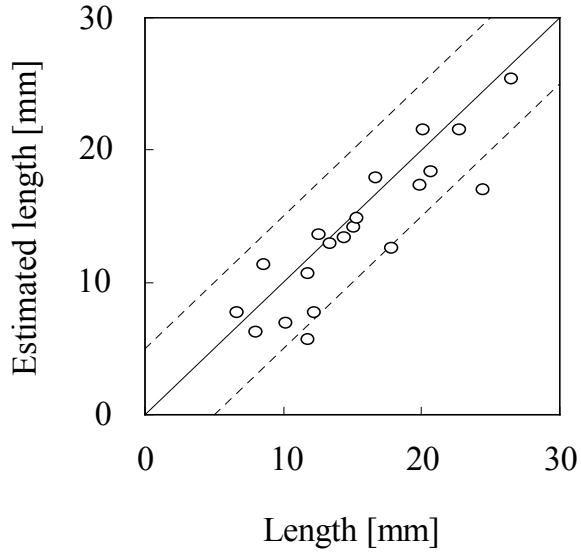
作成した応答曲面の回帰精度を表す自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は位置同定用応答曲面で R_{adj}^2=0.980，寸法同定用で R_{adj}^2=0.763 であった.

作成した応答曲面を用いて，応答曲面作成に使用していない残りの実験データ 20 個のはく離同定を行なった結果を図 4-9 に示す．縦軸，横軸及び図中破線は図 4-8 と同様である.

実際のはく離形状は様々であるが, 位置及び寸法ともに全てのはく離が非常に精度良く同定されている．また，電流電極間中央付近にて同定精度の低下は生じていない．これより，本手法が実験的にも有効であることが示された.



(a) Estimated location



(b) Estimated length

Fig. 4-9 Estimation results using the response surfaces obtained from the experimental data

4.7. 結　言

電位差法の問題点を解決するもう一つの方法として非対称電流負荷電位差法を提案した. 非対称電流負荷電位差法の同定精度がはく離形状にほとんど影響を受けないメカニズムを示し，解析的及び実験的に有効性を検討した．得られた結果を要約すると以下の通りである.

(1) 非対称に作成した電流電極より電流を負荷して得られる電極間電位差変化を合わせて用いて規格化することで，電流電極間中央付近にはく離が生じた場合にもはく離形状に依存しない規格化電極間電位差変化を得ることができる.

(2) 非対称電流負荷電位差法では，2 回の電流負荷により生じる厚さ方向電流の高い領域にてはく離を検知する．はく離検知のために有効な厚さ方向電流密度を積層板全体で常に高く保つことができる.

(3) FEM 解析により，提案手法がマトリックス割れなどはく離形状の影響を受けずに，精度良くはく離位置及び寸法の同定が可能であることが明らかとなった．また，学習に用いていないはく離についても学習データと同様に同定可能であることが示された.

(4) 多数回のはく離実験により取得した学習データを用いて応答曲面を作成することで，非対称電流負荷電位差法により CFRP 積層板に埋没するはく離の同定が可能であることを実験的に示した.

第 5 章

等価導電率による
実験回数削減法

5.1.　緒　言

電位差法でははく離発生に起因する電極間電位差変化からはく離の位置及び寸法を同定する逆問題解析手法として応答曲面法を用いた. 応答曲面作成のための学習データは, 多数回のはく離実験を実施することにより取得した. その結果, CFRP 積層板に埋没した層間はく離が精度良く同定可能であることが示された. しかしながら，本手法の実機適用を考慮した場合には，実構造物を多数作成し，はく離実験を実施する必要が生じるため, 学習データの取得のために多数回のはく離実験を行うことは高コストとなる. そこで, 本章では応答曲面作成に必要な学習データ取得のためのはく離実験数を削減し, 少ない実験回数のみで高精度なはく離同定が可能となる実験回数削減法を提案する.

5.2.　等価導電率について

前章では, 多数回のはく離実験により得られた学習データを用いて応答曲面を作成することにより，精度良くはく離の同定が可能であることが示された. しかしながら，この多数回の実験を FEM 解析結果に置き換えて学習データを取得し，応答曲面を作成することができれば実験コストを大幅に削減することができる.

FEM 解析では CFRP の導電率が必要となるため, 実験的に測定した導電率[1]を用いて前章までの解析を行ってきた. しかしながら，測定対象である CFRP 積層板の一部を切り出して実験的に導電率を測定した値を用いて FEM 解析を行っても，はく離に起因した電位差変化の実験結果と正しく一致させることは難しい[2,3]. この原因は，CFRP が導電体の炭素繊維に絶縁体の樹脂が含浸した状態であり，異方性が強いために精密な電極の作成が難しいためである. 電極作成のための表面樹脂層の除去具合や, 電極作成方法（例えば, 銅箔による一体成形, 銀ペースト，メッキ，スパッタなど）によっても接触抵抗は変化して測定値は大きく影響を受ける[4,5]. また，厚さ方位導電率は積層板の厚さ寸法が小さいために測定が難しく，試験片の大きさによって測定値も大きく異なることが報告されている[5]. 更に，炭素繊維の導電率は成形後の残留応力によって変化するため[6,7]，0º方位及び 90º方位導電率測定のために一方向積層板を用いて測定しても, 積層構成が異なるはく離同定対象の

積層板の導電率とは異なる可能性があり，隣接する層の繊維配向角の違いによっても層間での電気的影響が異なるという報告もある[2,8]．従って，導電率を直接的に測定した値を用いて FEM 解析によりはく離同定用応答曲面を作成しても，実際のはく離を精度良く同定することは難しい．

本章では FEM 解析結果が実験結果と良い一致を示すような導電率を数回のはく離実験結果を元に探索を行う方法を提案する．ここでは，この探索した導電率を等価導電率と呼ぶことにする．これは，微視的には不均質な CFRP を均質導電体とみなしたときの導電率であること，また，はく離に起因した電極間電位差変化を等しくするように FEM 解析結果を実験結果に合わせるため，実験結果がはく離面での局部接触による導通や，はく離による残留応力解放の影響を含むからである．

この探索した等価導電率を用いて，多数回の FEM 解析結果より得られた学習データより応答曲面を作成し，実はく離の同定を行う．この方法により，CFRP 積層板の導電率を直接測定する必要が無くなる．また，実験により得られるはく離に起因した電極間電位差変化，すなわち，応答曲面の説明変数と FEM 解析結果を直接比較して一致するように導電率を決定するため，学習データの信頼性が高くなる利点も有する．誤差を含む実験結果を学習データとするよりも応答曲面の信頼性が向上し，より精度の高い同定が可能となる．

導電率を直接的に測定する場合には，実機構造の一部を取り出し，厚さ方位導電率を測定しなければならない．また，0º方位及び 90º方位導電率測定のために新たに試験片を製作する必要が伴う．実構造への適用の際にはシステムの有効性を検討するために実機を用いた数回の破壊試験を行う必要があるが，この数回の実験による結果を用いて等価導電率は探索することができる利点も有する．

5.3.　CFRP 積層板の導電率の範囲

CFRP 積層板の導電率は用いる炭素繊維，表面処理方法，繊維体積含有率などによって大きく異なる．ここでは様々な研究と製造元のデータを参考にし[1-16]，CFRP 積層板が有する導電率を網羅するように次の範囲を仮定した．

σ_0=1000～100000　　[S/m]

σ_{90}=0.01～100000　　[S/m]　　(5-1)

σ_t=0.01～100000　　[S/m]

ここで，σ_0：繊維方位導電率，σ_{90}：繊維直交方位（90º方位）導電率，σ_t：厚さ方位導電率である．

またσ_0の値はσ_{90}, σ_tより大きく, σ_tの値は樹脂リッチ層のためにσ_{90}以下であり，且つ 100 分の 1 以下ではないと仮定する．

$\sigma_0 > \sigma_{90} \geqq \sigma_t$　and　　$100 \times \sigma_t \geqq \sigma_{90} \geqq \sigma_t$　　(5-2)

式(5-1)及び(5-2)より，導電率比σ_{90}/σ_0，σ_t/σ_0の存在範囲を図 5-1 に示す．ここで，図中のプロットは参考文献[1]により 3 種類の繊維体積含有率 V_f=39.8, 47.2, 62.1%の積層板にて測定された値である．

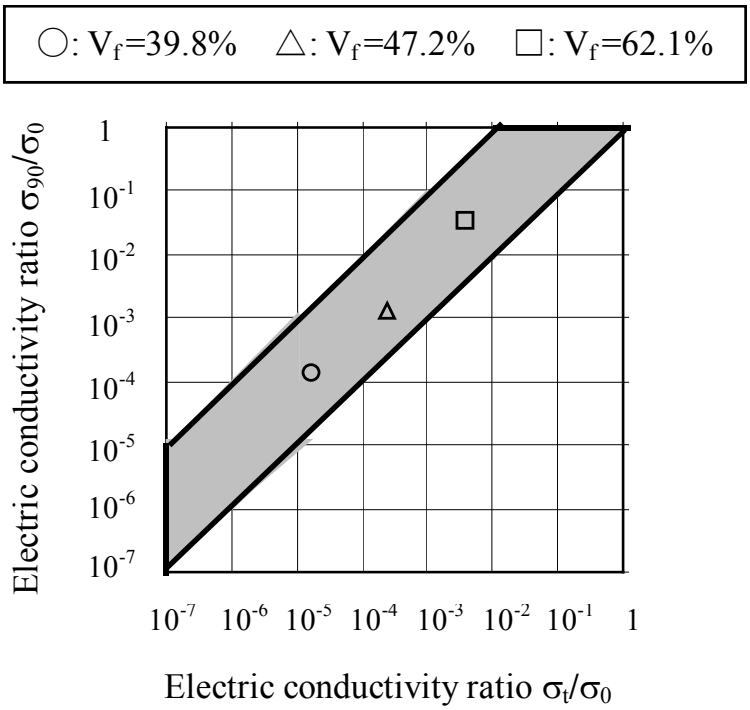


Fig. 5-1　Extent of electric conductivity ratio

5.4.　等価導電率の探索方法

CFRP 積層板に電流を通電する電場問題では，積層板内部で電位 P は以下のラプラス方程式を満たす.

$$\begin{aligned} &\sigma_0 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \sigma_t \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \sigma_{90} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad \text{in the 0°ply} \\ &\sigma_{90} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \sigma_t \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \sigma_0 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad \text{in the 90°ply} \end{aligned} \tag{5-3}$$

上式及び境界条件を満足する調和関数 P が試験片内部での電位分布を表す. ここで, 上式をσ_0 で除すと

$$\begin{aligned} &\overline{\sigma_0} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \overline{\sigma_t} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \overline{\sigma_{90}} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad \text{in the 0°ply} \\ &\overline{\sigma_{90}} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \overline{\sigma_t} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \overline{\sigma_0} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad \text{in the 90°ply} \end{aligned} \tag{5-4}$$

ここに

$$\overline{\sigma_0} = 1 \,,\ \overline{\sigma_{90}} = \frac{\sigma_{90}}{\sigma_0} \,,\ \overline{\sigma_t} = \frac{\sigma_t}{\sigma_0} \tag{5-5}$$

従って，導電率成分をσ_0 で割った値を用いても，支配方程式及び境界条件に変化はなく，電位の等高線形状は相似となるため，導電率成分の比率が等しければ規格化した電極間電位差変化は導電率の絶対値に関係せずに一意に決定される. これを利用し，まず，等価導電率比σ_{90}/σ_0，σ_t/σ_0 を探索し，その後，σ_0 の探索を行う.

探索方法は以下のようである．まず，試験片を幾つか用意し，それぞれにはく離を生じさせて電極間電位差変化を測定し，規格化電極間電位差変化 $(\Delta p_i)_{ex}$ を算出する．次に，FEM 解析により，同様のはく離位置及び寸法を用いて規格化電極間電位差変化$(\Delta p_i)_{fem}$ を算出する．その後，この二つの各規格化電極間電位差変化の誤差平方和を求める.

$$\mathrm{Err} = \sum_{i}^{15} \left(\Delta p_i \big|_{ex} - \Delta p_i \big|_{fem} \right)^2 \tag{5-6}$$

上式の誤差を最小にする導電率比が，等価導電率比となる．ここで，90°層を x 方向に流れる電流はごく微小なため, はく離が電流電極に近い場合には繊維直交方

位導電率は電位差変化にはほとんど影響を与えない．従って，まず$\sigma_{90}/\sigma_0=\sigma_t/\sigma_0$（図 5-1 の対角線上）を探索し，その後，得られた最小値付近において詳細な探索を行うことで，計算時間の短縮が可能である．なお，繊維体積含有率が高い積層板の場合には，樹脂リッチ層はほとんど存在しないために導電率比はほぼ$\sigma_{90}/\sigma_0\approx\sigma_t/\sigma_0$ となるため，探索は容易である．

次に，式(5-6)の誤差を最小化することで得られた等価導電率比の条件を満たし，次式を最小化するσ_0を求める．

$$\mathrm{Err}=\sum_{i}^{3}\left(\mathrm{L_i}\big|_{ex}-\mathrm{L_i}\big|_{fem}\right)^2 \tag{5-7}$$

上式を最小化する導電率が，求めるべき等価導電率となる．

5.5.　2 段階同定電位差法への適用

5.5.1.　等価導電率の探索

まず，第 3.5.節のはく離実験に用いた試験片と同形状の試験片（図 3-12）を 3 個用意し，電極 FG 間(x=31mm)，GH 間(x=53mm)，HI 間(x=69.5mm)にそれぞれはく離を生じさせた．そのときの電極間電位差変化を測定し，規格化電極間電位差変化$(\Delta p_i)_{ex}$を算出した．次に，図 5-1 の対角線から 64 点を取り，FEM 解析により，実験と同様のはく離位置及び寸法を用いて規格化電極間電位差変化$(\Delta p_i)_{fem}$を算出した．この二つの各規格化電極間電位差変化より，式(5-6)を最小化する誤差平方和を求めた．誤差を算出した結果を図 5-2 に示す．これより誤差の最小値はσ_t/σ_0=0.0002～0.0004 の範囲に存在する．

その後，σ_t/σ_0=0.0002～0.0004，σ_{90}/σ_0=0.0002～0.04 までの範囲でσ_t/σ_0は有効数字 2 桁まで，σ_{90}/σ_0は 1 桁まで計 408 回の探索の結果，以下の等価導電率比を得た．

$$\frac{\sigma_{90}}{\sigma_0}=0.0003\ ,\ \frac{\sigma_t}{\sigma_0}=0.00028 \tag{5-8}$$

得られた等価導電率比を用いて，FEM 解析により算出した規格化電極間電位差変化と実験値とを比較したものを図 5-3 に示す．横軸は電位差変化測定電極間，縦

軸は規格化電極間電位差変化である．実験結果と FEM 解析結果は良い一致を示している．

次に，σ_0 の探索を行った．式(5-8)の条件を満たし，式(5-7)を最小化するσ_0 を探索することで，等価導電率を得ることができる．σ_0 の探索は有効数字 2 桁まで計 100 回の探索を行った．結果の一部を図 5-4 に示す．これより等価導電率は以下のように求められた．

$$\sigma_0=41000 \quad [S/m]$$
$$\sigma_{90}=12.3 \quad [S/m] \qquad (5\text{-}9)$$
$$\sigma_t=11.48 \quad [S/m]$$

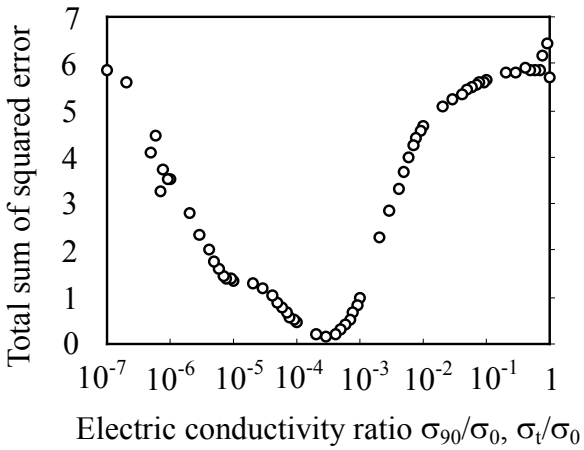
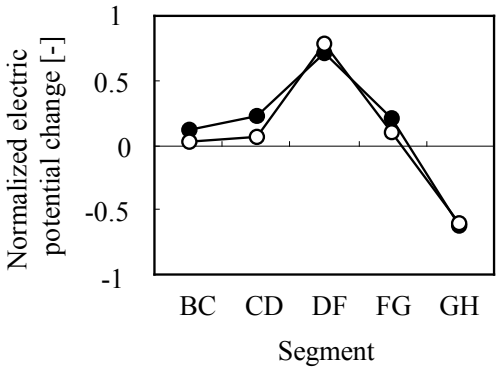
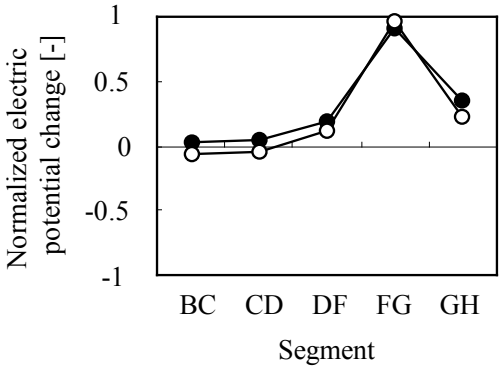


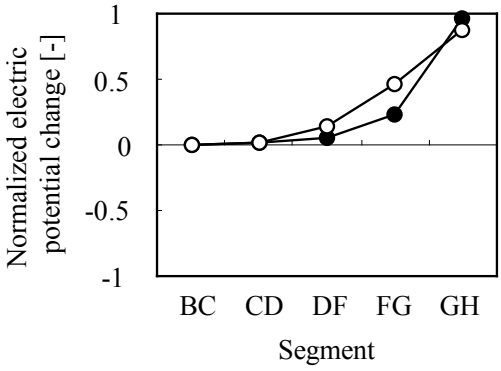
Fig. 5-2　Total sum of squared error at $\sigma_{90}/\sigma_0=\sigma_t/\sigma_0$



(a) Delamination exists at x=31mm
(Delamination length is 11.6mm)



(b) Delamination exists at x=53mm
(Delamination length is 8mm)



(c) Delamination exists at x=69.5mm
(Delamination length is 10.6mm)

Fig. 5-3　Normalized electric potential changes obtained from experiments and FEM analyses

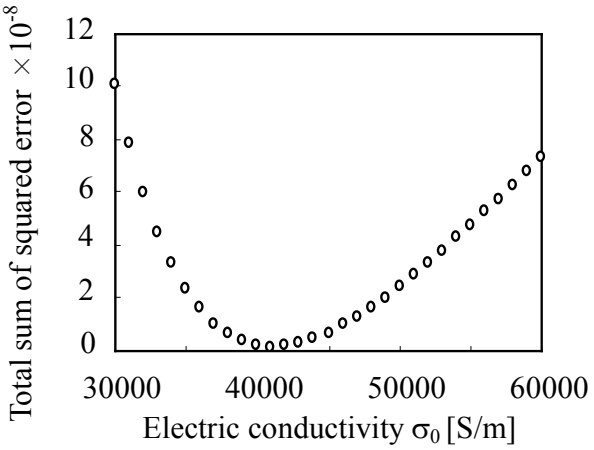


Fig. 5-4　Total sum of squared error at σ_{90} / σ_0=0.0003 and σ_t / σ_0=0.00028

5.5.2. 等価導電率を用いた FEM 解析結果より作成した応答曲面でのはく離同定

前節で求めた等価導電率を用い，FEM 解析結果を学習データとしてはく離同定用応答曲面を作成した．FEM 解析で模擬したはく離形状はマトリックス割れのない直線状の層間はく離である．はく離寸法は 5，7，10，15，20，25，30，35，40mm の 9 通り, はく離位置は x=-90mm から 90mm までの区間において 5mm 間隔の位置で作成し，1st stage 用に合計 283 回の FEM 解析を実施して電極 BC，CD，DF，FG，GH 間電位差変化を算出した．ただし，はく離寸法によっては端部に貫通したはく離が生じないように 5mm ずつ内側にはく離を設定している．また，2nd stage 用には同様に 9 通りのはく離寸法，はく離位置は-20mm から 20mm までの合計 81 回の FEM 解析を行い，電極 CD，DF，FG 間電位差変化を算出した．応答曲面作成の際には実験誤差を許容するように，第 3.5.5.節と同様の方法で規格化電位差変化 Δpi については最大値 1 に対して 10%の誤差を，ノルム L については自身の 10%の誤差を乱数により作成したものを加えたデータも合わせて用いた．

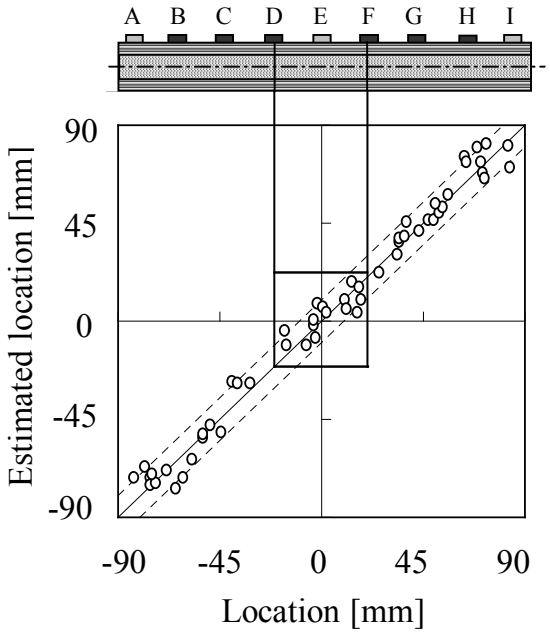
作成した応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は 1st stage の位置同定用応答曲面で R_{adj}^2=0.986，寸法同定用で R_{adj}^2=0.804 であり，2nd stage の位置同定用で R_{adj}^2=0.966，寸法同定用で R_{adj}^2=0.959 である．回帰精度は実験データから作成した

ものよりも高くなっている（第 3.5.6.節参照）.

図 5-5 は, 第 3.5.節にて応答曲面作成及び同定に用いた合計 54 組の実験データを 1st stage にて同定した結果を示す．図中横軸は実際のはく離位置または寸法であり縦軸は推定したはく離寸法または位置である．位置同定結果での図中破線は±10mm の誤差範囲を示し，寸法同定結果での破線は±5mm の誤差範囲を示す．はく離位置同定では，すべてのはく離が非常に精度良く同定されている．はく離寸法同定では，電極 DF 間以外に存在するものについてはほぼ±5mm の誤差範囲に収まっているが，はく離が電極 DF 間に存在する場合には同定誤差が大きい．また，図中には表示できないほど大きく誤同定しているものもあった. このように試験片中央付近で誤同定する傾向は FEM 解析結果と良く一致している.

はく離が電極 DF 間に存在する場合にも精度良く同定するために，はく離位置同定にて電極 DF 間に存在すると推定されたはく離計 15 個については 2nd stage での同定を行った．2nd stage での同定結果を図 5-6 に示す．1st stage では大きく誤同定していたもの全てが非常に精度良く同定されている.

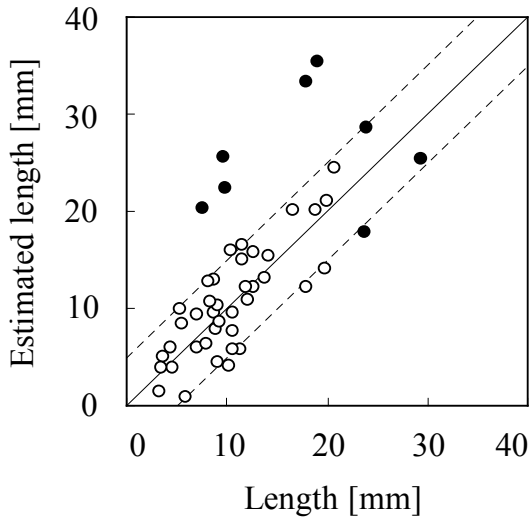
等価導電率を用いた FEM 解析により，多数回の実験を必要とせずにはく離位置及び寸法を精度良く同定する応答曲面の作成が可能であることが示された．1st stage 及び 2nd stage の同定精度は共に，多数回の実験により得られたデータから作成した応答曲面と同等以上の高い精度を有しており, 応答曲面作成に必要であった多数回の実験の大幅な削減が可能となった.



(a) Estimated location

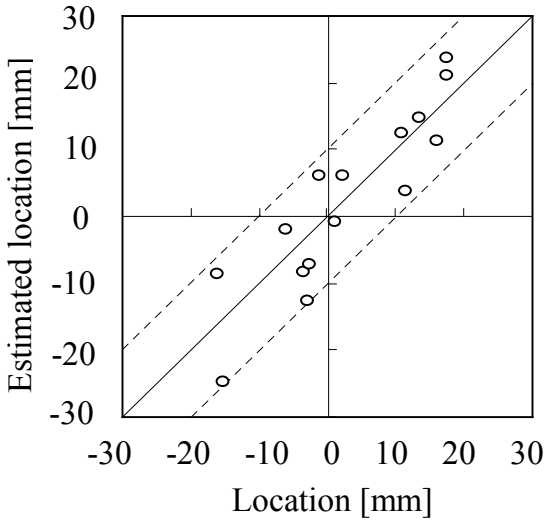
○ Delaminations exist outside electrode D and F.

● Delaminations exist inside electrodes D and F.

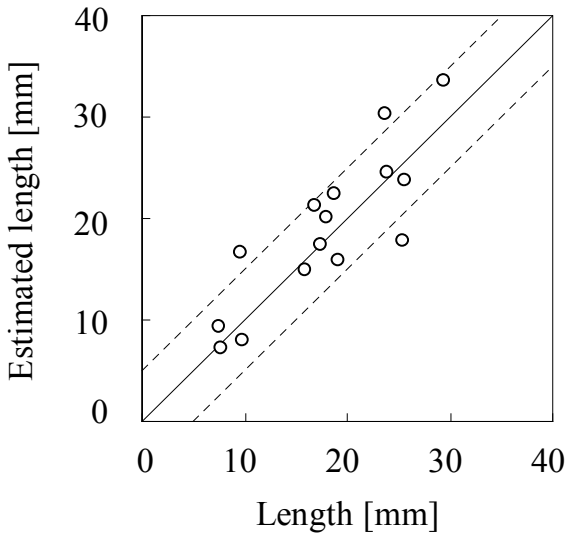


(b) Estimated length

Fig. 5-5 1st stage estimation results of experimental data using the response surfaces obtained from the results of FEM analyses



(a) Estimated location



(b) Estimated length

Fig. 5-6 2nd stage estimation results of experimental data using the response surfaces obtained from the results of FEM analyses

5.5.3. 繊維体積含有率による影響

今回使用した積層板の繊維体積含有率は 65.5%であり，第 3 章にて引用した文献[1]に用いられた積層板(V_f=62.1%)よりも高い．第 3.4.節では，引用文献にて測定された導電率を用いて解析を行った結果，繊維体積含有率が 62.1%と高い場合には 2 段階同定電位差法を適用することができないことが明らかとなったが，第 3.5.節では三菱レイヨン製一方向プリプレグシート PYLOFIL#380 で作成した繊維体積含有率が 65.5%の積層板では，はく離が精度良く同定可能であることを実証した．文献[1]にて導電率測定に用いた積層板は東邦レーヨン製一方向プリプレグシート Q-111 であるため，本研究で用いた材料とは異なるが，両者の間には導電率に大きな差がある．

表 5-1 には，文献[1]にて実測された CFRP 積層板の導電率と，前節で算出した等価導電率を示した．また，図 5-7 は，これらの値を表にプロットしたものである．算出した等価導電率の比率は，文献[1]での繊維体積含有率が 47.2%の積層板の値と近く，このために実験にて精度良くはく離の同定が可能であったと考えられる．また，算出した等価導電率は繊維直交方位と厚さ方位導電率の値が近いために図 6-7 の対角線近傍に存在しており，樹脂リッチ層による影響が少ない．繊維方位導電率については算出した等価導電率が文献[1]と比較して非常に大きな値を取っている．本研究に用いた材料の導電率は測定されていないため，表 5-2 に，航空機構造によく用いられる東レ製炭素繊維の長手方向導電率[17-19]及び，繊維体積含有率を 60%とした場合の一方向積層板の繊維方位導電率を複合則から算出した値を示す．なお，表中の体積抵抗率が製造元データであり，他の炭素繊維の体積抵抗率もほぼ近い値をとっている．算出した等価導電率の繊維方位導電率は，炭素繊維の導電率から複合則により算出したものと近い値を示している．

文献[1]では銀ペーストにより電極を作成し，2 電極法にて測定していることから，測定結果は接触抵抗の影響を大きく受けているのではないかと考えられる．繊維方位は最も電流が流れやすいため，測定される電気抵抗値が非常に小さくなる．このために，実験誤差が最も大きく現れた可能性がある．このように，CFRP 積層板の導電率を測定することは非常に難しく，本章で提案した等価導電率を用いる方法はこの点からも非常に有効である．

このように，CFRP 積層板では，繊維方位導電率が繊維直交方位及び厚さ方位導電率と比較して実際には非常に高いため，繊維体積含有率が 65%程度の積層板でも高精度なはく離同定が可能である．

Table 5-1 Comparison of electric conductivities

	V_f[vol%]	σ_0[S/m]	σ_{90}/σ_0	σ_t/σ_0
From reference	47.2	4600	4.83	1.03
	62.1	5500	204	20.7
Equivalent electric conductivity	65.5	41000	12.3	11.48

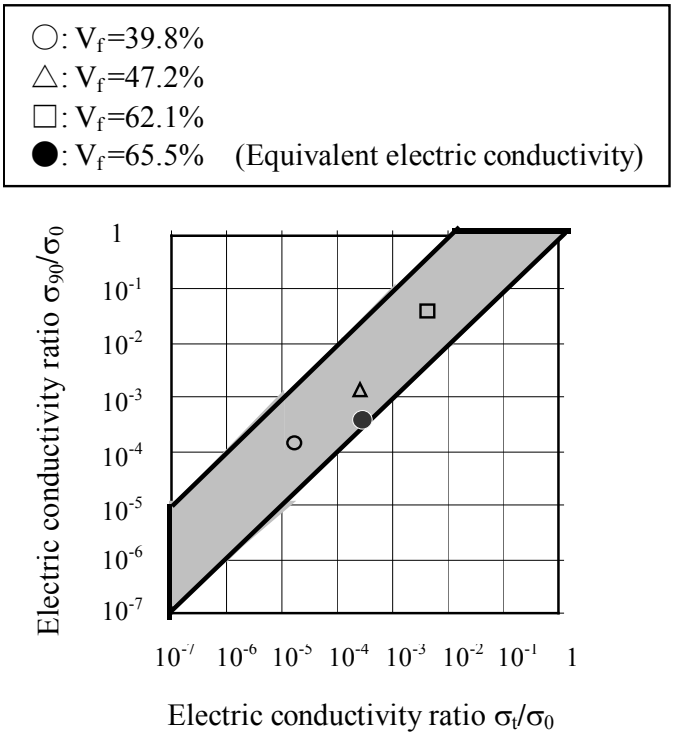


Fig. 5-7 Equivalent electric conductivity ratios

Table 5-2 Electric conductivities of carbon fiber

		T300	T400H	T800H
Fiber	Electric resistivity [Ωm]	1.7×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.4×10^{-5}
	Electric conductivity [S/m]	58824	62500	71429
Laminate (Vf=60%)	Electric conductivity [S/m]	35294	37500	42857

5.6.　非対称電流負荷電位差法への適用

5.6.1.　等価導電率の探索

非対称電流負荷電位差法に関しても等価導電率を探索し，FEM 解析結果より応答曲面を作成してはく離同定を行った. 等価導電率探索のために計 4 回のはく離実験を行った．試験片形状は第 4 章で用いた試験片と同形状（図 4-1）である．はく離はそれぞれ電極 AB 間(x=-64.9mm)，BC 間(x=-52.65mm)，EF 間(x=8.35mm)，FG 間(x=29.9mm)に挿入し，電流経路①による電極間電位差変化を測定した．これら 4 組の実験結果を用いて, 実験結果と整合性を有する解析結果が得られる等価導電率を探索した．ここで，この 4 箇所にはく離を作成したのは，電流経路①では上記 4 区間（電流電極隣接電極間）に発生したはく離に対してのみ大きな電極間電位差変化を得られればはく離同定が可能となるからである. 他の電極間にはく離を作成した場合，電流経路②によって同様の対称な電極間電位差変化を得ることができる.

第 5.5.節と同様に図 5-1 の対角線から 64 点を取り，FEM 解析により実験と同様のはく離位置及び寸法を用いて規格化電極間電位差変化を算出し, 実験結果との誤差平方和を求めた．誤差を算出した結果を図 5-8 に示す．これより誤差の最小値は σ_t/σ_0=0.0002～0.0004 の範囲に存在する.

その後，σ_t/σ_0=0.0002～0.0004，σ_{90}/σ_0=0.0002～0.04 までの範囲でσ_t/σ_0 は有効数字 2 桁まで，σ_{90}/σ_0 は 1 桁まで計 408 回の探索の結果，以下の等価導電率比を得た.

$$\frac{\sigma_{90}}{\sigma_0} = 0.0003\ ,\ \frac{\sigma_t}{\sigma_0} = 0.00027 \tag{5-10}$$

次に，式(5-10)の条件を満たし，式(5-7)を最小化するσ_0を探索した．σ_0の探索も同様に有効数字 2 桁まで計 100 回の探索を行った．結果の一部を図 5-9 に示す．等価導電率の探索結果は以下のようになった．

$$\sigma_0=32000 \quad [S/m]$$
$$\sigma_{90}=9.60 \quad [S/m] \qquad (5\text{-}11)$$
$$\sigma_t=8.32 \quad [S/m]$$

図 5-10 は，等価導電率を用いた FEM 解析により得られた規格化前の電極間電位差変化と実験値との比較である．実験結果と解析結果は良く一致している．

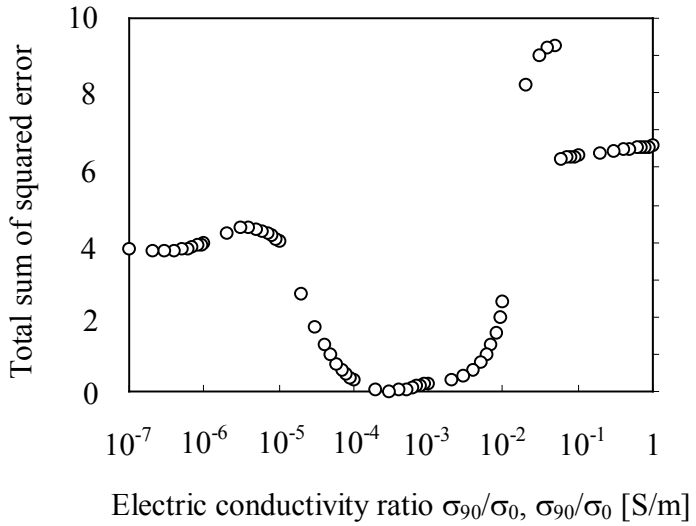


Fig. 5-8 Total sum of squared error at $\sigma_{90}/\sigma_0=\sigma_t/\sigma_0$

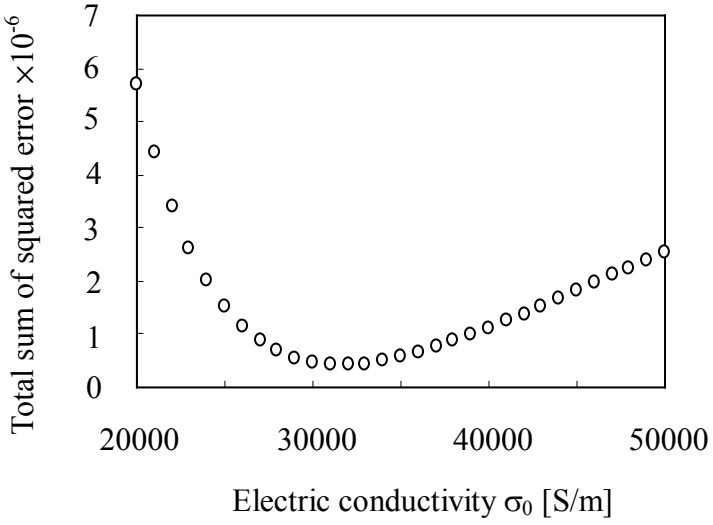
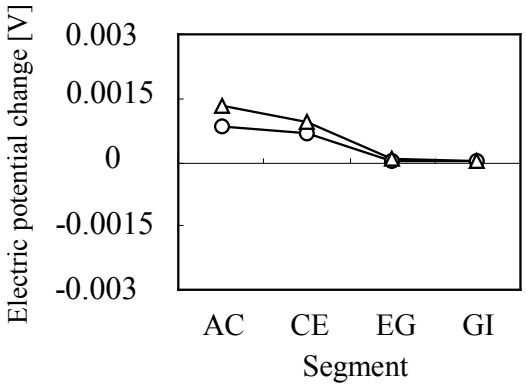
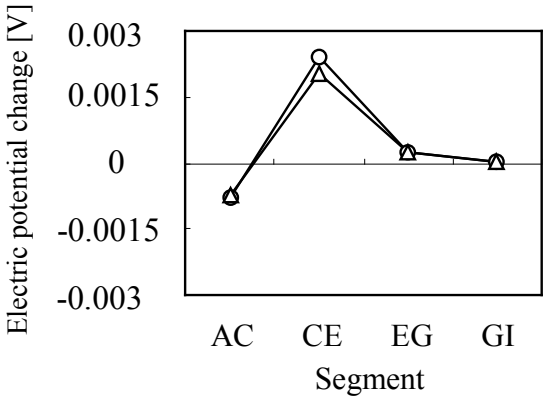


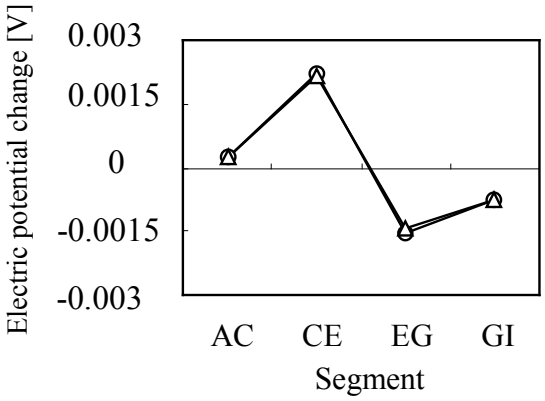
Fig. 5-9 Total sum of squared error at σ_{90} / σ_0=0.0003 and σ_t / σ_0=0.00027



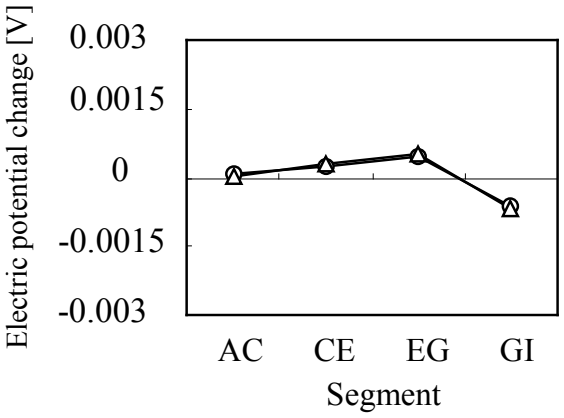
(a) Delamination exists at x=-64.9mm
(Delamination length is 17.8mm)



(b) Delamination exist at x=-52.65mm
(Delamination length is 20.7mm)



(c) Delamination exist at x=8.35mm
(Delamination length is 22.7mm)



(d) Delamination exists at x=29.9mm
(Delamination length is 10.2mm)

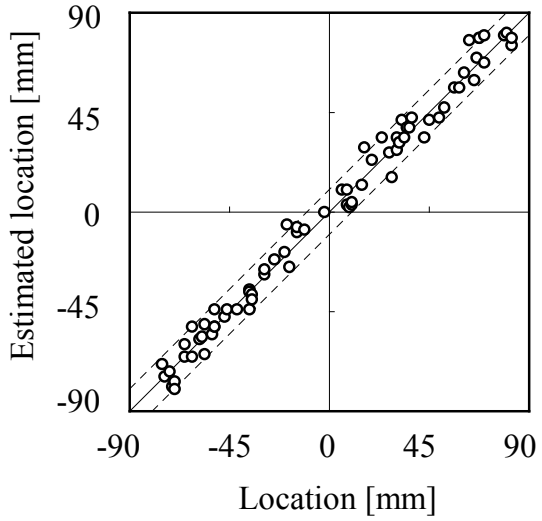
Fig.5-10 Comparison of the electric potential changes between experimental results and FEM analyses

5.6.2.　等価導電率を用いた FEM 解析結果より作成した応答曲面でのはく離同定

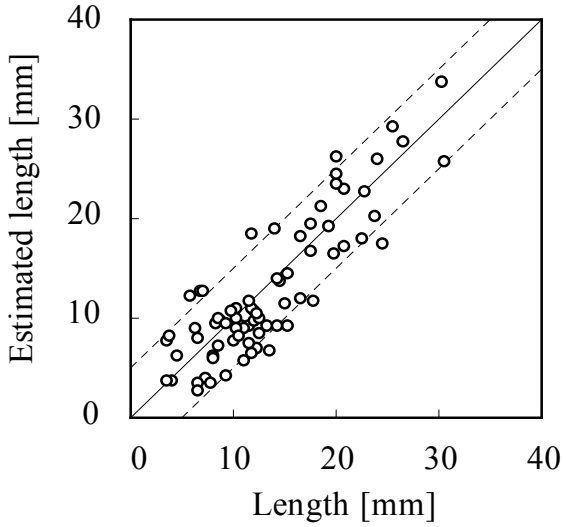
算出した等価導電率を用いて FEM 解析を実施し，マトリックス割れのない直線状の層間はく離に起因した応答曲面を作成した．はく離寸法は 5, 10, 20, 30, 40mm の 5 通り, はく離位置は x=-80mm から 80mm までの区間において 5mm 間隔の位置で作成し，合計 306 回の FEM 解析を実施して電極 AC，CE，EG，GI 間電位差変化を算出した．はく離寸法によっては端部に貫通したはく離が生じないように 5mm ずつ内側に設定している．また，応答曲面作成の際には実験誤差を許容するように，第 3.5.節と同様の方法で規格化電極間電位差変化 Δpi については最大値 1 に対して 10%の誤差を，ノルム L については自身の 10%の誤差を乱数により作成したものを加えたデータも合わせて用いた.

作成した応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 は位置同定用応答曲面で R_{adj}^2=0.991，寸法同定用で R_{adj}^2=0.996 である．作成した応答曲面の回帰精度は実験データから作成したものよりも高くなっている（第 4.6.5.節参照）.

第 4.6.節にて応答曲面作成及び同定に用いた合計 74 組（内 4 組は等価導電率の探索に使用）のはく離実験データを用いてはく離の位置及び寸法を同定した結果を



(a) Estimated location



(b) Estimated length

Fig. 5-11 Estimation results of experimental data using the response surfaces obtained from the results of FEM analyses

図 5-11 に示す．等価導電率探索に用いた実験値についても同定し，合わせて示してある．

図中横軸は実際のはく離位置または寸法, 縦軸は推定したはく離位置または寸法であり，位置同定結果での図中破線は±10mm の誤差範囲を，寸法同定結果での破線は±5mm の誤差範囲を示す．ほとんどのはく離が上記の誤差範囲内であり，精度良く同定されている．また，実験結果から作成した応答曲面と比較しても，同等以上の高い精度を有しており, 応答曲面作成に必要であった多数回の実験の大幅な削減が，非対称電流負荷電位差法でも可能となった.

5.7.　結　言

はく離同定用応答曲面作成のための学習データ取得に必要であった多数回のはく離実験を削減するために，等価導電率による実験回数削減法を提案した．得られた結果を要約すると以下の通りである．

(1) 導電率のばらつきなど実験誤差と FEM 解析の結果とのギャップを埋める方法として実験値に近い結果を示す等価導電率を導入し，誤差平方和の最小化で求め, 求めた等価導電率から FEM 解析で多数の結果を計算して応答曲面を作成する手法を提案した.

(2) CFRP 積層板の有する導電率の範囲を示し，始めに繊維直交方位導電率と厚さ方位導電率を等しいと仮定して探索し，得られた誤差最小値付近で詳細に探索することで，容易に等価導電率を算出することができる.

(3) 等価導電率を用いて FEM 解析を実施することで, 実験結果と良く一致するはく離に起因した電極間電位差変化を算出することができる．応答曲面の説明変数である電極間電位差変化を直接用いて等価導電率を探索するため，信頼性が高く，また，同定精度も高い応答曲面が作成可能である.

(4) 数回のはく離実験により等価導電率を算出し, はく離同定用応答曲面を FEM 解析結果より作成した．多数回のはく離実験を実施し，作成した応答曲面を用いてはく離の同定を行った．全てのはく離が非常に精度良く同定され，提案した手法の有効性が実証された．応答曲面作成用の学習データ取得のために必要な多数回のはく離実験を大幅に削減することが可能となった.

参　考　文　献

[1] A.Todoroki, M.Tanaka, and Y.Shimamura, “Measurement of Orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method”, Composites Science and Technology, 62(5) (2002), 619-628.

[2] N.Angelidis, N.Khemiri, and P.E.Irving, “Experimental and finite element study of the electrical potential technique for damage detection in CFRP laminates”, Smart Materials and Structures, 14 (2005), 147-154.

[3] T.A.Anderson and G.I.Lemoine, “An artificial neural network based damage detection scheme for electrically conductive composite structures”, 44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, (2003), 1-9.

[4] N.Angelidis, C.Y.Wei, and P.E. Irving, “The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain”, Composites: Part A, 35 (2004), 1135-1147.

[5] M.Louis, S.P.Joshi, and W.Brockmann, “An experimental investigation of through-thickness electrical resistivity of CFRP laminates”, Composites Science and Technology, 61 (2001), 911-919.

[6] A.S.Crasto and R.Y.Kim, “Using carbon fiber piezoresistivity to measure residual stress in composites”, Proceeding of 8th technical conference of American society for composites, (1994), 162-173.

[7] X.Wang and D.D.L.Chung, “Piezoresistive behavior of carbon fiber in epoxy”, Carbon, 35(10-11), (1997), 1649-1679.

[8] N.Khemiri, N.Angelidis, and P.E.Irving, ”Damage detection in CFRP using the electrical potential technique”, Progress report (Cranfield University, England), (2001).

[9] R.Schueler, S.P.Joshi, and K.Schulte, “Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping”, Composites Science and Technology, 61, (2001), 921-930.

[10] C.N.Owston, “Eddy current methods for the examination of carbon fibre reinforced epoxy resins”, Material evaluation, 34(11), (1976), 237-244

[11] P.E.Irving and C.Thiagarajan, “Fatigue damage characterization in carbon fibre composite materials using an electrical potential technique” Smart Materials and Structures, 7, (1998), 456-466

[12] A.S.Kaddour, F.A.R.Al-Salehi, and S.T.S.Al-Hassani, “Electrical resistance measurement technique for detecting failure in CFRP materials at high strain rates”, Composites Science and Technology, 51(3), (1994), 377-385.

[13] J.W.Cho and J.S.Choi, “Relationship between electrical resistance and strain of carbon fibers upon loading”, Journal of Applied Polymer Science, 77, (2000), 2082-2087.

[14] S.Wang and D.D.L.Chung, “Piezoresistivity in continuous carbon fiber polymer-matrix composite”, Polymer Composites, 21(1), (2000), 13-19.

[15] M.Kupke, K.Schulte, and R.Schüler, “Non-destructive testing of FEP by d.c. and a.c. electrical methods”, Composites Science and Technology, 61(6), (2001), 837-847.

[16] M.S.Dresselhaus, G.Dresselhaus, K.Sugihara, I.L. Spain, and H.A. Goldberg, Graphite Fibers and Filaments, (1988), 188-201, Springer-Verlag.

[17] TORAYCA T300 Data sheet, Technical data sheet No.CFA-001, Toray carbon fibers America, Inc.

[18] TORAYCA T400H Data sheet, Technical data sheet No.CFA-003, Toray carbon fibers America, Inc.

[19] TORAYCA T800H Data sheet, Technical data sheet No.CFA-007, Toray carbon fibers America, Inc.

第 6 章

電位差法及び電気抵抗変化法の同定精度比較

6.1.　緒　言

前章までに，電気抵抗変化法（Electric Resistance Change Method : ERCM）の問題点を解決する 2 段階同定電位差法（Two-Stage Electric Potential Change Method : TS-EPCM）及び非対称電流負荷電位差法（Asymmetrical Dual Charge Electric Potential Change Method : ADC-EPCM）を提案し，その有効性を実証した．電気抵抗変化法では 2 電極法を用いるために実験的には接触抵抗の影響を受けて同定精度が低下する可能性があることが問題であるが，ここでは接触抵抗を無視したモデルを用いた FEM 解析により，提案した電位差法と同定精度の比較を行うことで提案手法の有効性を再検討した．また，本手法では電極間隔が同定精度に強く影響を及ぼすと考えられる．電極間隔がそれぞれの方法でのはく離同定精度に与える影響についても検討した．更に，実機適用の際には，電磁波などのノイズや，測定誤差の影響を受けて測定値が変動することが考えられる．これらノイズに対する許容性についても検討を行い，それぞれの方法の特徴を明らかにした．

6.2.　試験片形状

2 段階同定電位差法，非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法のそれぞれの方法による同定精度を直接比較するために，図 6-1 に示すような電極間隔を 20mm とし，試験片片側表面に 9 個の電極を設置した積層板を用いて FEM 解析を行った．試験片全長は 180mm，厚さは 1mm であり，積層構成は$[0/90]_s$の直交積層板である．また，電極長さは 4mm である．2 段階同定電位差法では電極 A，E，I が電流電極，電極 B，C，D，F，G，H が電圧電極となる．また，非対称電流負荷電位差法では電極 BF 及び DH が電流電極，電極 A，C，E，G，I が電圧電極である．電気抵抗変化法での同定精度は電極数に依存するが，電極数が 7 個以上であれば精度良くはく離同定が可能であることが示されている[1-3]．

6.3. はく離同定方法

2 段階同定電位差法及び非対称電流負荷電位差法については，はく離同定方法は

それぞれ第 3.5.4 節及び第 4.4.節にて述べた方法と同様である. 応答曲面には全て 2 次多項式を用いた．電気抵抗変化法では，応答曲面の説明変数として，8 個の隣接電極間電気抵抗変化を初期抵抗で除した値を用いる．これは，電気抵抗変化法では一般的なひずみゲージと同様なブリッジ回路を用いて電気抵抗変化をひずみとして測定するためである(2)．電極間電気抵抗変化率の同時計測は電流干渉のために困難であるため，端部電極間から順番に通電し，ブリッジ回路を用いて 2 電極法にて電極間電気抵抗変化率を測定する. 算出した電極間電気抵抗変化率を規格化したものを応答曲面の説明変数とし，はく離の同定を行う．はく離位置の同定では説明変数は規格化電極間電気抵抗変化率であり, はく離寸法同定ではこれに規格化に用いたノルムを加えた．応答曲面には電位差法と同様に 2 次多項式を採用した.

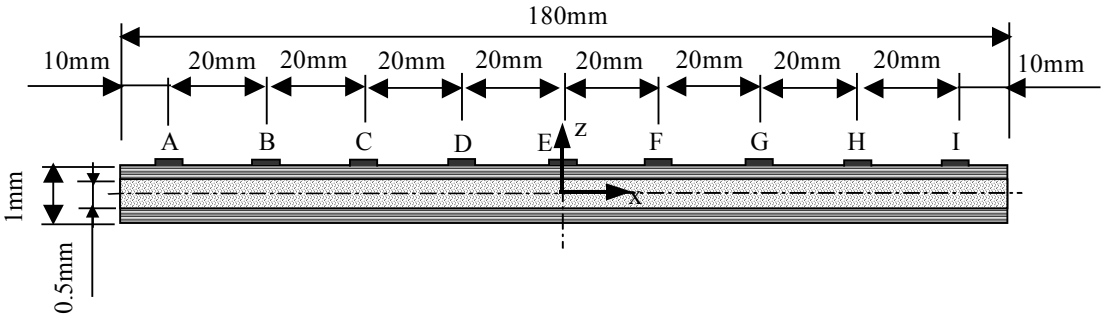


Fig.6-1 Configuration of specimen used for comparison of methods

6.4. はく離同定

6.4.1. 解析方法

汎用有限要素法ソフト ANSYS を用いて FEM 解析を行った．四角形四節点要素を用い，要素分割は x 方向を 0.25mm，z 方向を 0.0625mm とした．電極部では節点を結合して電位を等しくしている. はく離部では節点を二重に定義して要素分割を行い，はく離時に節点を分離して完全に電流が流れない状態を模擬している．解析に用いた導電率は第 5.6.節にて算出した等価導電率を用いた（表 6-1）.

Table 6-1 Electric conductivity σ

V_f [vol%]	σ_0	σ_{90}	σ_t [$m^{-1}\Omega^{-1}$]
65.5	32000	9.60	8.32

σ_0 : Electric conductivity of longitudinal direction
σ_{90} : Electric conductivity of transverse direction
σ_t : Electric conductivity of thickness direction which includes resin rich layer

6.4.2.　応答曲面作成

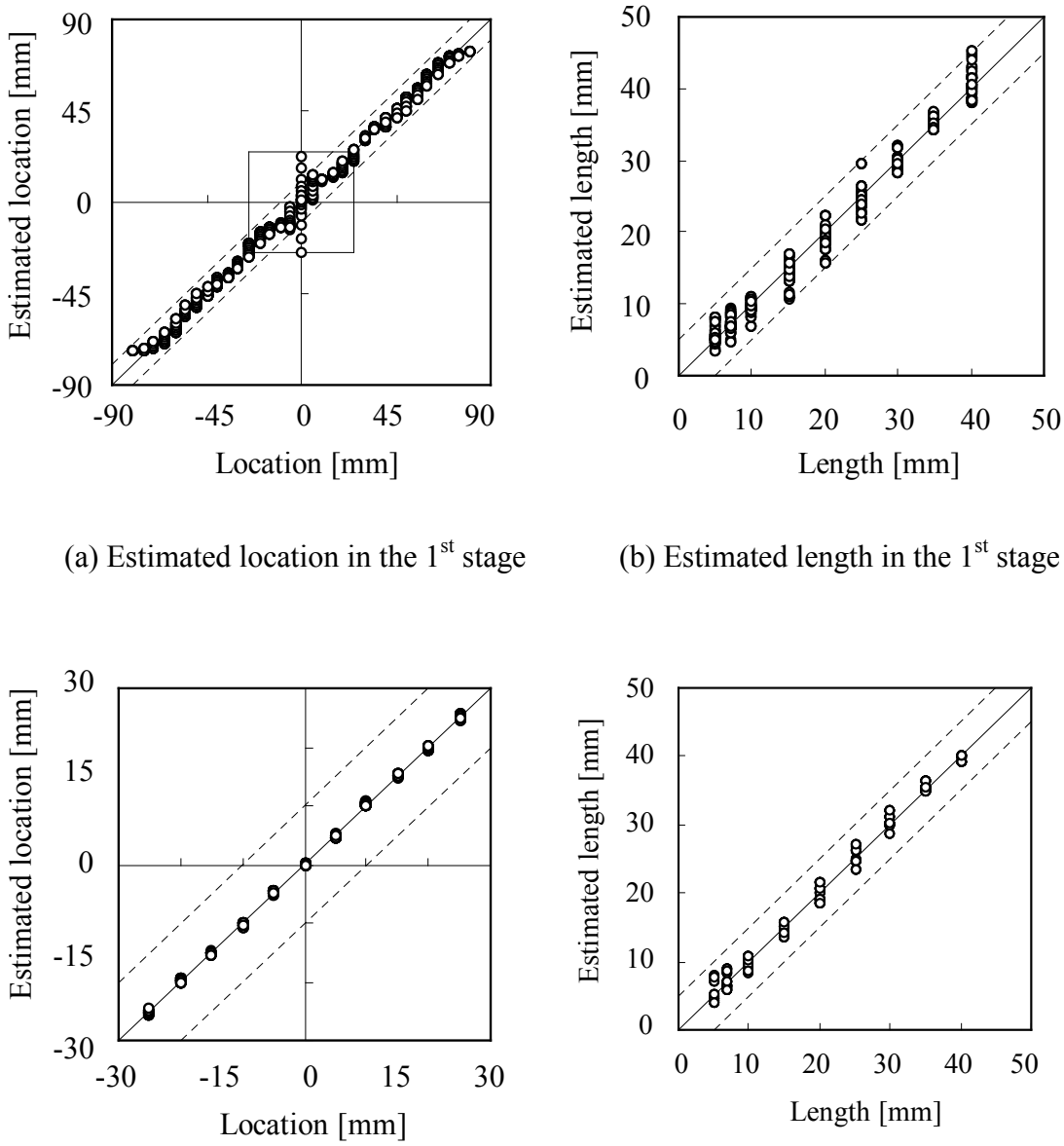
応答曲面作成のために FEM 解析で模擬するはく離形状はマトリックス割れのない直線状の層間はく離である．はく離寸法は 5, 10, 20, 30, 40mm の 5 通り，はく離位置は x=-80～80mm まで区間において 5mm 間隔の位置で作成し，FEM 解析を実施した．ただし，はく離寸法によっては端部に貫通したはく離が生じないように 5mm ずつ内側に設定している．はく離形状に対するロバスト性を評価するために，作成した応答曲面を用いて Z 型及び逆 Z 型のはく離同定を行った．また，応答曲面作成に使用していない，寸法が 7, 15, 25, 35mm の層間はく離，Z 型及び逆 Z 型のはく離についても同定を行い，内挿の同定精度評価も行った．応答曲面作成の際には，t 検定により回帰寄与の低い項は削除している（Appendix A 参照）．

6.4.3.　同定結果

2 段階同定電位差法，非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法の 3 種類の方法を用いて全てのはく離を同定した結果を図 6-2,6-3 及び 6-4 にそれぞれ示す．横軸がはく離位置または寸法であり，縦軸が推定したはく離位置または寸法である．対角線上のプロットが正確な同定を示す．はく離位置同定結果での破線は±10mm の誤差範囲を，はく離寸法同定結果では±5mm の誤差範囲を示している．また，2 段階同定電位差法では，1st stage でのはく離同定結果にて，電流電極間中央部にて最大 24mm の誤差を生じたため, ステージ切り替えのはく離位置を x=±25mm とした．従って，1st stage でのはく離位置同定結果（図 6-2a）にて，図中実線で囲まれた中央四角形内部領域 x= -25～25mm に存在するはく離は全て 2nd stage での同定を行った（図 6-2c,d）．1st stage でのはく離寸法同定結果(図 6-2b)では，はく離位置が

x= -80≤x<-25，25<x≤80mm に存在すると同定されたはく離のみをプロットしてあり，それ以外は表示していない．

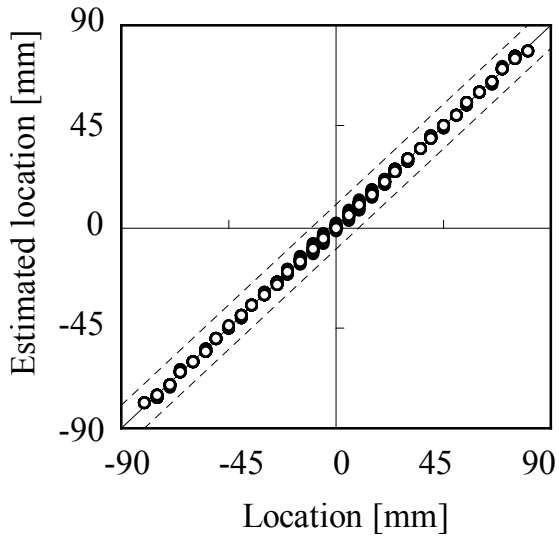
表 7-2 には, それぞれの方法について, 応答曲面の自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2, 位置及び寸法同定結果の平均誤差及び最大誤差を示す．なお，電極間隔を変えた場合についても記載してあるが，電極間隔の影響については次節にて述べる．



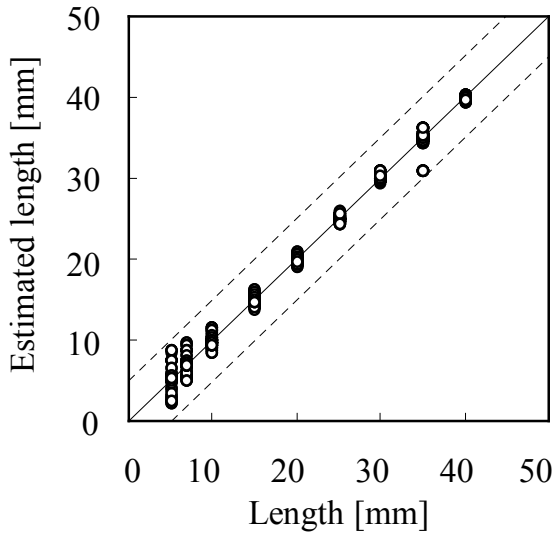
(a) Estimated location in the 1st stage　(b) Estimated length in the 1st stage

(c) Estimated location in the 2nd stage　(d) Estimated length in the 2nd stage

Fig. 6-2 Estimation results of TS-EPCM

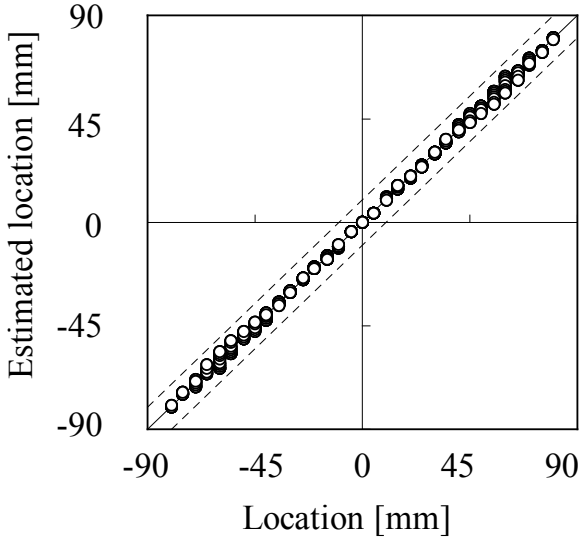


(a) Estimated location

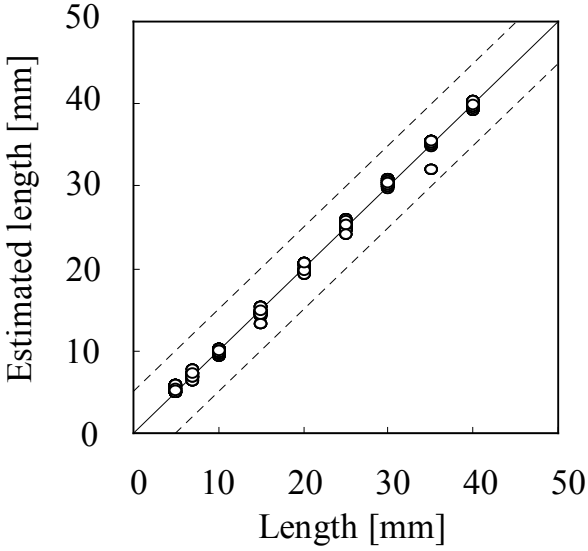


(b) Estimated length

Fig. 6-3 Estimation results of ADC-EPCM



(a) Estimated location



(b) Estimated length

Fig. 6-4 Estimation results of ERCM

2 段階同定電位差法の回帰精度，同定精度は他の方法と比較して全体的に若干低くなっている．非対称電流負荷電位差法と電気抵抗変化法では，位置同定誤差は非対称電流負荷電位差法が小さく，寸法同定誤差では電気抵抗変化法が小さい．しかし，その差異は非常に小さい．一般的には，目視不可能なはく離寸法は 5～10mm 程度であり，積層板の強度低下を導くはく離寸法も 5～10mm 以上であるため，この 5～10mm 程度のはく離を検出する必要があるが，どの方法でも十分に高精度である．

電極間隔が 20mm の場合には，提案した電位差法の同定精度は電気抵抗変化法とほぼ等しい．また，どの方法でも，はく離形状による影響をほとんど受けず，学習に用いていない寸法のはく離についても同定可能であり，内挿の同定精度も高い．

Table 6-2 Comparison of estimation results

Methods		Number of electric charge	Spacing between electrodes (Length of specimen)	R_{adj}^2		Location [mm]		Length [mm]	
				Location	Length	Mean error	Max error	Mean error	Max error
TS-EPCM	1st stage	1	20mm (180mm)	0.9956	0.9041	1.9	6.6	1.1	5.3
	2nd stage	1		0.9995	0.9910	0.2	0.7	0.8	3.1
ADC-EPCM		2	20mm (180mm)	0.9998	0.9993	0.4	2.3	0.5	4.0
			30mm (260mm)	0.9994	0.9961	1.6	11.6	0.6	3.3
			40mm (340mm)	0.9989	0.9950	2.8	20.5	0.7	3.4
			50mm (420mm)	0.9988	0.9943	3.9	36.3	0.7	3.7
			60mm (500mm)	0.9986	0.9942	5.4	56.0	0.8	7.5
ERCM		8	20mm (180mm)	0.9988	0.9985	0.9	4.1	0.4	3.0
			30mm (260mm)	0.9983	0.9943	1.8	9.7	0.6	2.9
			40mm (340mm)	0.9983	0.9746	2.6	11.9	1.4	8.1
			50mm (420mm)	0.9977	0.9282	4.0	19.1	2.4	14.3
			60mm (500mm)	0.9969	0.8727	6.0	25.0	3.3	19.7

6.5.　各手法の特徴及び電極間隔による同定精度の比較

6.5.1.　2 段階同定電位差法

2 段階同定電位差法では，1st stage でのはく離同定として電流を端部電極から他端部電極に負荷した状態で電極間電位差変化を同時測定する. はく離が電流電極間中央付近以外に存在する場合にはこの 1 回の電流負荷ではく離位置及び寸法が同定可能である．一方，1st stage にてはく離が電流電極間中央付近に存在すると判定された場合のみ，再度中央電流電極から電流を負荷し，2nd stage でのはく離同定を行う. このように, はく離位置によって最大で 2 回の電流負荷を行うことによって, 全ての位置ではく離形状に依存することなくはく離同定が可能となる．従って，2 段階同定電位差法では, はく離モニターという観点からは 1 回の電流負荷のみではく離の検出が可能となる方法である.

しかしながら，電流電極間中央付近では厚さ方向電流が大幅に減少するため，はく離発生場所がその付近に近づくほど生じる電位差変化は減少することから, 高精度な測定回路が必要となる．このため，はく離が電流電極間中央付近に存在するときには測定誤差の影響を受けやすい. 図 6-5 は電極間隔を 25mm に設定した場合の, 2 段階同定電位差法の 1st stage でのはく離位置同定結果を示す．はく離が電流電極間中央付近に存在する場合，位置同定の誤差が非常に大きくなっており，2 段階目領域の設定は不可能である. 図 6-6 は電極間隔が 20mm 及び 25mm のときの積層板内部電位分布を FEM によりそれぞれ算出した結果である．2 段階同定電位差法では，各隣接電極間隔の拡大は，電流電極間隔の大幅な拡大となる．従って，電流電極間距離の大幅な拡大により, その中央付近ではほとんどの電流が試験片長手方向にしか流れないため，はく離が厚さ方向電流を妨げる影響が減少する．これによりはく離形状に起因した微小な影響が規格化により増大されるために, 誤同定を生じる．1st stage でのはく離位置同定において大きく誤同定することから 2 段階目領域の推定が困難であるため，2 段階同定電位差法ではこれ以上の電極間隔の拡大は困難である.

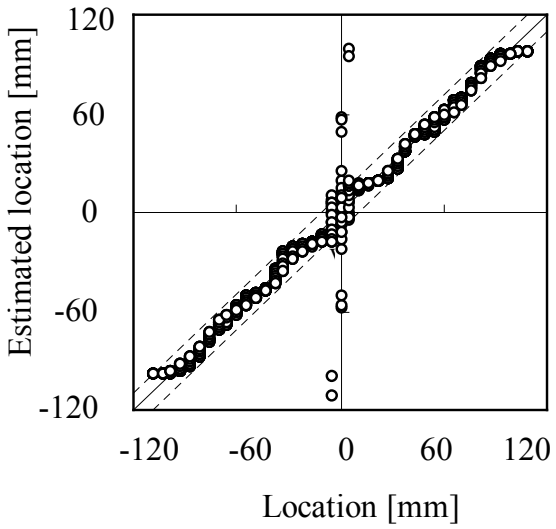
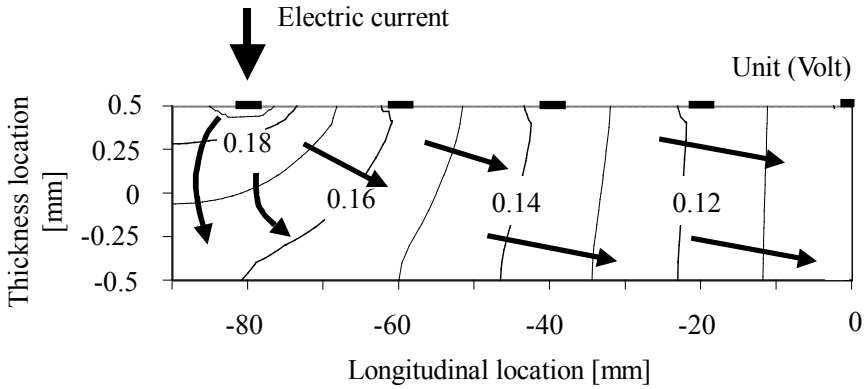
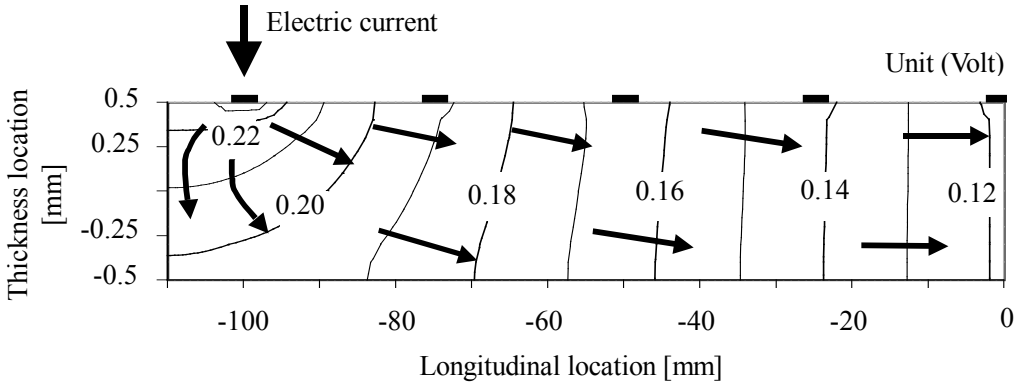


Fig. 6-5 Estimated location by TS-EPCM with 25mm spacing between electrodes



(a) Spacing between electrodes are 20mm



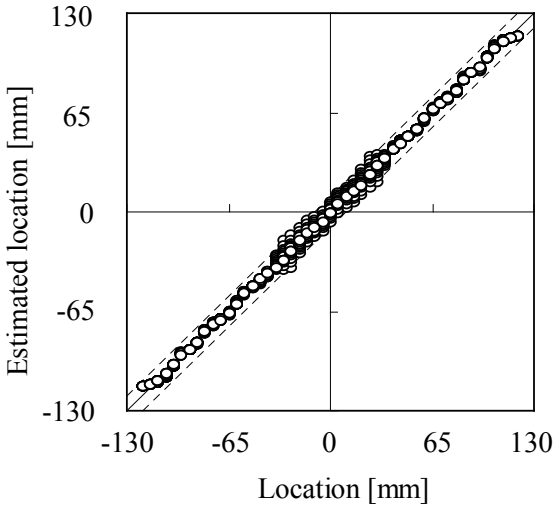
(b) Spacing between electrodes are 25mm

Fig. 6-6 Contour plot of electric potential by TS-EPCM

6.5.2.　非対称電流負荷電位差法

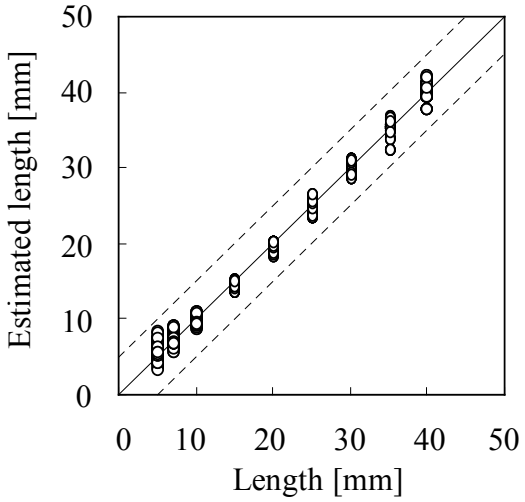
非対称電流負荷電位差法では, 電流電極を非対称に作成して電流を互い違いに負荷することによって, 厚さ方位電流密度の低下する部分での情報量低下をそれぞれ補った. この方法では常に 2 回の電流負荷を必要とするが, 電流電極間中央付近での同定精度低下を導かずに高精度なはく離同定が可能となった.

図 6-7 及び表 6-2 には電極間隔を 30，40，50，60mm とした場合のはく離の同定結果を示す. 電極間隔の拡大に伴い，平均誤差及び最大誤差は増加するが，2 段階同定電位差法のようにはく離形状に起因して，急激に誤同定することはない. 従って, 検出すべきはく離寸法目標に対して, 電極間隔を任意に設定することができる.



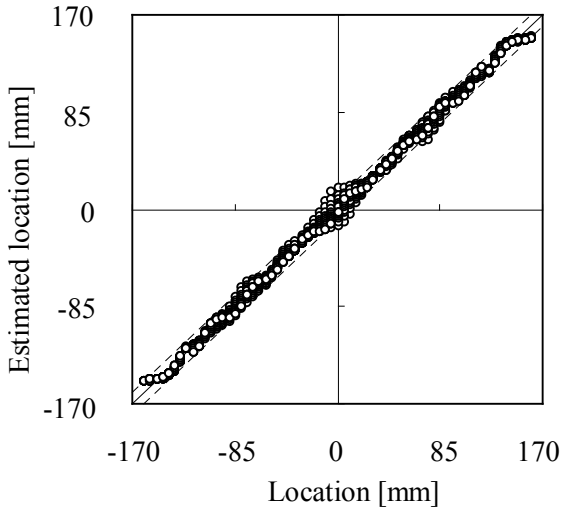
(a) Estimated location

(Spacing between electrodes is 30mm)



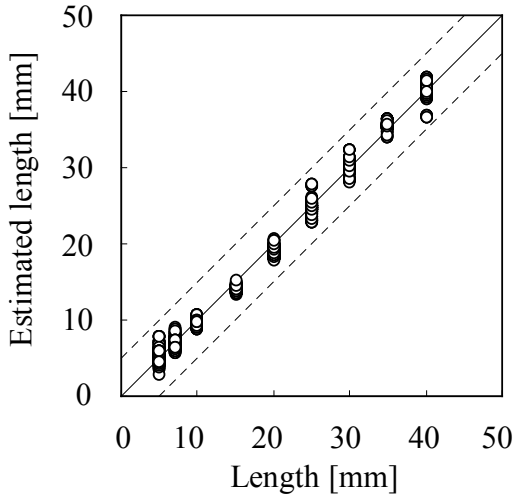
(b) Estimated length

(Spacing between electrodes is 30mm)



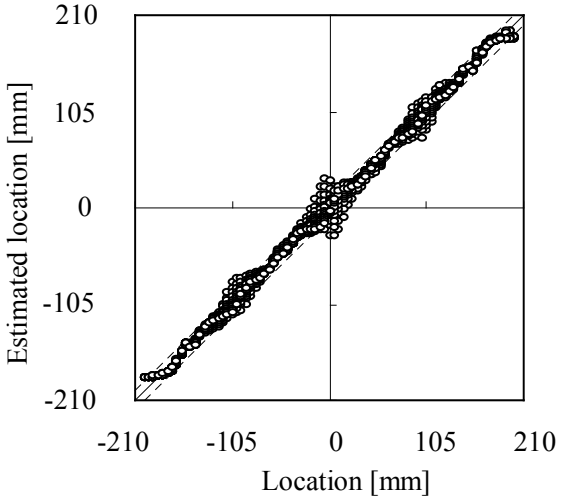
(c) Estimated location

(Spacing between electrodes is 40mm)



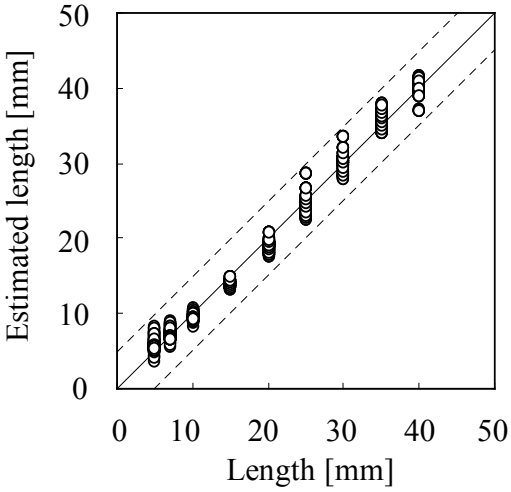
(d) Estimated length

(Spacing between electrodes is 40mm)



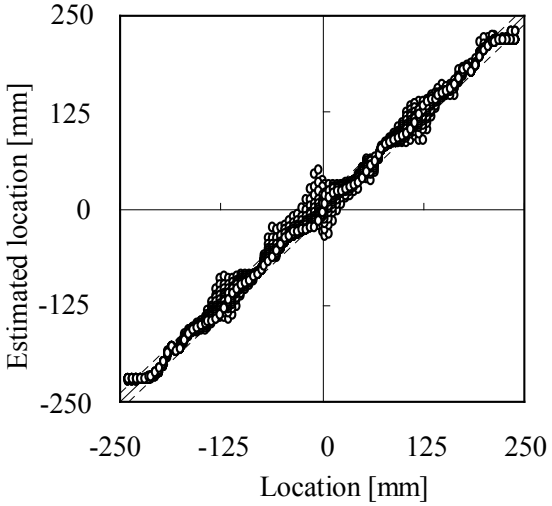
(e) Estimated location

(Spacing between electrodes is 50mm)



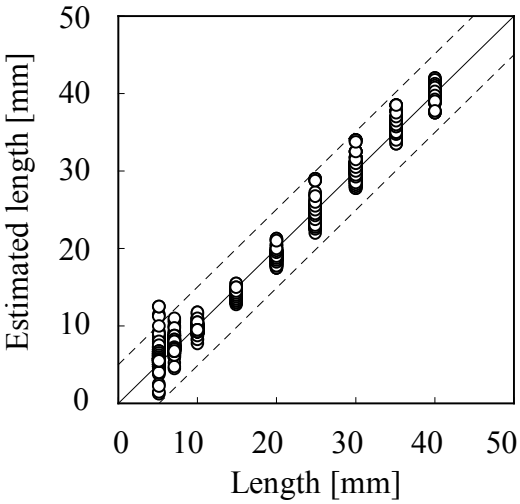
(f) Estimated length

(Spacing between electrodes is 50mm)



(g) Estimated location

(Spacing between electrodes is 60mm)



(h) Estimated length

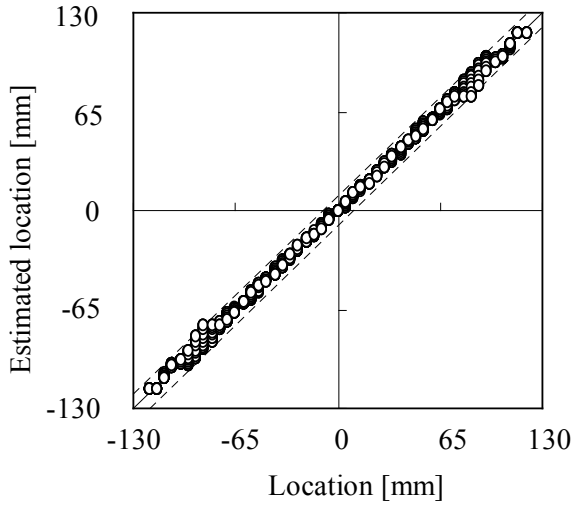
(Spacing between electrodes is 60mm)

Fig. 6-7 Estimation results by ADC-EPCM with various spacing between electrodes

6.5.3.　電気抵抗変化法

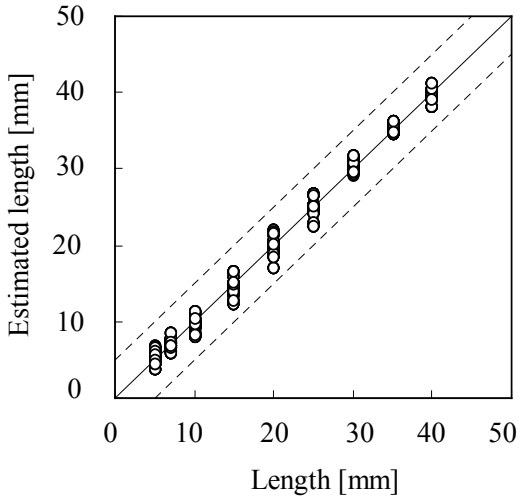
電気抵抗変化法では, 電流干渉による影響を避けるために順次切り替えて全隣接電極間通電時の電極間電気抵抗変化率を測定する必要があるためにシステムが複雑になる．また，電流負荷回数が多いために測定時間も長い．更に，2 電極法による接触抵抗の影響を受けて誤同定する可能性も有している．しかしながら，はく離形状の差異による影響を受けにくく(4)，同定精度も高いことが示されている(3).

図 6-8 及び表 6-2 には電極間隔を 30，40，50，60mm とした場合のはく離の同定結果を示す．非対称電流負荷電位差法と同様に，電極間隔の拡大に伴って同定精度は低下しているが，2 段階同定電位差法のように急激に誤同定することはない．電気抵抗変化法も, 検出すべきはく離寸法目標に対して電極間隔を任意に設定することができる．また，Z 型及び逆 Z 型のはく離の同定誤差は直線状の層間はく離に対する同定誤差とほぼ同じであり，はく離形状による誤差はほとんど受けていない.



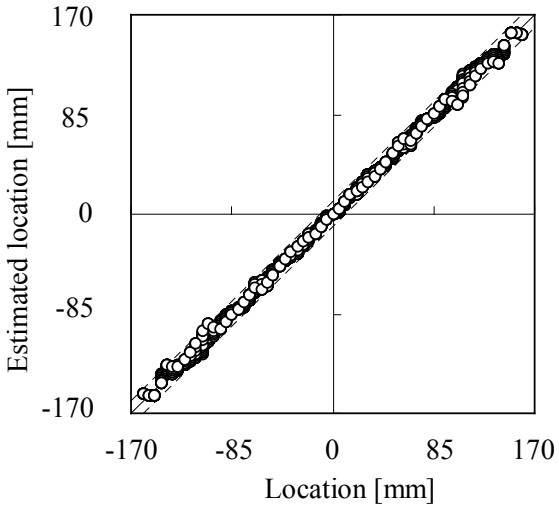
(a) Estimated location

(Spacing between electrodes is 30mm)



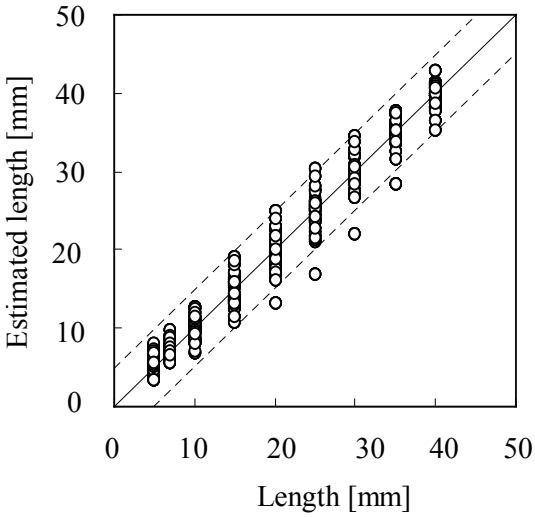
(b) Estimated length

(Spacing between electrodes is 30mm)



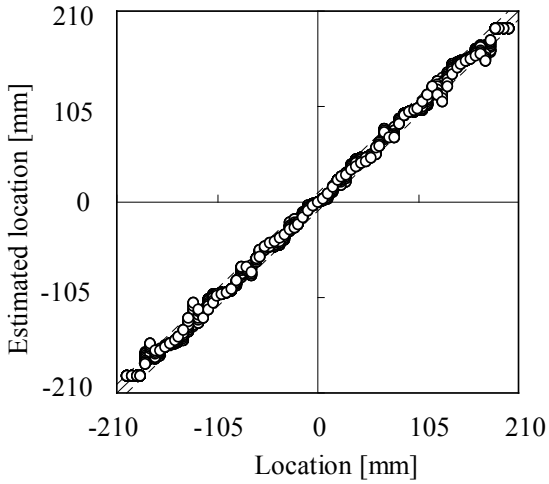
(c) Estimated location

(Spacing between electrodes is 40mm)



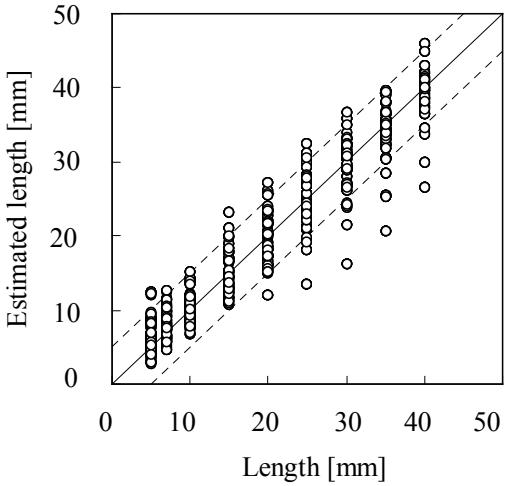
(d) Estimated length

(Spacing between electrodes is 40mm)



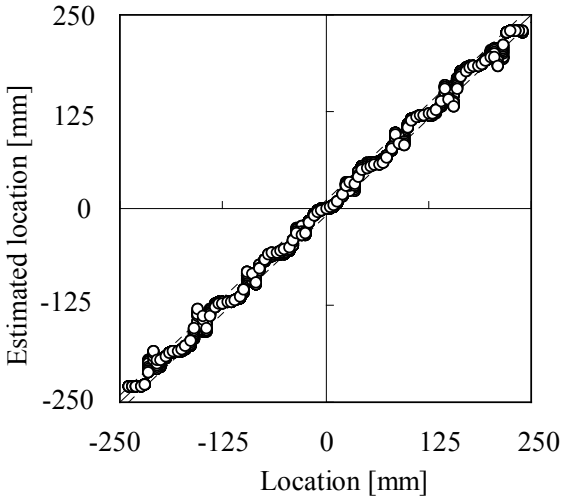
(e) Estimated location

(Spacing between electrodes is 50mm)



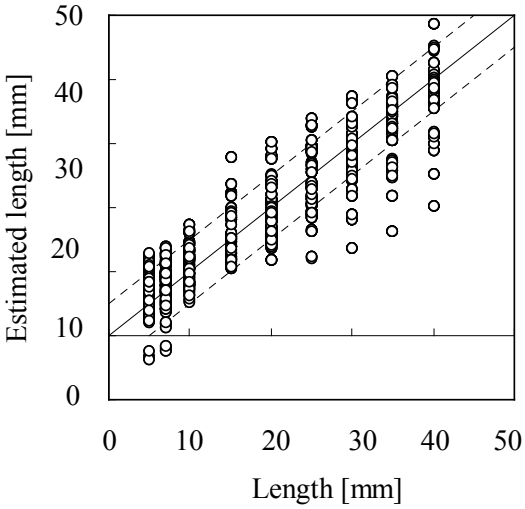
(f) Estimated length

(Spacing between electrodes is 50mm)



(g) Estimated location

(Spacing between electrodes is 60mm)



(f) Estimated length

(Spacing between electrodes is 60mm)

Fig. 6-8 Estimation results by ERCM with various spacing between electrodes

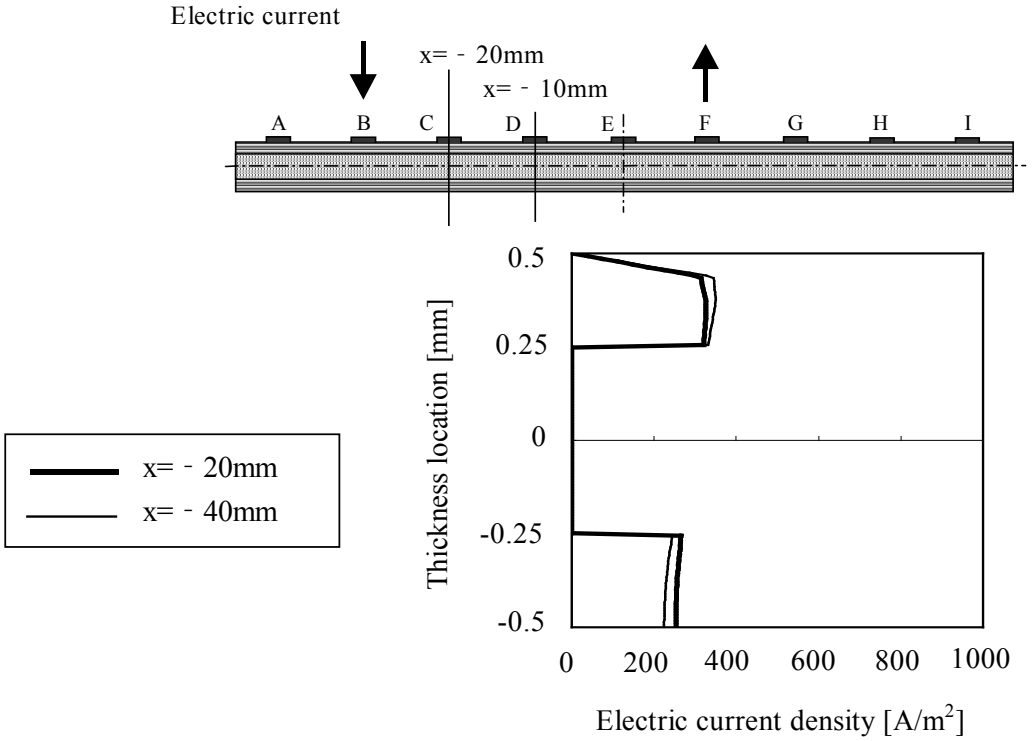
6.5.4.　電極間隔の影響

次に，電極間隔がそれぞれの同定方法に与える影響について，CFRP 積層板内部での電流経路から検討する．2 段階同定電位差法では，各隣接電極間隔の拡大が電流電極の大幅な拡大につながり，2 段階目領域の推定が不可能となり，はく離同定が困難となった．従って，以降では非対称電流負荷電位差法と電気抵抗変化法においての電極間隔の影響を検討する．

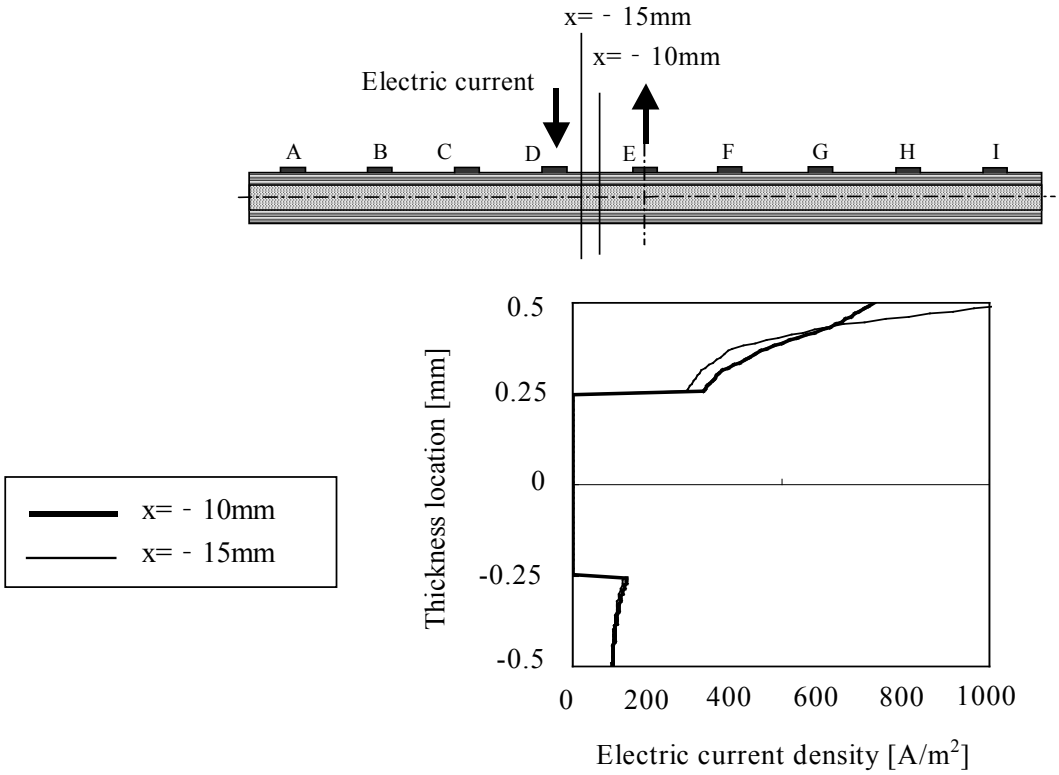
図 6-9 はそれぞれ，試験片 Fig. 6-1 において(a)電流を電極 B から F に負荷した場合，(b)電流を電極 D から E に負荷した場合の電流電極間中央及び 1/4 の距離における x 方向電流密度分布を示す．図 6-9a は非対称電流負荷電位法での場合であるが, 電流電極間隔が広いために電流電極間中央付近では電極反対側 0º層を流れる電流が多い．一方，電気抵抗変化法の場合の図 6-9b では電流電極間隔が狭いために電極反対側 0º層に流れる電流が少なく, 多くの電流は電極側の表面層を流れている．

また，図 6-10 は電極側層間部(z=0.25mm)での厚さ方向電流密度分布である．電流密度の最大値は，電流電極間隔が広い非対称電流負荷電位差法の場合(Fig.6-10a)には 2.13[S/m^2]であり，電流電極間隔が狭い電気抵抗変化法の場合(Fig.6-10b)では 1.46[S/m^2]である．電流電極間隔が広い方が電流電極部直下での最大厚さ方向電流密度が高くなっている．

電位差法及び電気抵抗変化法では, はく離が厚さ方向電流を妨げることによる積層板内部での電位変化からはく離を同定する．従って，厚さ方向電流量が多いほど同定精度も向上すると考えられる．電流電極間隔が広い場合，厚さ方向電流密度は高く，また，電極反対側層間を流れる電流量も増加する．一方，電流電極間隔が狭い場合には，負荷電流の大半が電極側表面 0º層を流れ，電極反対側 0º層まで到達する電流量が少なくなるために負荷電流を効率良く利用していないと考えられる．

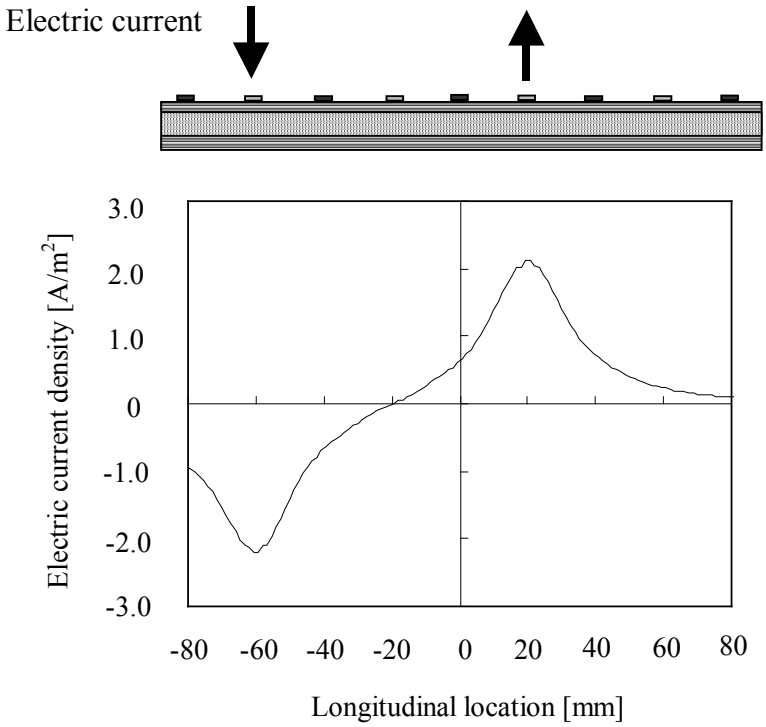


(a) Spacing between current electrodes is 80mm

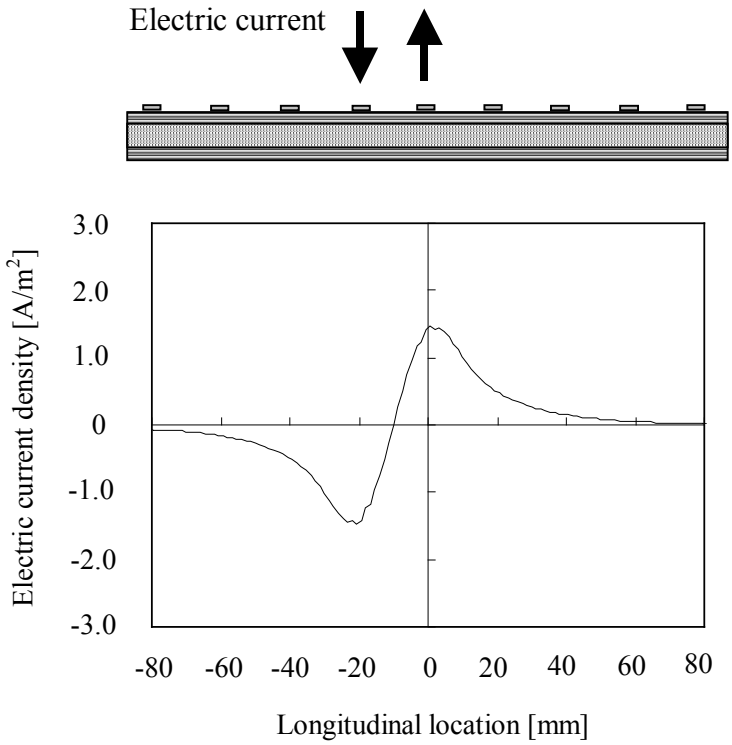


(b) Spacing between current electrodes is 20mm

Fig. 6-9 Electric current density to the longitudinal direction



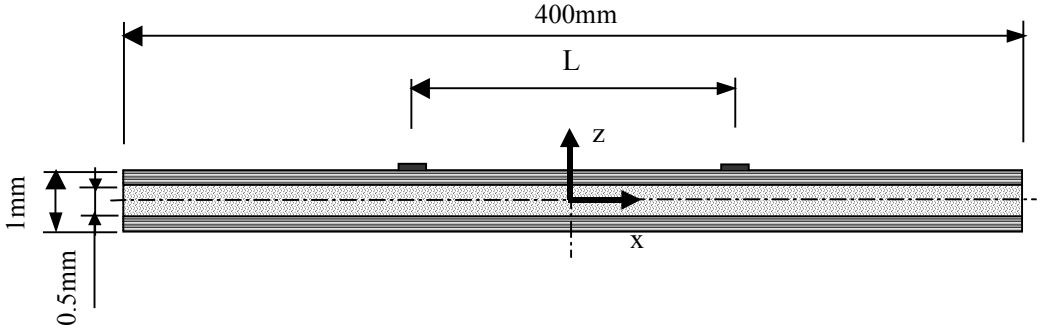
(a) Current electrodes are B and F (ADC-EPCM)



(b) Current electrodes are D and E (ERCM)

Fig. 6-10 Electric current density to the thickness direction at z=0.25mm

次に，電極間隔と厚さ方向電流量の関係を調べるために，図 6-11 に示す専用の試験片を考える．全長は 400mm であり，一対の電流電極（電極長さ 4mm）を試験片表面に作成してある．この電流電極間隔を 20mm から 340mm まで 20mm 間隔で作成し，試験片内部の電流密度を FEM 解析により算出した．図 6-12 は，以後の説明に使用する位置をわかりやすくするために示した．黒で示した電極が図 6-11 で示した電流電極であり，灰色で示した電極は仮想的に示した電極であり，実際の解析モデルには設置していない．これは，非対称電流負荷電位差法においては電流電極間に 3 個の電極があることを示しており，非対称電流負荷電位差法における電流の流れを分かりやすくするためである．



L=20 to 340mm

Fig. 6-11 Specimen for investigating the electric current density in CFRP laminate

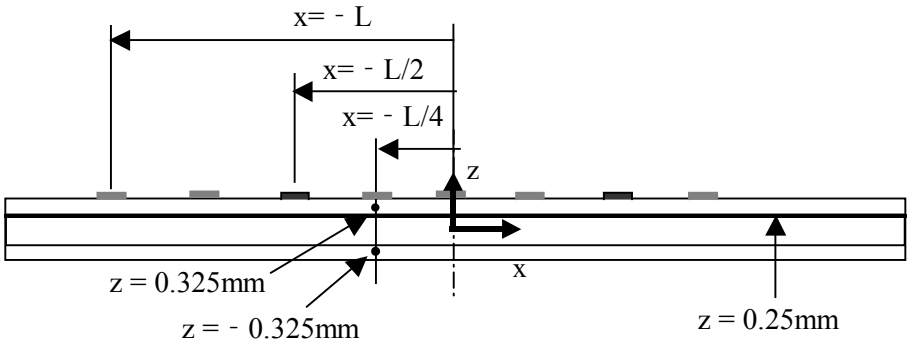


Fig. 6-12 Detailed positions of Fig. 6-11

図 6-13 は，電流電極間隔が 20, 30, 40，及び 80, 120, 160mm の場合の，電流電極間中央(x=0mm)及び x= -L/4mm（図 6-12 参照）の位置での x 方向電流密度分布である．図 6-13 の(a)～(c)までが表 6-2 で示した電気抵抗変化法における電極間隔が 20, 30, 40mm の場合の隣接電極間通電時の電流密度分布であり，(d)～(f)までが非対称電流負荷電位差法における電極間隔（電流電極間隔ではない）が 20, 30, 40mm の場合の電流密度分布となる．電気抵抗変化法の場合には電極間隔が狭いため，電流は電極側 0º層を主に流れる．一方，非対称電流負荷電位差法では電流電極間隔が広いため，ほぼ半分の量の電流が電極反対側 0º層内を流れている．

図 6-14 は，電流電極間隔を変化させた場合の，電流電極間中央(x=0mm)における上下 0º層中間点(z=±0.375mm)での x 方向電流密度である．横軸が電流電極間隔，縦軸が電流密度である．電流電極間隔が 100mm 程度以上になると，電流電極間中央では上下 0º層を流れる電流量がほぼ等しくなっている．本問題においては理論的には最大で負荷電流のほぼ半分が電極反対側 0º層へ流れる．負荷した電流を有効に使うためには，すなわち，厚さ方向に流れる電流を増やして負荷電流の約半分を電極反対側 0º層まで到達させるためには電流電極間隔は 100mm 程度以上あることが望ましい．

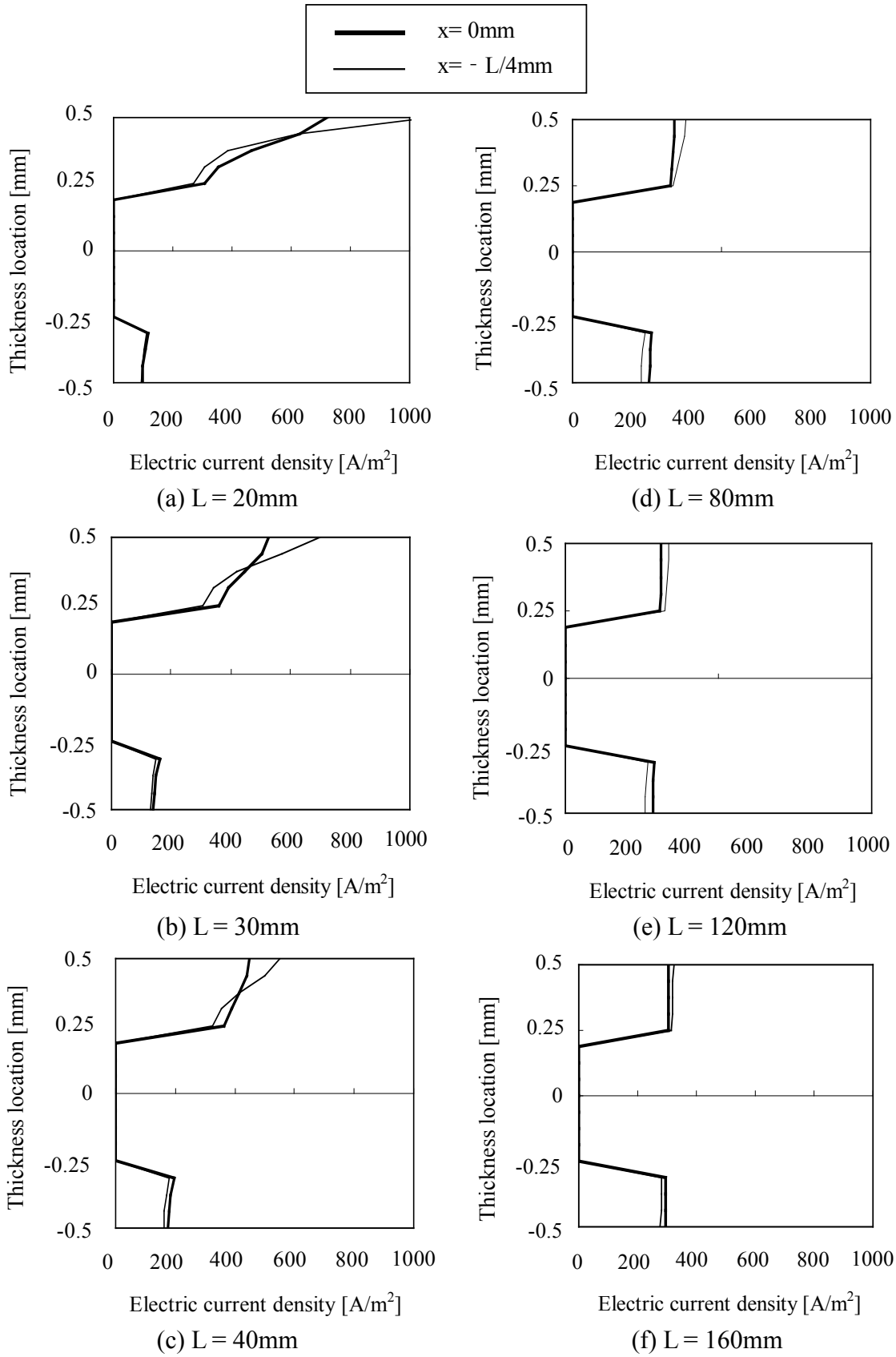


Fig. 6-13 Electric current density to the longitudinal direction at x=0 and L/4mm

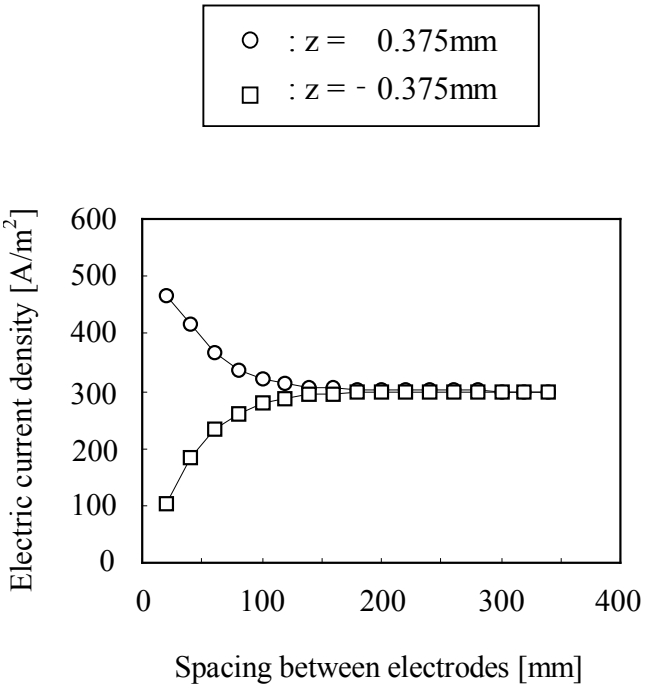
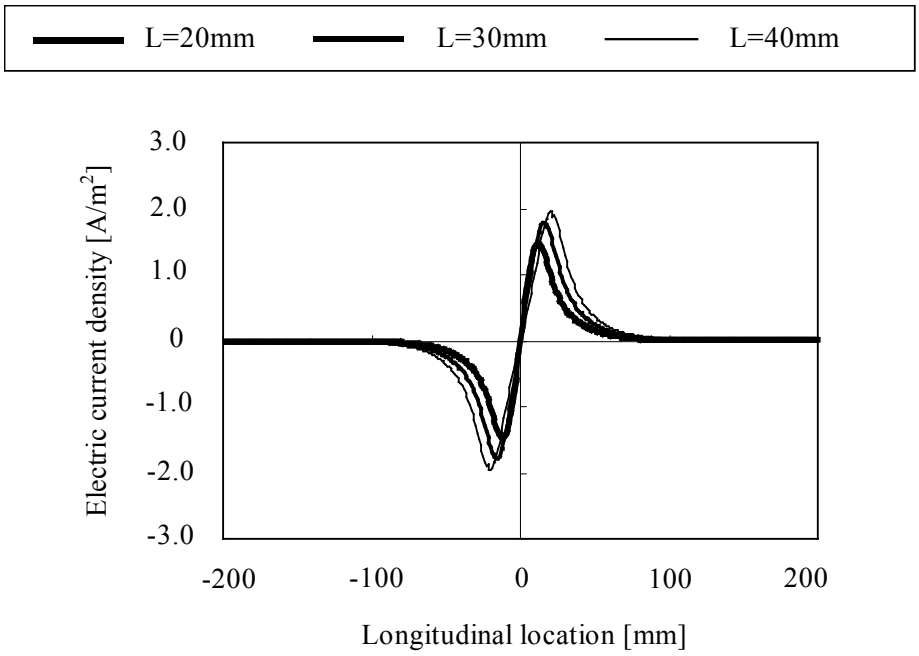


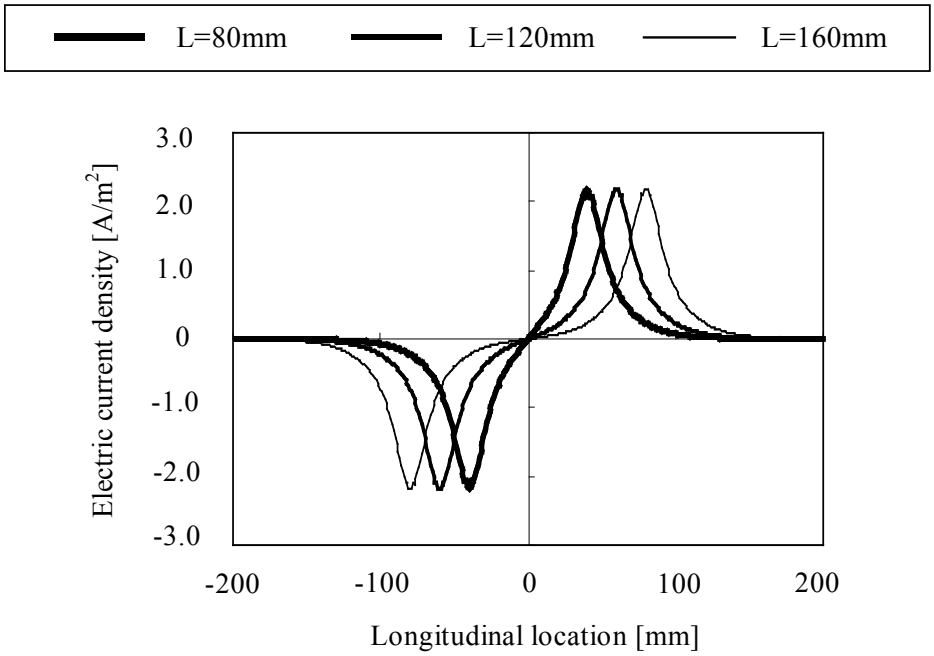
Fig. 6-14 Electric current density to the longitudinal direction at x=0mm

図 6-15 は電極間隔が 20, 30, 40，及び 80, 120, 160mm の場合の電極側層間（z=0.25mm）での厚さ方向電流密度分布である．電流電極間隔が広い場合，電流電極部での最大厚さ方向電流密度は増加する．また，電流電極間隔が狭い場合（図 6-15a）と比較すると，厚さ方向電流密度は全体的に高く，裾野が広がっている．

図 6-16 は電流電極間隔を変化させた場合の，電極側層間(z=0.25mm)での x= -L/2mm 及び-L/4mm における厚さ方向電流密度を示す．厚さ方向電流密度の最大値は電流電極部直下であるが，その大きさは電流電極間隔が 100mm 程度までは増加し，それ以上ではほぼ一定となる．一方，x= -L/4mm の位置での厚さ方向電流密度は，電極間隔の増加に伴って L も増加するために減少している．非対称電流負荷電位差法の場合，はく離検知のためにはこの位置，すなわち，電流電極に隣接する電圧電極位置までの厚さ方向電流を高く保つ必要がある．従って，非対称電流負荷電位差法では隣接電極部位置でも十分に厚さ方向電流が生じるように電極間隔を設定する必要がある．



(a) Electric current densities by ERCM



(b) Electric current densities by ADC-EPCM

Fig. 6-15 Electric current density to the thickness direction at z=0.25mm

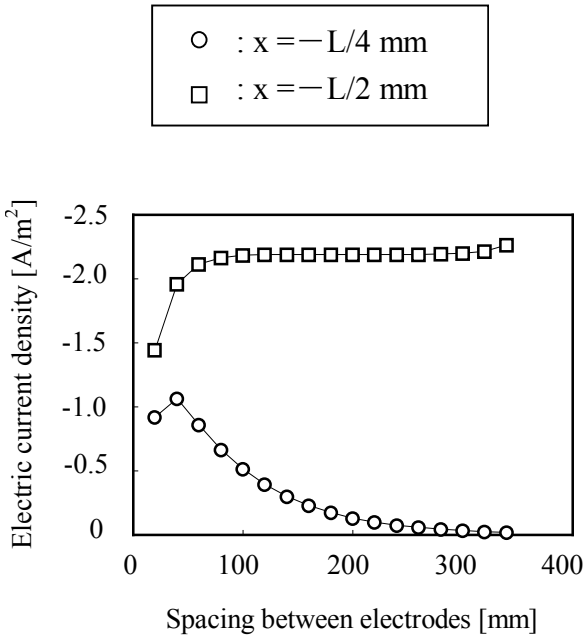


Fig. 6-16 Electric current density to the thickness direction at z=0.25mm

電流電極間隔を 100mm 程度以上にすることで，負荷電流の約半分が電極反対側 0º層まで到達するようになり，また，電流電極部での最大厚さ方向電流を高めることができた．非対称電流負荷電位差法では，電流電極に隣接する電圧電極位置までの厚さ方向電流が高ければよいが，電気抵抗変化法では電流負荷経路の違いから，はく離を検知するためには電流電極間中央付近においても厚さ方向電流を高く保つ必要がある．

図 6-17 は，図 6-11 に示した積層板の-30≤x≤30mm の範囲での内部電位分布である．電流電極間隔は 20mm としてある．図中灰色で示した電極は実際には解析モデルには含まれていないが，隣接する電極位置を示している．

電気抵抗変化法でも同様に，電流電極間中央にて厚さ方向電流が消滅する．寸法の小さいはく離がこの部分に生じた場合には，この通電経路ではは く離を検出することができない．しかしながら，CFRP の強い電気的異方性のために生じる迂回電流によって，隣接電極間に電流を負荷した場合にも上記の部分で厚さ方向電流が生じることによりはく離検知が可能となる（図中 x=20mm での厚さ方向電流の存在）．

例えば，図 6-1 の試験片において，電極 DE の中央に 5mm 程度のはく離が生じた場合，電極 DE 間での電気抵抗変化率よりも，電極 CD 及び EF 間での電気抵抗変化率の方が大きくなる（次節，図 6-24 参照）．従って，電気抵抗変化法では，電流電極間中央に存在するはく離は, 隣接電極間通電時にその部分に生じる厚さ方向電流電流によってはく離を検知している．

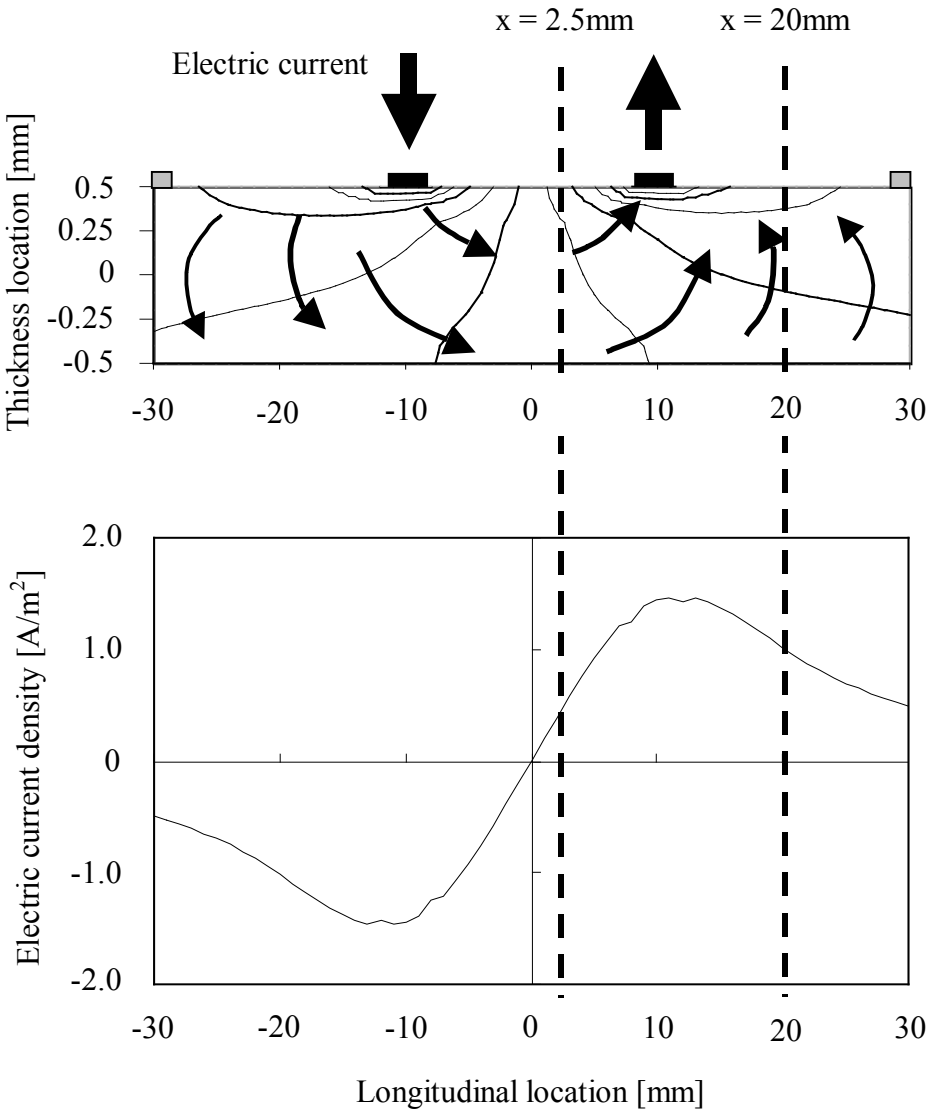


Fig. 6-17 Electric current density to the thickness direction around the current electrodes

図 6-18 に電流電極間隔を変化させた場合の，非対称電流負荷電位差法と電気抵抗変化法でそれぞれはく離検知のために十分な厚さ方向電流が必要な位置での厚さ方向電流密度を示す．非対称電流負荷電位差法では，電流電極に隣接する電極位置での厚さ方向を高く保つ必要があるため，隣接電極位置 x= -L/4mm，一方，電気抵抗変化法では，電極間中央での厚さ方向電流を高く保つ必要があり，5mm のはく離を検知することを考慮し，x= -2.5mm での厚さ方向電流密度を示した．また，上述の通り，電気抵抗変化法では隣接電極間通電時にも迂回電流が生じるため，隣接電極位置 x= -L mm での厚さ方向電流密度も示した．両方法にて，それぞれの位置において十分な厚さ方向電流が生じていれば，はく離同定が可能であることになる．ここで，図中の非対称電流負荷電位差法（x=-L/4mm の位置での電流密度）での電極間隔は，電流電極間隔の 4 分の 1 の長さ，すなわち隣接電極間隔の長さとしている．これは，隣接電極間隔を電気抵抗変化法と等しくした場合に生じる厚さ方向電流を比較するためである．

電気抵抗変化法では，電流電極間中央付近での厚さ方向電流より，隣接電極間通電時の迂回電流によって生じる厚さ方向電流密度の方が高い．この厚さ方向電流密度を等しくするためには，非対称電流負荷電位差法は電気抵抗変化法の電極間隔の約半分にしなければならない．すなわち，厚さ方向電流密度の比較からは，電気抵抗変化法は非対称電流負荷電位差法よりも電極間隔を約 2 倍程度に拡大することが可能である．

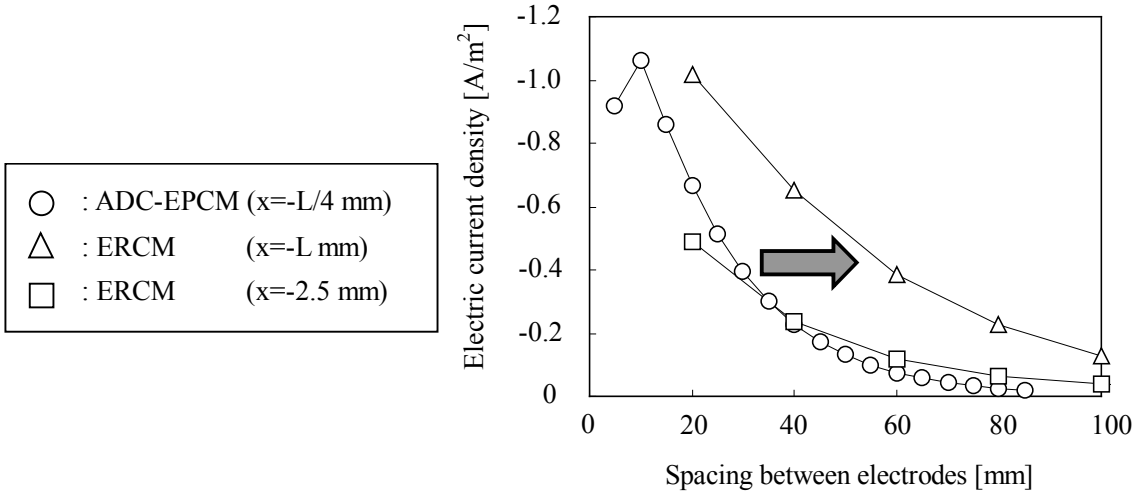


Fig. 6-18 Comparison of electric current density to the thickness direction by ADC-EPCM and ERCM

6.6.　ノイズによる影響

実機構造では測定装置，電源や他の外部装置などからの電磁波によるノイズや，はく離面での局所導通の影響などの実験誤差を受けて測定値が変動することが考えられる．ここでは，このような測定誤差が各手法の同定精度に与える影響について考察を行う．

2 段階同定電位差法，非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法のそれぞれの方法に対し，FEM 解析よりマトリックス割れのない直線状の層間はく離に起因した学習データを算出し，応答曲面を作成した．はく離寸法は 5, 10, 20, 30, 40mm の 5 通り，はく離位置は端部に貫通したはく離が生じないように端部電極から他端部電極位置までの範囲に 5mm 間隔で作成した．応答曲面作成には，規格化電極間電位差変化及び電気抵抗変化率に対しては最大値 1 の 10%の誤差を, ノルムには自身の 10%の誤差を乱数により作成し, 上記データに足し合わせることによって得られる擬似的に誤差を含めたデータも用いた．この方法により，作成される応答曲面の回帰精度は低下するが, 測定値の多少の変動を許容する応答曲面を作成することができる．なお，応答曲面作成の際には，　t 検定により回帰寄与の低い項は削除し，自由度調整済み決定係数が最大になるようにした（Appendix A 参照）.

次に，直線状の層間はく離を用い，寸法が 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40mm の場合の電極間電位差変化及び電気抵抗変化率を算出した. 非対称電流負荷電位差法において電極間隔を 20mm とした場合，5mm のはく離発生に伴う電極間電位差変化の最大値は 4.32×10^{-4}[V]であった．この値の 10%を誤差の最大値として，乱数により誤差を作成し, 上記電位差変化に足し合わせることによって得られる擬似的に誤差を含めたデータを同定することで, それぞれの方法においてノイズ誤差が同定精度に与える影響について検討した.

図 6-19 は, 2 段階同定電位差法を用いて誤差を含んだデータを同定した結果を示す．はく離が電流電極間中央付近に存在する場合に大きな誤同定を生じている．寸法同定結果は, 位置同定誤差が大きく 2 段階目領域内の判定ができないために示していない.

図 6-20 は，非対称電流負荷電位差法での同定結果を示す．電極間隔が 20mm の場合の同定結果を図 6-20a, b に，30mm の場合を図 6-20c, d に，40mm の場合を図

6-20e, f に，50mm の場合を図 6-20g, h にそれぞれ示す．電極間隔が拡大するにつれて，同定誤差は全体的に大きくなっている．

図 6-21 は電気抵抗変化法での同定結果である．電極間隔が 20mm の場合を図 6-21a, b に，30mm の場合を図 6-21c, d に，40mm の場合を図 6-21e, f に，50mm の場合を図 6-21g, h にそれぞれ示す．非対称電流負荷電位差法の場合と同様に，電極間距離の拡大に伴い同定誤差が拡大している．しかしながら，はく離位置の同定誤差は非対称電流負荷電位差法とは異なり，周期的な変動をしている．また，電極間隔が広いほどその振幅は大きい．このように，ノイズが同定精度に及ぼす影響はそれぞれの方法によって大きく異なっている．

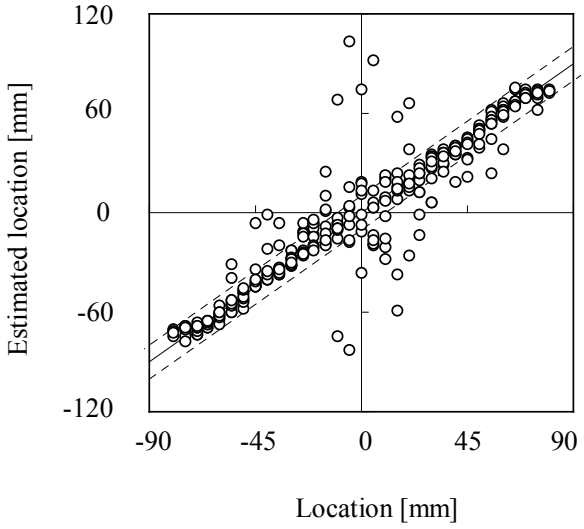
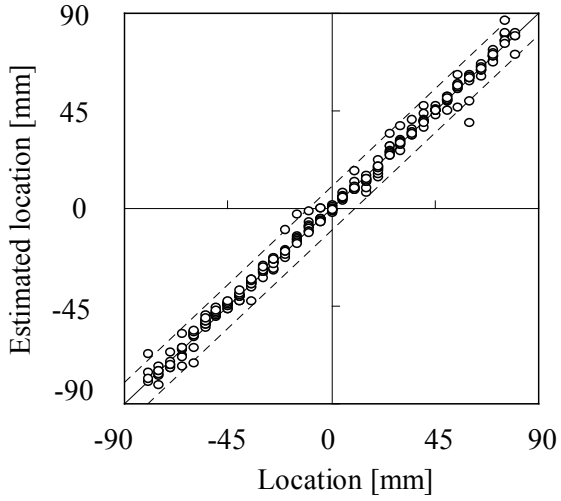
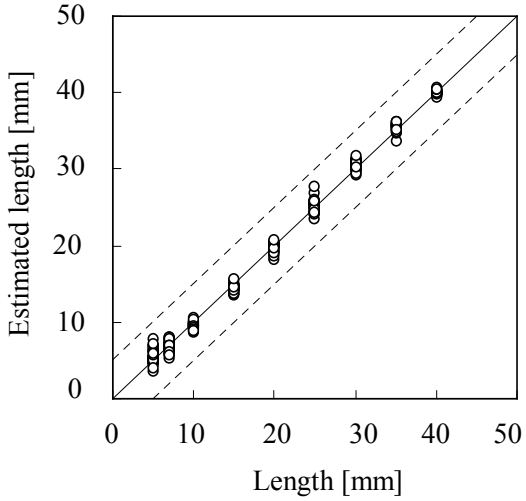


Fig. 6-19 Estimated location of error-included data by TS-EPCM



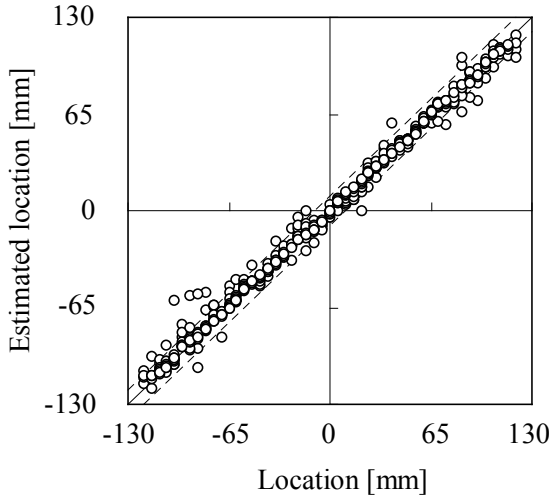
(a) Estimated location

(Spacing between electrodes is 20mm)



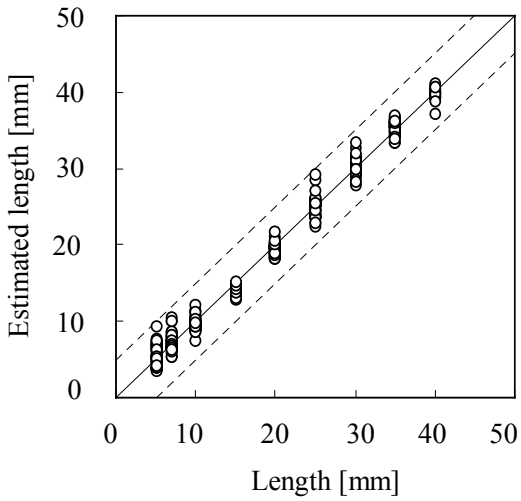
(b) Estimated length

(Spacing between electrodes is 20mm)



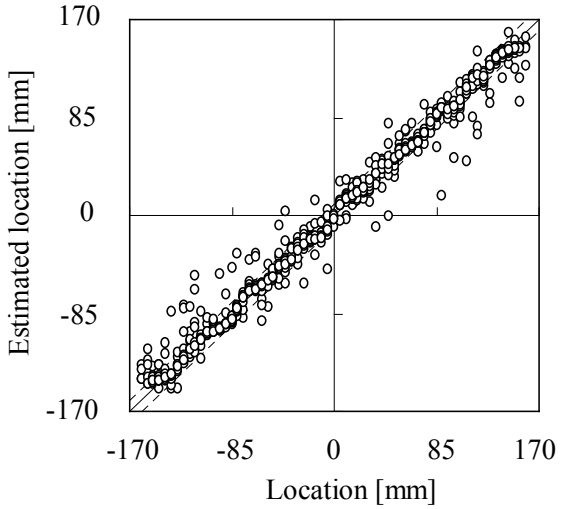
(c) Estimated location

(Spacing between electrodes is 30mm)



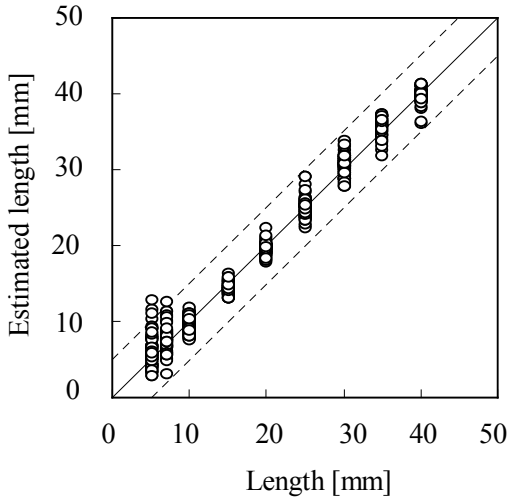
(d) Estimated length

(Spacing between electrodes is 30mm)



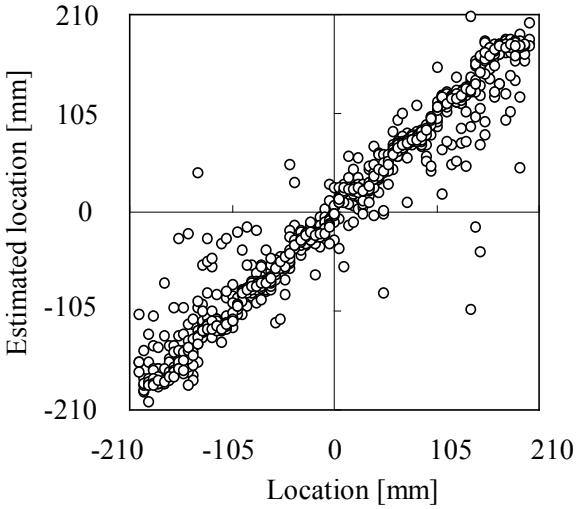
(e) Estimated location

(Spacing between electrodes is 40mm)



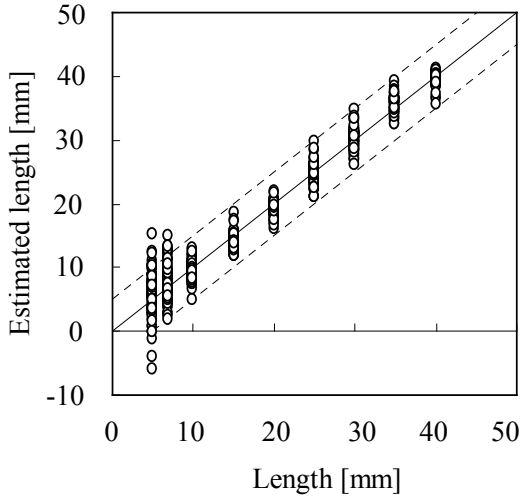
(f) Estimated length

(Spacing between electrodes is 40mm)



(g) Estimated location

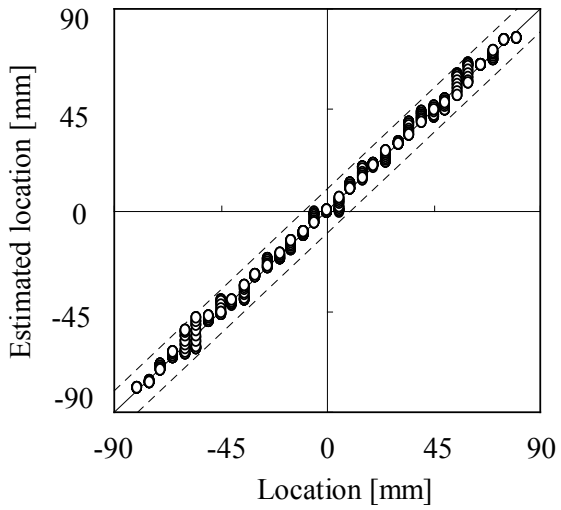
(Spacing between electrodes is 50mm)



(h) Estimated length

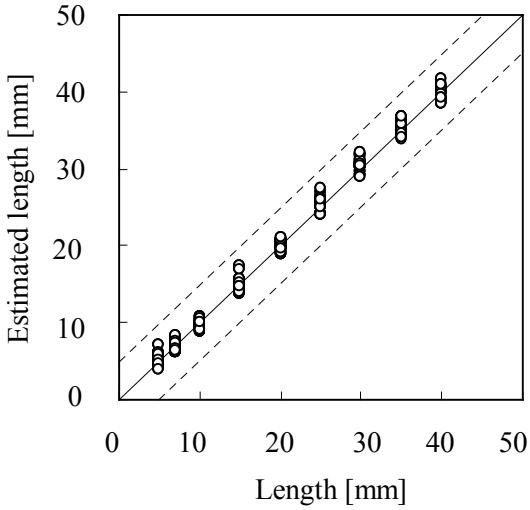
(Spacing between electrodes is 50mm)

Fig. 6-20 Estimation results of error-included data by ADC-EPCM



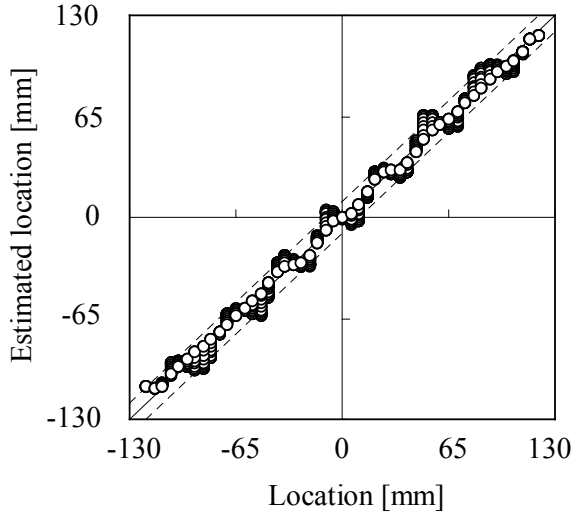
(a) Estimated location

(Spacing between electrodes is 20mm)



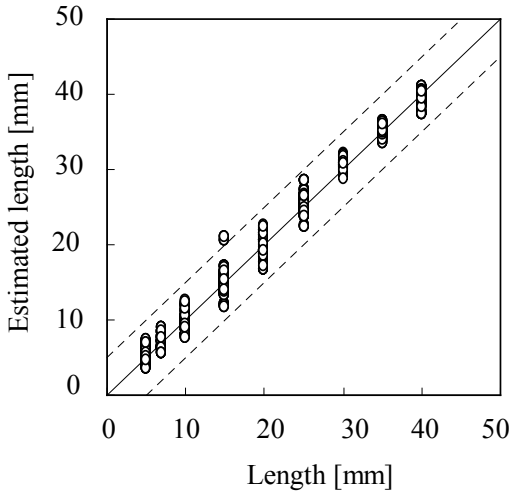
(b) Estimated length

(Spacing between electrodes is 20mm)



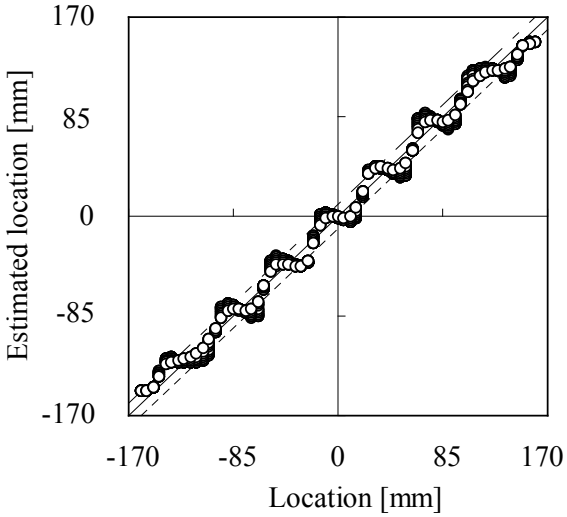
(c) Estimated location

(Spacing between electrodes is 30mm)



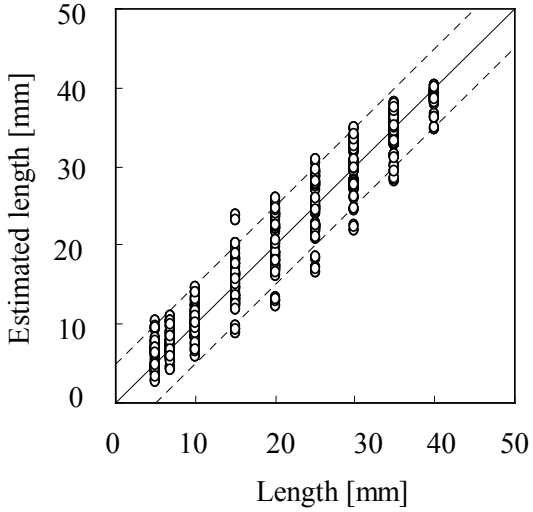
(d) Estimated length

(Spacing between electrodes is 30mm)



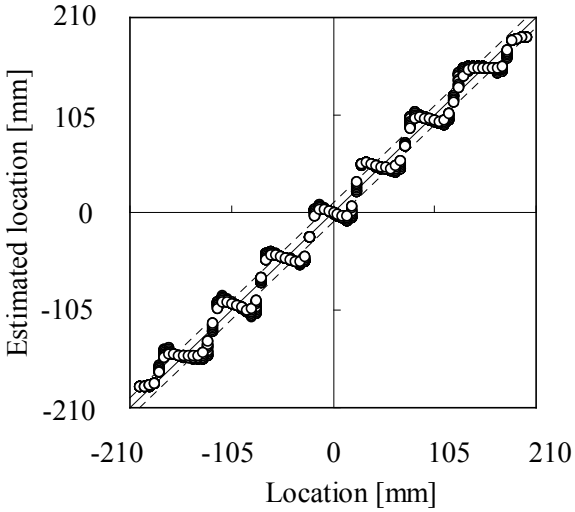
(e) Estimated location

(Spacing between electrodes is 40mm)



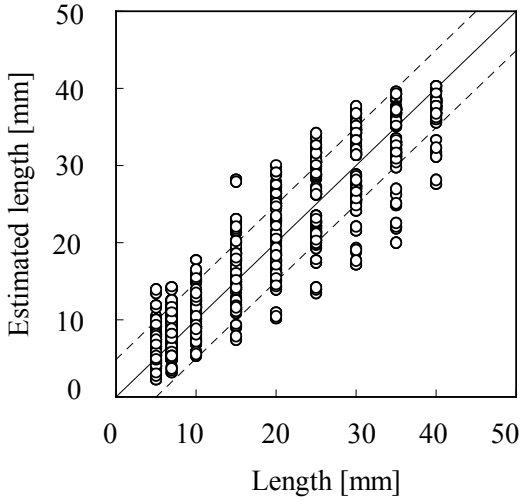
(f) Estimated length

(Spacing between electrodes is 40mm)



(g) Estimated location

(Spacing between electrodes is 50mm)



(h) Estimated length

(Spacing between electrodes is 50mm)

Fig. 6-21 Estimation results of error-included data by ERCM

ノイズが同定精度に及ぼす影響の違いについて調べるため，図 6-22～24 には 2 段階同定電位差法，非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法での，はく離位置による各電極間電位差変化の分布を示す．なお，はく離寸法は 5mm である．2 段階同定電位差法では，電流を端部から端部に流す 1st stage での電極間電位差変化である．それぞれのプロットは各電極間電位差を示し，また，図 6-23 の添え字は電流負荷経路を示す．図中破線は，擬似的に発生させたノイズの最大値である．電気抵抗変化法では，はく離同定に電極間電気抵抗変化率を用いるが，ここでは電位差法と直接的に比較するため，電位差法と同様に電極間電位差変化を算出した．本質的には，電気抵抗変化法での電気抵抗変化率と電位差変化率は同じである．以後，電気抵抗変化法についても，電極間電位差変化を用いて電位差法との比較を行う．

2 段階同定電位差法でははく離が電流電極間中央付近に存在する場合には，生じる電極間電位差変化が小さくなっている．また，擬似的に加えたノイズの最大値よりはく離に起因した電極間電位差変化が小さい部分もある．これは，電流電極間中央付近における厚さ方向電流密度の低下のためである．これが原因で，2 段階同定電位差法では，電流電極間中央付近でのみノイズの影響を強く受けて，大きく誤同定する結果となった（図 6-19 参照）．

非対称電流負荷電位差法では，電極間隔が 20mm の場合には，電極間電位差変化ははく離がどの位置に生じてもノイズの最大値よりも十分に大きい．しかしながら，電極間隔の拡大につれて，電極間電位差変化はほぼ一様に低下している．電極間隔の拡大に伴い電位差変化は全体的にノイズレベルに近づいたため，同定誤差ははく離位置によらず積層板全体で一様に生じた（図 6-20 参照）．

電気抵抗変化法では，電極間隔の拡大に伴い電極間電位差変化の最大値は増加している．これは，図 6-16 に示したように，電極間隔を 100mm 程度まで拡大するにつれて厚さ方向電流密度の最大値が増加するためである．また，上述の通り，電気抵抗変化法では，はく離が電極間中央に存在する場合には，はく離部を含む電極間電位差変化よりも隣接電極間電位差変化の方が迂回電流阻害のために大きくなっている．しかしながら，電極間隔が拡大することによって電極間中央付近での厚さ方向電流は減少し，また隣接電極間通電時の迂回電流も減少するため，はく離が電極間中央に存在する場合には電極間電位差変化は小さくなる．非対称電流負荷電位差法の場合とは異なり，電極間隔が広がることによって，はく離位置に依存して電

極間電位差変化の増加と減少が生じるため, 電極間電位差変化のはく離位置による変化は急峻になっていく．このため応答曲面の追従が十分ではなくなり，また，はく離が電極間中央に存在する場合には電位差変化が小さくなりノイズレベルに近づくことから，はく離位置の同定誤差に周期性が現れた（図 6-21 参照）.

前節にて, 厚さ方向電流密度を等しくするためには非対称電流負荷電位差法は電気抵抗変化法よりも電極間隔を狭める必要があった．しかしながら，電極間隔が 20mm の場合では，はく離によって生じる電極間電位差変化は非対称電流負荷電位差法の方が電気抵抗変化法よりも大きくなっている．また，電気抵抗変化法では電気抵抗変化は全て正であるが, 非対称電流負荷電位差法では電極間電位差変化が府になる場合も存在するため，はく離同定のための情報量が多い.

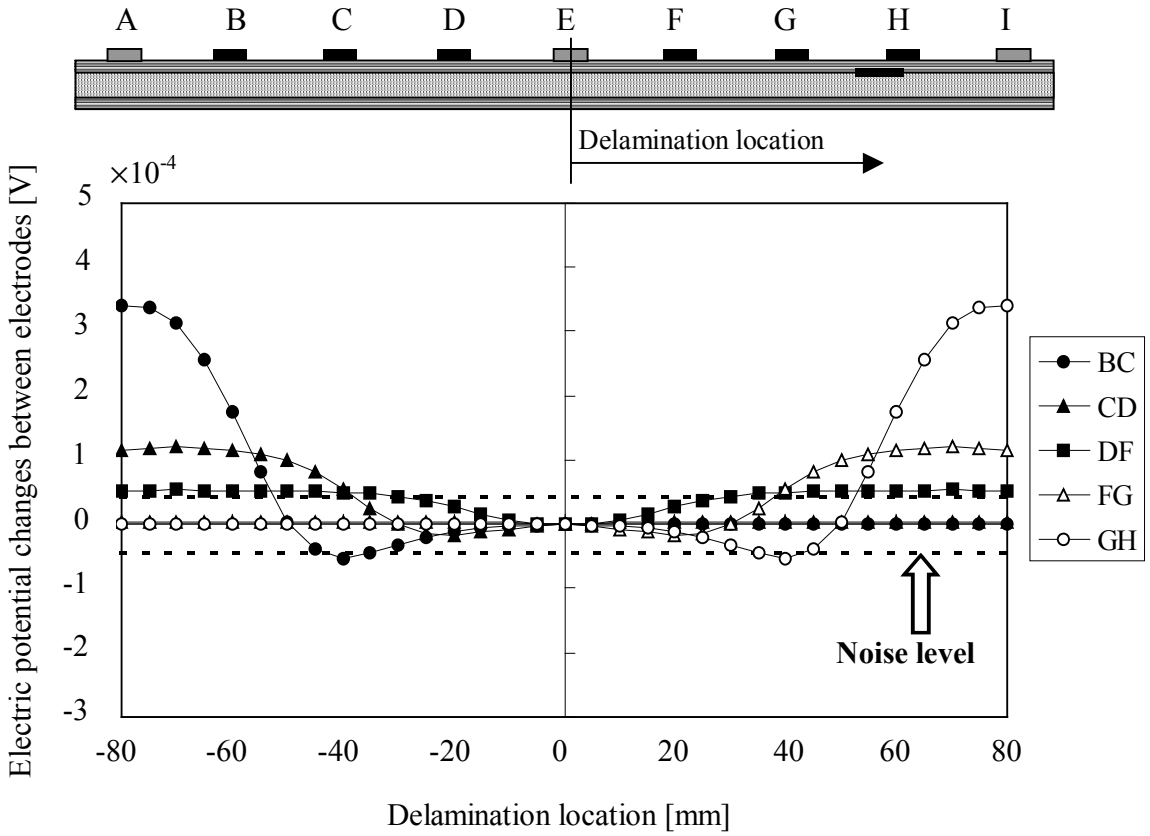
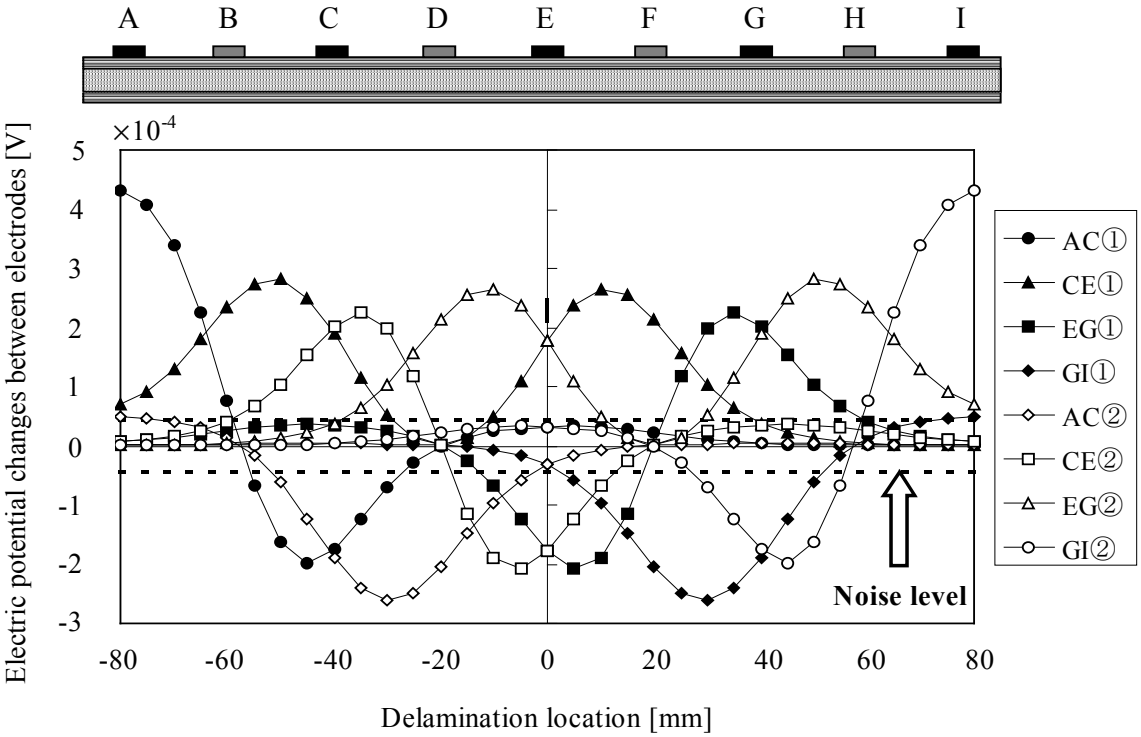
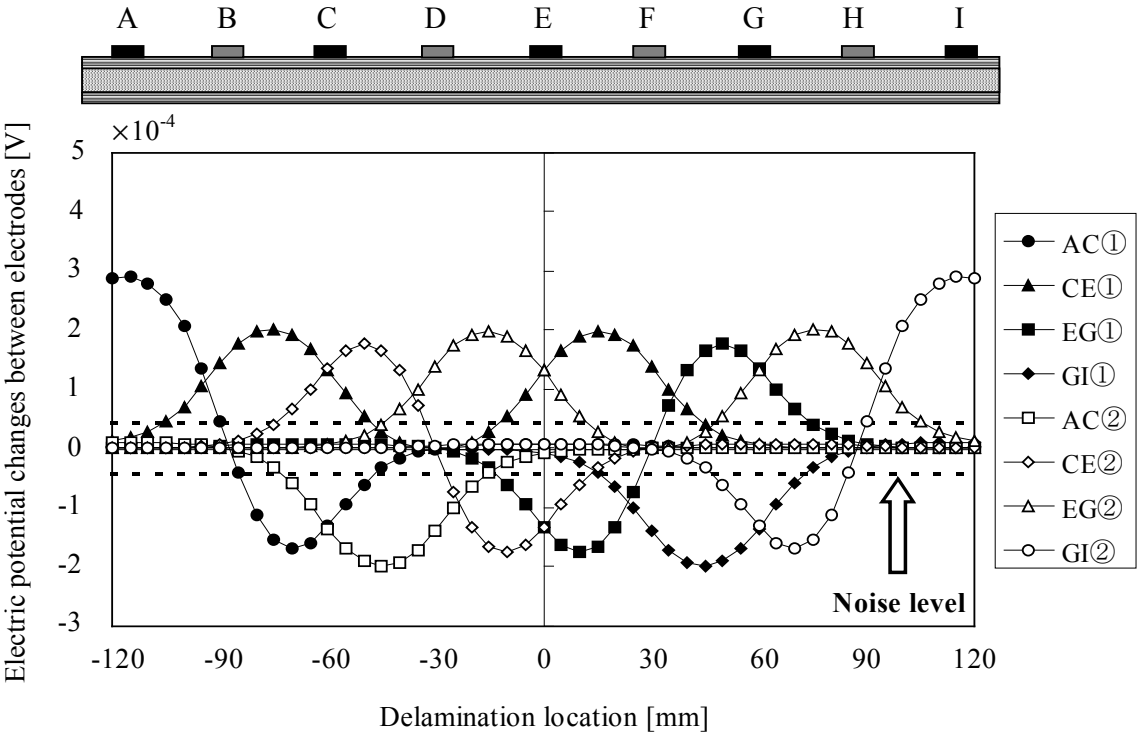


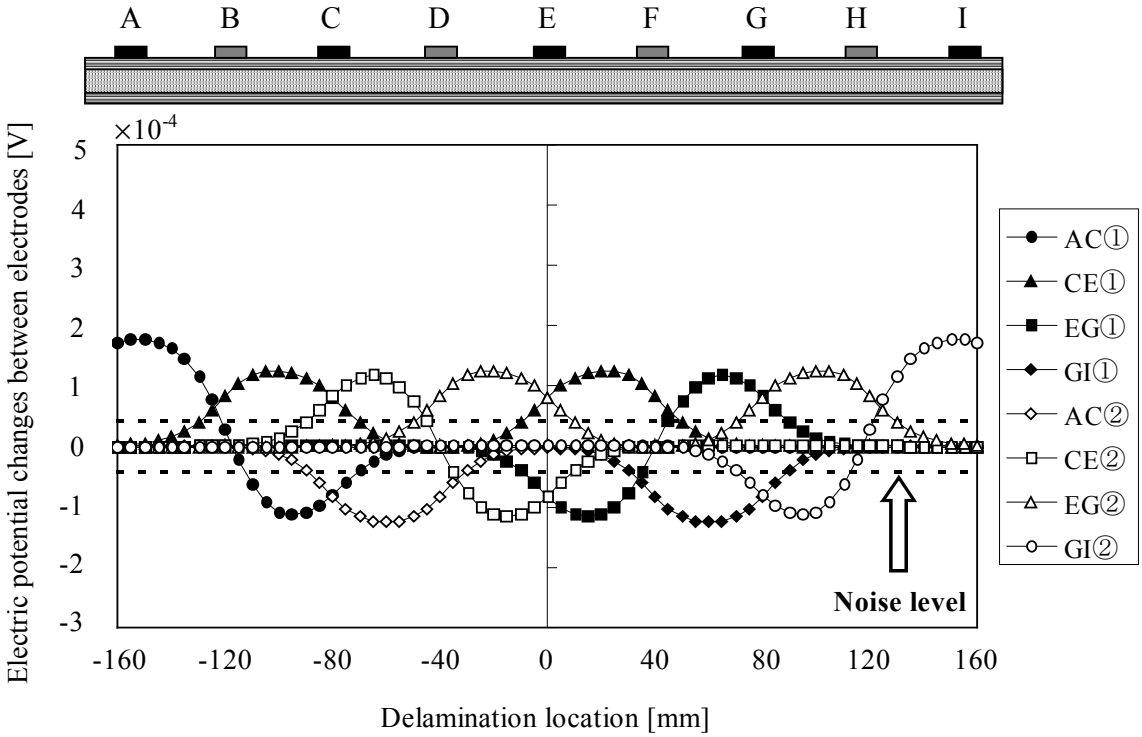
Fig. 6-22 Electric potential changes between electrodes due to delamination of various locations by TS-EPCM (Delamination length is 5mm)



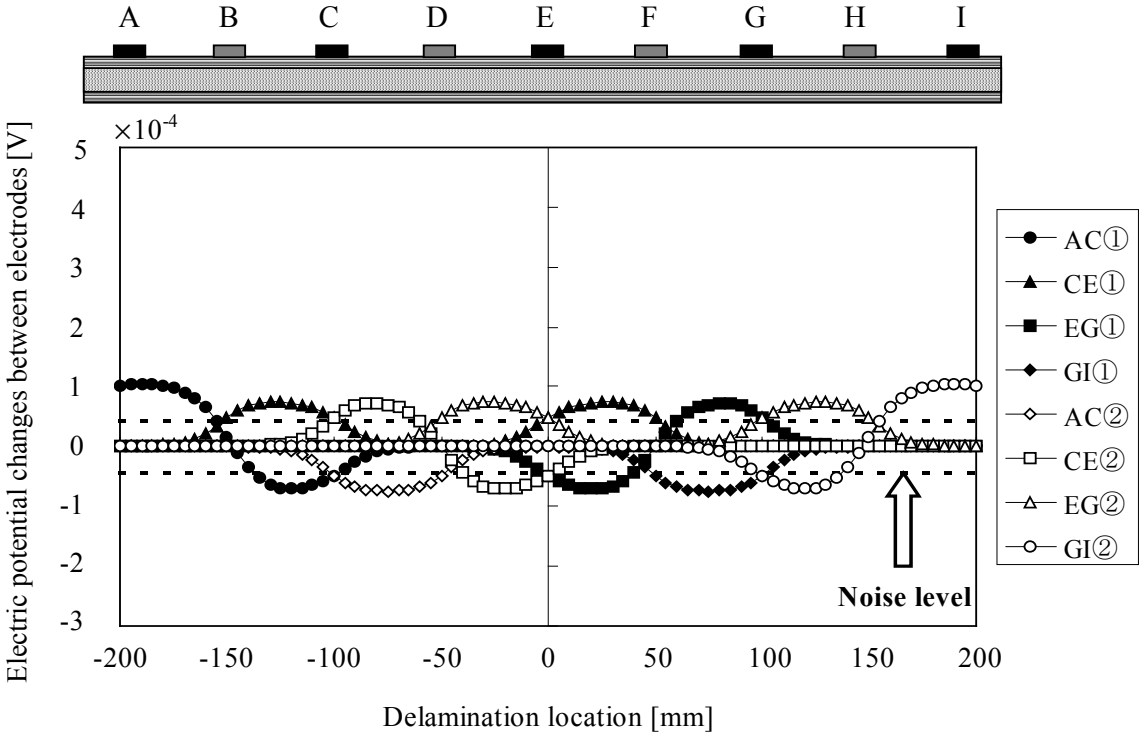
(a) Spacing between electrodes is 20mm(Spacing between current electrodes is 80mm)



(b) Spacing between electrodes is 30mm (Spacing between current electrodes is 120mm)

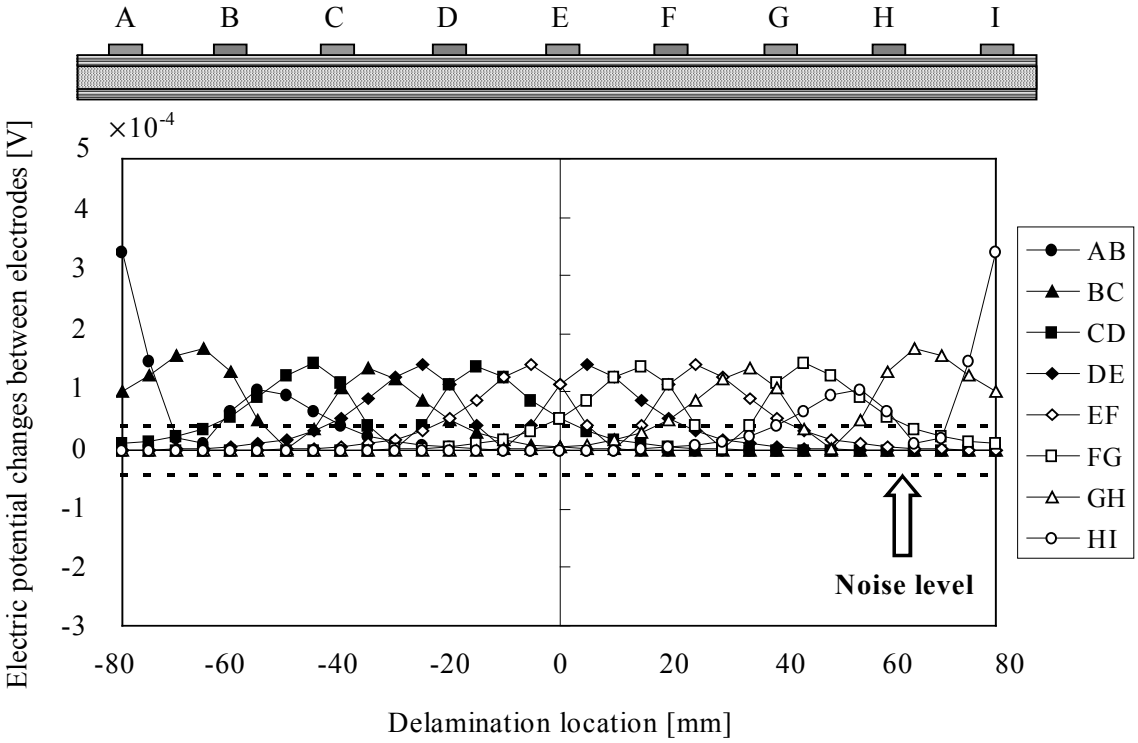


(c) Spacing between electrodes is 40mm (Spacing between current electrodes is 160mm)

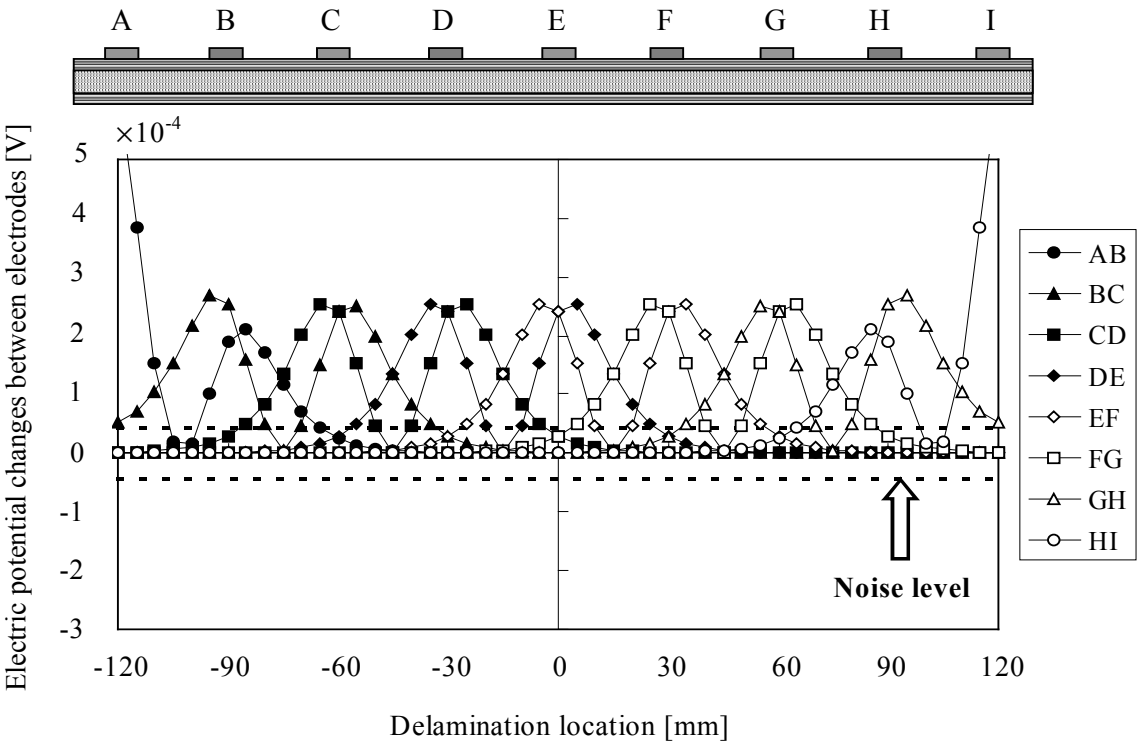


(d) Spacing between electrodes is 50mm (Spacing between current electrodes is 200mm)

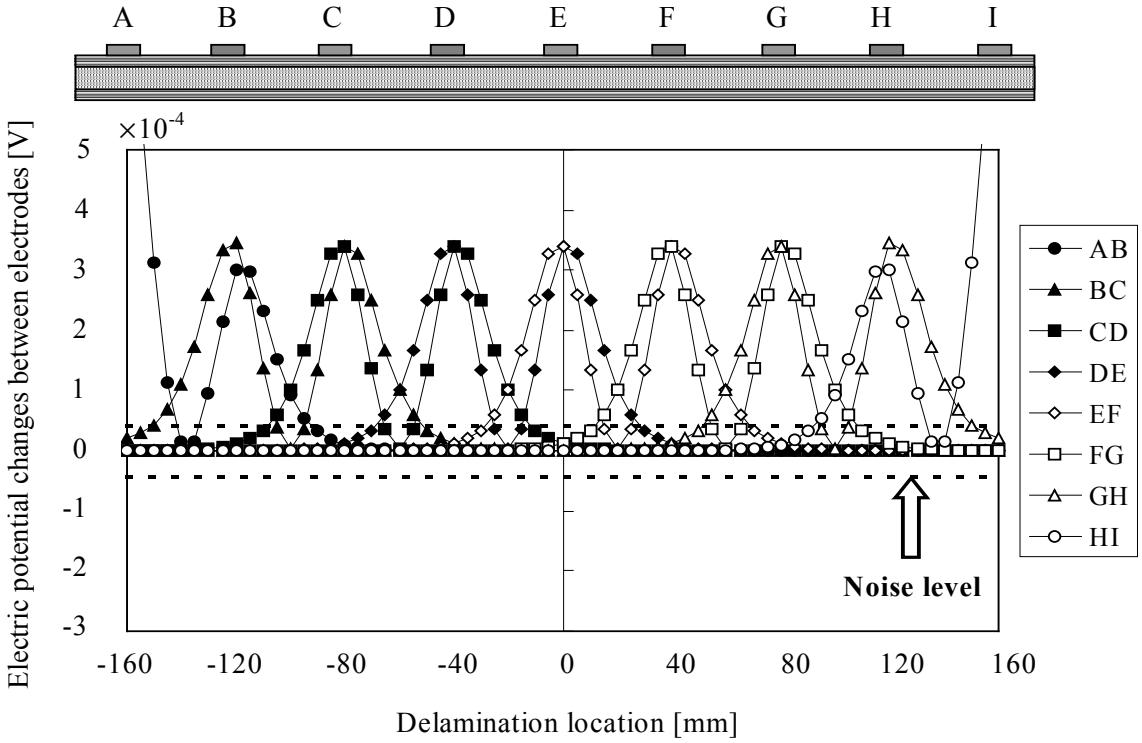
Fig. 6-23 Electric potential changes between electrodes due to delamination of various locations by ADC-EPCM (Delamination length is 5mm)



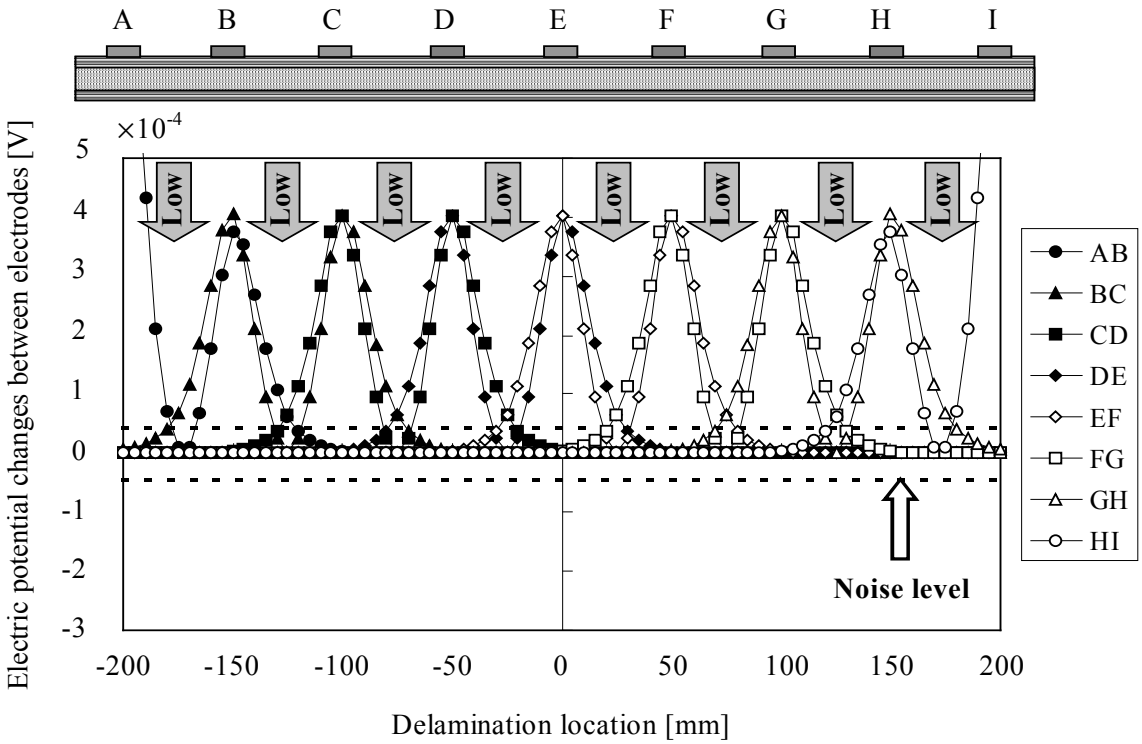
(a) Spacing between electrodes is 20mm



(b) Spacing between electrodes is 30mm



(c) Spacing between electrodes is 40mm



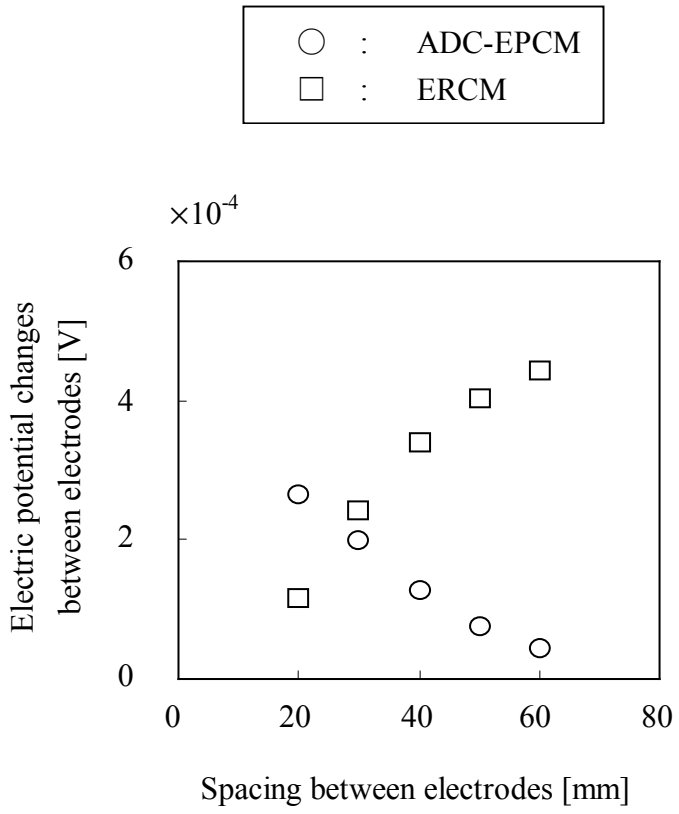
(d) Spacing between electrodes is 50mm

Fig. 6-24 Electric potential changes between electrodes due to delamination of various locations by ERCM (Delamination length is 5mm)

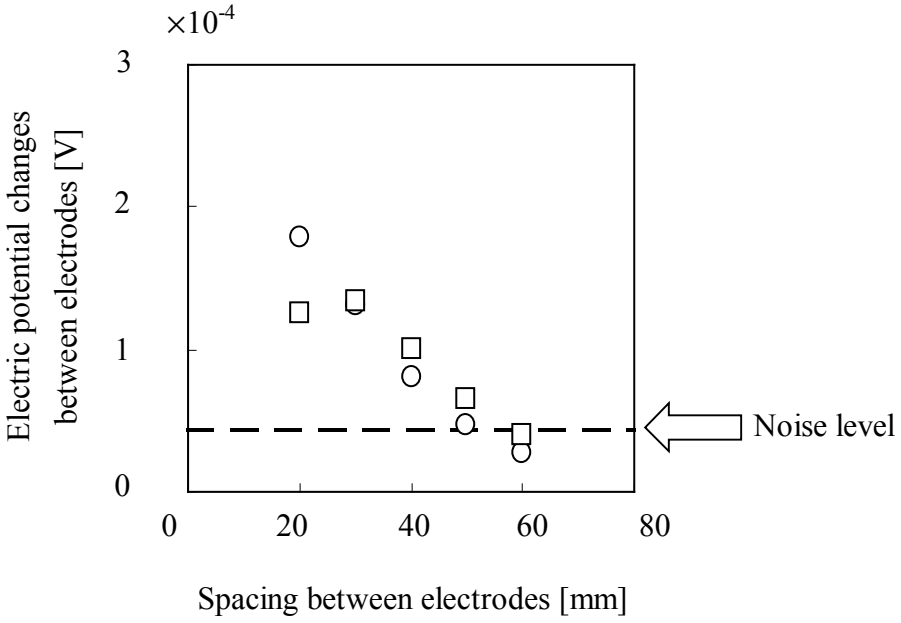
図 6-25 は，非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法において，電極間隔を変化させた場合の電極間電位差変化セット（1 回の測定にて得られる電極間電位差変化の組）の最大値が，他の位置にはく離が発生したときに得られるものよりも最大または最小になるときの電極間電位差変化を示す．ここでは，最大値として，非対称電流負荷電位差法でははく離が電極 DE 間中央に存在する場合の電極 EG 間の電位差変化（電流経路②），電気抵抗変化法でははく離が x=0mm に存在する場合の電極 DE 間電位差変化とした（図 6-25a）．はく離が端部付近に存在するときには電極間電位差変化が最も大きくなっているが，これは端部の影響を受けているために除外した．また，最小値としては，非対称電流負荷電位差法でははく離が x=0mm に存在する場合の電極 EG 間電位差変化（電流経路②），電気抵抗変化法では電極 EF 間中央の位置にはく離が存在する場合の電極 DE 間電位差変化とした（図 6-25b）．

図 6-25a より，非対称電流負荷電位差法では電極間隔の拡大により電極間電位差変化の最大値は減少しているが，電気抵抗変化法では増加している．これは，図 6-16 で示したように，電流電極間隔が 100mm 程度までは，電流電極間隔が広がるにつれて厚さ方向電流密度も増加するためである．一方で，図 6-25b より，電極間隔の拡大に伴い電極間電位差変化の最小値は非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法共に減少している．これは，図 6-23 で示したように，非対称電流負荷電位差法では電極間隔の拡大に伴い電極間電位差変化は一様に減少し，図 6-24 で示したように電気抵抗変化法では電極間隔の拡大に伴い，はく離が電極部に存在する場合には電極間電位差変化が増加し，逆に，電極間中央付近に存在する場合には減少するためである．

ノイズなど実験誤差の影響を考慮するために擬似的に加えた誤差の最大値を図 6-25b に破線で示す．このレベルよりもはく離に起因した電極間電位差変化が十分に大きければノイズの影響を受けにくくなる．電極間隔が 20mm の場合，非対称電流負荷電位差法の方が最大値及び最小値ともに大きな電極間電位差変化を生じているため，耐ノイズ性が高い．電極間隔を拡大すると，両手法ともに電極間電位差変化の最小値は減少するためにノイズの影響を受けやすくなる．上述のように電気抵抗変化法では誤差の影響を強く受けるのは電極間中央付近にはく離が存在する場合であるが，電極間隔が等しければ，電極間電位差変化の最小値は非対称電流負荷電位差と電気抵抗変化法でほぼ等しいため，ノイズに対する誤差はほぼ等しいと



(a) Maximum electric potential changes between electrodes



(b) Minimum electric potential changes between electrodes

Fig. 6-25 Maximum and minimum electric potential changes between electrodes

考えられる．ノイズレベルが変動しても，ノイズが同定精度に与える影響は両手法でほぼ等しい．

ノイズ誤差の許容性の観点からは，非対称電流負荷電位差法は電気抵抗変化法とほぼ同等であり，電流電極間隔の狭い電気抵抗変化法でも同一ノイズ環境下では非対称電流負荷電位差法よりも電極間隔を拡大することはできない．また，電極間隔が狭い場合には非対称電流負荷電位差法は電気抵抗変化法と比較して耐ノイズ性が高まることから，ノイズレベルが高い環境下では非対称電流負荷電位差法が有利となる．

6.7. 結　言

提案した 2 段階同定電位差法及び非対称電流負荷電位差法と，従来手法である電気抵抗変化法との同定精度比較を行った．それぞれの方法において，電極間隔が同定精度に与える影響について考察した．また，実機でのノイズ環境下を考慮した場合の有効性についても検討した．正確なノイズレベルを知るためには実機構造での試験が必要であるが，本章では，このノイズの最大値を，5mm のはく離発生により生じる電極間電位差変化の 10%として，ノイズ誤差による影響がそれぞれの同定手法に与える影響について定量的に検討した．得られた結果を要約すると以下の通りである．

(1) 電極間隔が 20mm で等しい場合には，2 段階同定電位差法及び非対称電流負荷電位差法は電気抵抗変化法と比較してほぼ同等の同定精度を有している．また，同定精度ははく離形状にほとんど依存しない．

(2) 2 段階同定電位差法では，電極間隔を広げると電流電極間中央付近での同定精度が急激に低下し，2 段階目領域の判定が困難となる．非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法では，電極間隔の拡大に伴って同定精度は低下するが，検出すべきはく離寸法目標に対して，電極間隔を任意に設定することができる．

(3) すべての位置ではく離を検出するためには，電流電極から離れた位置でも十分な厚さ方向電流を保つ必要がある．すべてのはく離を検出するために非対称電流負荷電位差法及び電気抵抗変化法において，必要とされる位置での厚さ方向電流密度を等しくするためには，非対称電流負荷電位差法では電気抵抗変化法に対して電極間隔を約半分にする必要がある．

(4) ノイズ誤差を含んだデータによる同定では，2 段階同定電位差法は大きな誤同定を生じた．非対称電流負荷電位差法では電極間隔の拡大に伴ってはく離位置に依存せずに一様に同定誤差を生じ，電気抵抗変化法では周期的な同定誤差を生じた．ノイズ誤差が同定精度に与える影響は各手法によって大きく異なる．

(5) 非対称電流負荷電位差法と電気抵抗変化法では，耐ノイズ性はほぼ等しく，電極間隔が 20mm 以下では非対称電流負荷電位差法が優れる．

(6) 2 段階同定電位差法は 1 回の電流負荷のみではく離モニターが可能であるため，低ノイズ環境下であれば，測定時間が短いために有効である．一方，非対称電流負荷電位差法は常に 2 回の電流負荷を必要とするが，電気抵抗変化法と比較すると電流負荷回数は大幅に低減され，電流負荷当りの同定領域は 4 倍となる．更に，耐ノイズ性も電気抵抗変化法とほぼ等しい．4 電極法を利用して接触抵抗の影響を低減している電位差法は，電気抵抗変化法と比較して非常に有効な同定手法である．

参　考　文　献

[1] A.Todoroki, “The effect of number of electrodes and diagnostic tool for monitoring the delamination of CFRP laminates by changes in electrical resistance”, Composites Science and Technology, 61, (2001), 1871-1880.

[2] A.Todoroki and Y.Tanaka, “Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method”, Composites Science and Technology, 62, (2002), 629-639.

[3] A.Todoroki, M.Tanaka, and Y.Shimamura, “High performance estimations of delamination of graphite/epoxy laminates with electric resistance change method”, Composites Science and Technology, 63, (2003), 1911-1920.

[4] 轟章, 田中美帆, 島村佳伸, 小林英男, 電気抵抗変化の CFRP 積層板の知的はく離検出法におけるはく離形状の影響解析, 日本複合材料学会誌, 29(3), (2003), 113-119.

第 7 章

結　論

CFRP 積層板はく離モニタリング手法として提案されている電気抵抗変化法は，はく離の位置及び寸法を同定可能な手法として注目されているが，全隣接電極間に順次通電する必要があるため，システムが複雑で測定にも時間を要すること，接触抵抗の影響を受けて容易に誤同定する可能性を有していることが大きな欠点であった．本論文では，電気抵抗変化法の問題点を解決する新しい方法を提案し，その有効性を実証することを目的とした．

ここでは各章において得られた主な結果を総括して述べて，本論文の結論とする．なお，図 7-1 には本論文の概要を図示した．

第 1 章「緒論」では，構造ヘルスモニタリングの重要性について述べた．CFRP 積層板はく離モニタリングに適用可能な既存の非破壊検査法や，近年研究されているヘルスモニタリング手法を示し，これら方法の中で電位差法の利点に着目した．電位差法の従来金属への適用研究，及び，近年の CFRP 積層板損傷モニタリングへの適用を目的とした研究を挙げた．はく離の位置や寸法を高精度に同定する有効な手法として，電気抵抗変化法が提案されていたが，この方法では実構造への適用に際して大きな問題点を有していることを示した．

第 2 章「電位差法の問題点」では，電気抵抗変化法の欠点を解決する電位差法を CFRP 積層板に適用した場合，直線状の層間はく離のみであれば精度良く同定が可能であることが示された．しかしながら，実構造で生じるはく離形状は様々であるが，電位差法でははく離形状に依存して寸法同定に大きな誤差を導くことが明らかとなった．はく離形状に依存して誤同定するメカニズムを考察し，その原因を解析的に明らかにした．回帰精度を向上させるための規格化が，はく離形状による影響を拡大していることを示した．

第 3 章「2 段階同定電位差法による改善」では，電位差法の問題点を解決する新しい方法を提案した．電流電極間の中央付近にはく離が存在する場合のみ，はく離形状の差異によって同定精度に誤差を生じることから，はく離がこの部分に存在する場合には中央電極から電流を負荷する 2 段階による同定方法を提案した．この方法を用いることで，はく離形状に依存せずにはく離が同定可能であることを解析的に示した．また，多数回のはく離実験を実施し，CFRP 積層板に生じた実はく離を同定した結果，提案手法の有効性を実証した．

第 4 章「非対称電流負荷電位差法による改善」では，電位差法の問題点を解決するもう一つの方法として，非対称電流負荷電位差法を提案した．はく離位置が電流電極に近い場合には大きな電極間電位差変化が生じ，電流電極間中央付近の場合にははく離形状に依存して異なるが，その大きさは小さい．この性質を利用し，電流経路がそれぞれ半分ずつ重なり合うように電流電極を試験片に対して非対称に作成して互い違いに電流を負荷すると，それぞれ得られる電極間電位差変化の増減も互い違いになる．この 2 回の電流負荷によって得られる電極間電位差変化を合わせて用いて規格化することで，はく離形状による差異を無視することができる．はく離形状による電極間電位差変化の差異を無視することができる原理を解析的に示し，この方法を用いて高精度なはく離同定が可能であることを FEM 解析より明らかにした．また，多数回のはく離実験を実施し，CFRP 積層板に生じた実はく離を同定した結果，提案手法の有効性を実証した．

第 5 章「等価導電率による実験回数削減法」では，逆問題解析手法である応答曲面の作成に必要な学習データを簡便に取得する方法を提案した．実機大型構造物を用いたはく離実験により学習データを取得することは高コストであるために数値解析に置き換える必要があるが，CFRP 積層板の導電率測定は難しく，また，測定した導電率を用いた FEM 解析より応答曲面を作成しても精度良く実はく離を同定することは困難である．従って，数回の実験により得られたはく離に起因する電極間電位差変化と FEM 解析結果との誤差平方和を最小にするような導電率，すなわち等価導電率を探索する方法を提案した．CFRP の有する導電率の範囲を示し，等価導電率を簡単に探索する方法を示した．算出した等価導電率を用いた FEM 解析結果から応答曲面を作成し，実はく離を同定した結果，提案した電位差法を用いて精度良くはく離を同定した．応答曲面の説明変数であるはく離実験による電極間電位差変化と直接一致するように解析結果を合わせていることから，作成した学習データ，すなわち応答曲面の信頼性は高く，回帰精度も多数のはく離実験結果から作成したものよりも高い．数回のはく離実験のみで高精度な応答曲面を作成することが可能であることを示した．

第 6 章「電位差法と電気抵抗変化法の同定精度比較」では，提案した 2 つの電位差法と電気抵抗変化法の同定精度を比較した．提案した 2 つの電位差法は，梁型直交積層板への適用では電気抵抗変化法と同等な同定精度を有していることが明ら

かになった．電極間隔が同定精度に与える影響について検証した結果，2 段階同定電位差法では, 各電極間隔の拡大は電流電極間隔の大幅な拡大につながることから, 電流電極間中央付近での同定誤差が大きくなり，2 段階目領域の判定が困難となった．一方，非対称電流負荷電位差法と電気抵抗変化法では，電極間隔の拡大によって同定精度は低下したが，大きな誤同定は生じなかった．これらの方法では，はく離が厚さ方向電流を妨げることから生じる電位差変化よりはく離を同定するため, 厚さ方向電流が高いことが望まれる. それぞれの方法にてすべての位置ではく離を検知するために必要な厚さ方向電流密度を等しくするには, 非対称電流負荷電位差法では電気抵抗変化法よりも電極間隔を狭める必要がある．しかしながら，実機環境下でのノイズが同定精度に及ぼす影響を考慮した場合, それぞれの方法によってノイズの影響は異なるが, 非対称電流負荷電位差法と電気抵抗変化法では耐ノイズ性がほぼ等しいことが明らかとなった．更に，電極間隔が 20mm 以下では非対称電流負荷電位差法が優れる．このことから，電流電極間隔の広い非対称電流負荷電位差法でも，同ノイズ環境下であれば，電気抵抗変化法と等しい電極間隔とすることができる．

以上より，電気抵抗変化法の問題点を解決する 2 種類の電位差法を提案し，その有効性を実証した．2 段階同定電位差法は 1 回の電流負荷のみではく離モニターが可能であるため，低ノイズ環境下であれば，測定時間が短いために有効である．一方，非対称電流負荷電位差法では，常に 2 回の電流負荷を必要とするが，電気抵抗変化法と比較すると電流負荷回数は大幅に低減され，電流負荷当りの同定領域は 4 倍と広い．更に，耐ノイズ性も電気抵抗変化法とほぼ等しい．4 電極法を利用して接触抵抗の影響を無視することが可能な提案する電位差法は, 電気抵抗変化法と比較して非常に有効な手法である（図 7-1 及び表 7-1 参照）.

構造健全保証の観点から CFRP 積層板のはく離検出の必要性.
⇒　電気抵抗変化法の利点に着目.

電気抵抗変化法の問題点

▶　接触抵抗の影響による誤同定の可能性.
▶　全隣接電極間に通電が必要なために測定時間が長く，また，システムが複雑.

第 1 章

電位差法による CFRP 積層板はく離同定の提案

電位差法を用いたはく離同定の実施.
▷　直線状の層間はく離のみであれば精度良く同定可能.
▷　はく離形状に依存して大きく誤同定.

電位差法の問題点を明示.

はく離形状による誤同定の原因解明.

第 2 章

電位差法の問題点改善

2 段階同定電位差法の提案

▷　FEM 解析を用い，はく離同定可能であることを示した.
▷　多数回のはく離実験を実施し，有効性を確認.
▶　繊維体積含有率 V_f の影響を検討.
　V_f が高い積層板では同定精度が著しく低下.

第 3 章

非対称電流負荷電位差法の提案

▷　FEM 解析を用いてはく離同定可能であることを示した.
▷　多数回のはく離実験を実施し，有効性を確認.

第 4 章

実験回数削減法

▷　数回のはく離実験により等価導電率を算出し，FEM 解析より高精度，高信頼性の応答曲面を作成.
▶　繊維体積含有率が 65.5%の積層板にも電位差法は適用可能.
（CFRP 積層板の導電率測定には大きな誤差が含まれる可能性大）

第 5 章

同定精度比較

▷　電極間隔が 20mm であれば，TS-EPCM，ADC-EPCM 及び ERCM の同定精度はほぼ等しい.⇔　提案手法の ERCM に対する有効性.
▷　ADC-EPCM は，検出目標のはく離に対して電極間隔を設定することが可能だが，TS-EPCM は不可.

ノイズによる影響

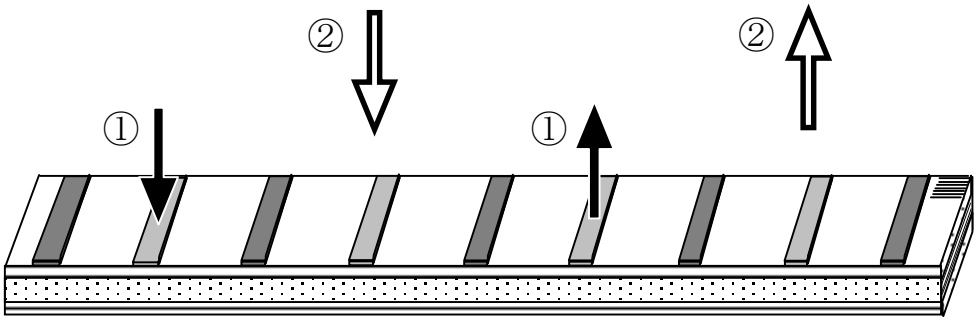
▷　電極間隔が 20mm の場合には ADC-EPCM が最も耐ノイズ性が高い.
▷　ADC-EPCM 及び ERCM はノイズに強いが, TS-EPCM は影響を受けやすい.

第 6 章

Fig. 7-1 Summary of thesis

非対称電流負荷電位差法

- 電流電極対は積層板に対して非対称に選択.
- 2 回の電流負荷で高精度に同定.



①：Current path 1
②：Current path 2

利点

- ☑ 同定精度が高い.
- ☑ 接触抵抗の影響なし.
- ☑ 電流負荷回数が少ない
  （ERCM と比較し単位電流負荷当り 4 倍の同定領域）
- ☑ 耐ノイズ性が高い.
  （特に電極間隔が 20mm のときは最も高い）
- ☑ 検出目標のはく離に対して電極間隔を設定可能.

欠点

- × 常に 2 回の電流負荷が必要.
  （ERCM と比較すれば大幅削減）

Fig. 7-2 Characteristics of asymmetrical dual charge electric potential change method

Table 7-1 Comparison of characteristics of proposed methods

	2段階同定電位差法	非対称電流負荷電位差法	電気抵抗変化法
同定精度	○	◎	◎
接触抵抗	○	○	×
電流負荷回数の少なさ	◎	○	×
電極間隔の拡大	×	○	◎
耐ノイズ性	×	◎	◎

This page intentionally left blank

This page intentionally left blank

印刷論文

(1) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング（規格化電位差法の適用とはく離形状の影響評価）, 日本複合材料学会誌, Vol.30, No.4, (2004), P135-141.　（第 2 章関連）

(1') Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, Monitoring delamination of laminated CFRP using the electric potential change method (Application of normalization method and the effect of the shape of a delamination crack), Advanced Composite Materials, Vol.13, No.3-4, (2004), p311-324.　（第 2 章関連）

(2) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング （同定誤差原因と 2 段階はく離同定による改善）, 日本複合材料学会誌, Vol.30, No.4, (2004), P149-156.　（第 2 章及び第 3 章関連）

(2') Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, Monitoring delamination of laminated CFRP using the electric potential change method (Two-stage monitoring for robust estimation), Advanced Composite Materials, Vol.14, No.1, (2005), p.83-97.　（第 2 章及び第 3 章関連）

(3) Masahito Ueda, Akira Todoroki and Yoshinobu Shimamura, "Effect of Fiber Volume Fraction on Monitoring Delamination of CFRP Laminates with Electric Resistance Change Method", Key Engineering Materials, Vol.270-273, (2004), p1935-1942.（第 3 章関連）

(4) Masahito Ueda and Akira Todoroki, "Delamination monitoring of CFRP laminate using the two-stage electric potential change method with equivalent electric conductivity", Engineering fracture mechanics, (in review).　（第 3 章及び第 5 章関連）

(5) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 非対称電流負荷による電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング, 日本機械学会論文集（A 編）（掲載可）.（第 4 章及び第 5 章関連）

(5') Masahito Ueda and Akira Todoroki, "Asymmetrical dual charge EPCM for delamination monitoring of CFRP laminate", Key Engineering Materials, (to be published).　（第 4 章及び第 5 章関連）

(6) Masahito Ueda and Akira Todoroki, "Noise effect on estimation accuracy of delamination monitoring methods for CFRP laminate using electric property change" (in review)　（第 6 章関連）

その他の業績一覧

印刷論文

(1) Akira Todoroki and Masahito Ueda, “Low Cost Delamination Monitoring of CFRP Beams Using Electrical Resistance Change with Neural Networks”, Smart Materials and Structures, (to be published).

(2) Akira Todoroki, Kazuomi Omagari and Masahito Ueda, “Matrix crack detection in cryogenic temperature using electrical resistance change method”, Key Engineering Materials, (to be published)

(3) Akira Todoroki, Norihiko Hana and Masahito Ueda, “Luminance change method for cure monitoring of GFRP”, Key Engineering Materials, (in review)

(4)Yoshinobu Shimamura, Keiko Oda, Masahito Ueda and Akira Todoroki, ”Detectability of bearing failure of composite bolted joints by electrical resistance change method”, Key Engineering Materials, (in review)

国際会議録

(1) Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, “Two Stage Electrical Potential Method for Delamination Monitoring of CFRP”, The 4th Korea-Japan joint symposium on composite materials, (2003), P21-22.

(2) Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, “Effect of Fiber Volume Fraction on Monitoring Delamination of CFRP Laminates with Electric resistance change method”, 11th Asia-Pacific conference on non-destructive testing, (2003), p1935-1942.

(3) Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, “Novel zooming method for delamination monitoring of CFRP laminates using electrical potential change”, The international society for optical engineering, smart structures and materials/NDE for health monitoring and diagnostics, nondestructive evaluation and health monitoring of aerospace materials and composites Ⅲ, (2004), P1-8.

(4) Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, “Delamination monitoring of CFRP laminates using electrical potential method”, The fourth Asian-Australasian conference on composite materials, (2004).

(5) Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, “Delamination monitoring of CFRP Laminates using Electric Potential Change Method”, 1st KAIST-Tokyo Tech joint workshop on fracture, reliability and advanced materials, (2004).

(6) Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, “Delamination monitoring of CFRP Laminates using Electric Potential Method”, 5th Joint Canada-Japan workshop on composites, (2004), P399-407.

(7) Masahito Ueda, Akira Todoroki, Yoshinobu Shimamura and Hideo Kobayashi, “Delamination monitoring of CFRP Laminates using Electric Potential Change Method”, The 11th US-Japan conference on composite materials, (2004), Damage 16.

(8) Masahito Ueda and Akira Todoroki, “Asymmetrical dual charge EPCM for real-time delamination monitoring of CFRP laminate”, 2nd Tokyo Tech-KAIST joint workshop on fracture, reliability and advanced materials, (2005), P10-11.

(9) Masahito Ueda and Akira Todoroki, “Two-stage electric potential change method for delamination monitoring of CFRP laminate using equivalent electric conductivity”, 1st JTU-TIT joint workshop on creative engineering, (2005).

(10) Masahito Ueda, Akira Todoroki and Ryo Watanabe, “The effect of poor contact electrodes on electrical property change of CFRP laminate due to delamination”, The 5th Japan-Korea joint symposium on composite materials, (2005), P.77-78.

(11) Masahito Ueda and Akira Todoroki, “Delamination monitoring of CFRP laminate using the two-stage electric potential change method with equivalent electric conductivity”, European mechanics society, EUROMECH473, Fracture of composite materials, (2005).

(12) Masahito Ueda and Akira Todoroki, “Asymmetrical dual charge EPCM for delamination monitoring of CFRP laminate”, The 1st international conference on advanced nondestructive evaluation, (2005).

(13) Masahito Ueda and Akira Todoroki, “Delamination monitoring of CFRP laminate using asymmetrical dual charge electric potential change method”, 9th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition, (2005).

国内会議録

(1) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電気ポテンシャル法を用いた CFRP 積層板の FEM 解析, 日本機械学会 M＆M2003 材料力学部門講演会講演論文集, (2003), P1037-1038.

(2) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電気ポテンシャル法を用いた CFRP 積層板のはく離検出, 日本複合材料学会第 28 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2003), P59-60.

(3) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング, 日本機械学会第 16 回計算力学講演会講演論文集, (2003), P647-648.

(4) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電位差法を用いた CFRP 積層板はく離検出のための等価導電率の検討, 日本複合材料学会 2004 年度研究発表講演会予稿集, (2004), P131-132.

(5) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング, 日本機械学会 M＆M2004 材料力学カンファレンス講演論文集, (2004), P295-296.

(6) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電位差法による CFRP 積層板のはく離検出, 日本複合材料学会第 29 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2004), P113-114.

(7) 上田政人, 轟章, 電位差法を用いた CFRP 積層板のはく離モニタリング（等価導電率を用いた実験回数の削減）, 日本複合材料学会 2005 年度研究発表講演会予稿集, (2005), P63-64.

(8) 上田政人, 轟章, 島村佳伸, 小林英男, 電位差法による CFRP 積層板はく離モニタリング（等価導電率による実験回数削減法）, 日本機会学会 2005 年度年次大会講演論文集 6, (2005), Vol.6. P149-150.

(9) 上田政人, 轟章, 非対称電流負荷電位差法による CFRP 直交積層板の埋没はく離同定, 日本複合材料学会第 30 回複合材料シンポジウム講演要旨集, (2005), P261-262.

This page intentionally left blank

This page intentionally left blank

Appendix

Appendix　A

－逆問題解析手法（ 応答曲面法 ）－

本論文で提案する電位差法は, はく離に起因した多数箇所での電極間電位差変化よりはく離位置及び寸法を同定する逆問題である. このような逆問題によく適用される手法としてニューラルネットワーク[1,2]がある．しかしながら，ニューラルネットワークは教師信号以外のデータに対しての信頼性が不明であり，また，学習コストが高いという難点がある．そこで，本研究では応答曲面法（Response Surface Methodology : RSM）[3,4]を用いる．応答曲面法は品質管理のためのプロセス最適化手法であり，説明変数と被説明変数を多項式近似する．但し，近似式は多項式に限定する必要はなく，様々な変数変換を行うことで複雑な関数近似も可能である．例えば，成長曲線（Logistic curve）を用いればパーセプトロンニューラルネットワークとなる. 本研究では電極間電位差変化とはく離位置または寸法との関係を 2 次多項式近似した応答曲面を採用する．この場合，ニューラルネットワークと比較して学習時間は大幅に短縮される.

本手法において応答曲面法を利用する利点としては以下が挙げられる.

1. 破壊のメカニズムを考慮する必要がない.
2. 近似関数の各係数の統計的評価が可能.
3. 実験計画法を適用することで少ない測定結果から小さい分散の近似関係式を得ることが可能.

A.1.　最小二乗法

応答曲面法では入力 - 応答空間を近似関数を用いて表現することが必要であり，一般的には測定結果からの予測となる. 近似関数が線形関数であれば最小二乗法を用いることで，近似関数の係数を統計的に推定することができ，その評価も可能である．応答曲面として 2 次多項式を用いる場合には回帰モデルは次のようになる.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{n} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{n} \beta_{ii} x_i^{\ 2} + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^{n} \beta_{ji} x_j x_i \tag{A-1}$$

ここで，x_i を説明変数(Predictor variables or regressors)，　を，β_i を回帰係数(Partial regression coefficients)と呼ぶ．変数が 2 つの場合には

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^{\ 2} + \beta_4 x_2^{\ 2} + \beta_5 x_1 x_2 \tag{A-2}$$

である．$x_1^{\ 2} = x_3$, $x_2^{\ 2} = x_4$, $x_1 x_2 = x_5$ と変数を置換すると

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{5} \beta_i x_i \tag{A-3}$$

となり，多変数の一次式に変換できる．高次多項式などは線形化可能な関数である．一般的に，応答曲面の形状に関係なく，係数βに関して線形であればすべて線形回帰モデルである．

最小二乗法は線形回帰モデルの回帰係数を推定するのに一般的に用いられる．回帰係数βの推定に用いる実験点の組の総数を n，変数（変数変換後）の数を k（n > k）とし，誤差εの期待値は E(ε)=0，分散は $V(\varepsilon)=\sigma^2$ であり誤差 ε_i には相関がないとする．回帰モデルは次のように書ける．

$$\mathbf{y} = \mathbf{X\beta} + \boldsymbol{\varepsilon} \tag{A-4}$$

ここに，

$$\mathbf{y} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ 1 & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\beta} = \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_n \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \tag{A-5}$$

上式の誤差二乗和を最小化することで，係数β の最小二乗推定量（不偏推定量）**b** を求めることができる．

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{y} \tag{A-6}$$

これより，応答曲面は次式で得られる．

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{Xb} \tag{A-7}$$

最小二乗法を用いて推定量βを求めることにより得られた回帰モデルの評価には決定係数(Coefficient of multiple determination) R^2 が用いられる．

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \tag{A-8}$$

ここで,

SSR (Regression sum of squares) : $SS_R = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2$

SSE (Error sum of squares) : $SS_E = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y})^2$ (A-9)

SST (Total sum of squares) : $SS_T = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 = SS_R + SS_E$

$\hat{y}_i$: 推定値, $\bar{y}_i$: 平均値

決定係数 R^2 は回帰モデルの適合性を表す．R^2=1 の場合には，誤差の分散が 0, すなわち完全な適合を意味し，残差があれば決定係数は 1 より小さくなり，0 の場合にはデータの分散がそのまま誤差の分散になり, 相関がないことになる. 従って, 決定係数は $0 \le R^2 \le 1$ の範囲の値を取る.

しかしながら，決定係数 R^2 は回帰にほとんど寄与しない変数（例えば 3 次の項など）を加えても増加するため，変数を加えることによって決定係数 R^2 がより大きな値を取ってもそれがより優れた回帰モデルとは限らない．また，ある回帰モデルでは, 変数を増やすことにより高い決定係数を有しても新規データに対する応答の精度が低下する可能性もある．これより，実際には回帰モデルの良否の比較のためには単位自由度当りの残差を比較する必要があり, 自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2（Adjusted coefficient of multiple determination）が用いられる.

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{SS_E/(n-k-1)}{SS_T/(n-1)} \quad \text{(A-10)}$$

自由度調整済み決定係数 R_{adj}^2 では，回帰に寄与しない項が追加された場合にはその値は低下する.

A.2. t 検定による回帰係数の有意性判定

回帰モデルの各回帰係数の有意性は t 検定により評価される．各回帰係数 β_j の有意性を判定する仮説は次のようである.

$$H_0 : \beta_j = 0$$
$$H_1 : \beta_j \neq 0 \quad \text{(A-11)}$$

もし, 帰無仮説 $H_0 : \beta_j = 0$ が棄却されなければ, x_j は回帰モデルから削除される. 回帰誤差εが平均 0, 分散σ^2 の正規分布に従うと仮定すると, 各回帰係数に関する t 値は t 分布に従う. 各回帰係数の t 値は次式で表される.

$$t_0 = \frac{b_j}{\sqrt{s^2 C_{jj}}} \tag{A-12}$$

ここで, C_{jj} は最小二乗推定量 $\mathbf{b}_j$ に対応する $(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$ の対角成分, s^2 は標本分散である. また, $\sqrt{s^2 C_{jj}}$ は回帰係数 b_j の標準誤差という.

帰無仮説 $H_0 : \beta_j = 0$ は $|t_0| > t_{\alpha/2,n-k-1}$ の場合に棄却される. $t_{\alpha/2,n-k-1}$ は自由度 n-k-1, 有意水準αの t 分布の値である. t 値が実現される確率を t 分布より求め, その有意水準αより大きい場合には帰無仮説を受け入れ, 小さい場合には棄却する. t 値が有意水準より小さい場合には, その j 番目の変数が回帰モデルに寄与していないことを示すため, その変数を削除することで回帰精度が向上する. ここで, 回帰係数の t_0 は回帰モデルによって異なるため, 変数を削除, または追加することで変化する. 最適な回帰モデルを求めるためには変数を増減させる増減法や, 変数を削除及び増加させる減少法, 増加法などがある. 本論文では, まず仮定した回帰モデル (2 次多項式) の全ての変数について t 検定を実施し, 帰無仮説が受け入れられた変数の中から最も t 値の小さい変数を 1 つ削除する. その後, 変数を削除した回帰モデルを用いて再度, 全変数について t 検定を実施し, 帰無仮説が受け入れられたものがあれば, その中で t 値の最も小さい変数を削除する. この操作を, 全ての変数について帰無仮説が棄却されるまで実施する. この方法により, 自由度調整済み決定係数が高い回帰モデルを作成した. なお, 本論文では有意水準αは 5%とした.

A.3. 実験計画法

実験計画とは, 近似精度の高い回帰式を得るための実験点を選択する手法である. 一般に実験点が多ければより精度の高い回帰係数を得ることができるが, 多数の実験を行うにはコスト高となる. 従って, 少ない実験数でより高い推定精度となる回帰係数を得ることができる実験点の選択をする必要がある.

最小二乗推定量 $\mathbf{b}$ の分散共分散行列は次式で表される.

$$\mathbf{V}(\mathbf{b}) = \sigma^2 (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1} \tag{A-13}$$

ここでσ^2は応答 y の誤差分散である．式(A-13)において，最小二乗推定量の分散共分散行列$\sigma^2 (\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$のうち，$\sigma^2$は実験の場によって決まり，計画によって決まるのは$(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$である．従って，回帰式の各係数の分散を小さくするためには，$(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$が全体的に小さくなればよい．多次元の推定量ベクトルを評価する場合，その分散共分散行列の行列式で定義される一般化分散$\det(\mathrm{V}(\mathbf{b}))$を用いることが多い．一般化分散$\det(\mathrm{V}(\mathbf{b}))$を最小化することは，すなわち$\det((\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1})$を最小化することである．実験計画により実験点の組み合わせを求める方法としては A，D，G，Q 最適基準などの様々な方法が提案されている．

本研究では，梁型試験片を用いたために多数回の FEM 解析を実施してもコスト高にはならない．このため，実験計画法による解析点の選択は行っていない．しかしながら，実機適用の際には大規模数値解析を必要とするため，実験計画を用いた解析点の選択を行うことで，計算コストの大幅な削減が可能である．

参 考 文 献

[1] 矢川元基，吉村忍，計算力学 [V] －材料力学のためのニューロ応用－，養賢堂, 1997.

[2] Simon Haykin, “Neural networks: A comprehensive foundation”, second edition, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, (1999).

[3] R. H. Myers, D. C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", second edition, John Wiley & Sons. Inc., New York, (2002).

[4] 山田秀，実験計画法―方法論―，日科技連, (2004).

This page intentionally left blank

Appendix　B

－電極間電位差変化測定回路での測定値－

積層板表面電圧電極での電位を差動アンプにて増幅し, データロガーにより測定した値を P とする（図 B-1, B-2 参照）．まず，はく離発生前の測定電位は次のようになる．

$$P_0 = 1000 \times \{(V_0 + IR_R) - V_{ref}\} \tag{B-1}$$

ここで，V は接触抵抗を除いた積層板の電位，V_{ref} は差動アンプの基準電位，I は負荷電流，R_R は接地側電流電極での接触抵抗である．添え字の 0 ははく離発生前を意味する．実験では P_0 がほぼ 0 V になるように V_{ref} をそれぞれの電極部，また試験片ごとに設定した．

同様に，はく離発生後の電極部電位は次のように測定される．

$$P = 1000 \times \{(V + I(R_R + \Delta R_R)) - V_{ref}\} \tag{B-2}$$

ここで，ΔR_R は接触抵抗の変化分である．

はく離発生による電圧電極部での電位差変化は次のように算出する．

$$\begin{aligned} \Delta P &= P - P_0 \\ &= 1000 \times \{(V + IR_R + I\Delta R_R) - V_{ref}\} - 1000 \times \{(V_0 + IR_R) - V_{ref}\} \\ &= 1000 \times \{(V + I\Delta R_R) - V_0\} \end{aligned} \tag{B-3}$$

電圧電極間電位差変化にするためには, それぞれの電圧電極部での電位差変化の差を算出する．例えば，電極 A 及び B 間の電位差変化とすると

$$\begin{aligned} \Delta P_A - \Delta P_B &= 1000\{(V_A + I\Delta R_R) - V_{A0}\} - 1000\{(V_B + I\Delta R_R) - V_{B0}\} \\ &= 1000\{(V_A - V_{A0}) - (V_B - V_{B0})\} \end{aligned} \tag{B-4}$$

となる．接触抵抗の影響はこの差をとることで消去される．

本文中で示した電圧電極間電位差変化(P_i - P_{i0})での P_i は上記と異なり，電極間電位差変化を直接示しており，例えば，電極 AB 間(i = AB)では，式(B-4)に示す $\Delta P_A, \Delta P_B$ と以下の関係にある．

$$P_{AB} - P_{AB0} = \frac{\Delta P_A - \Delta P_B}{1000} \tag{B-5}$$

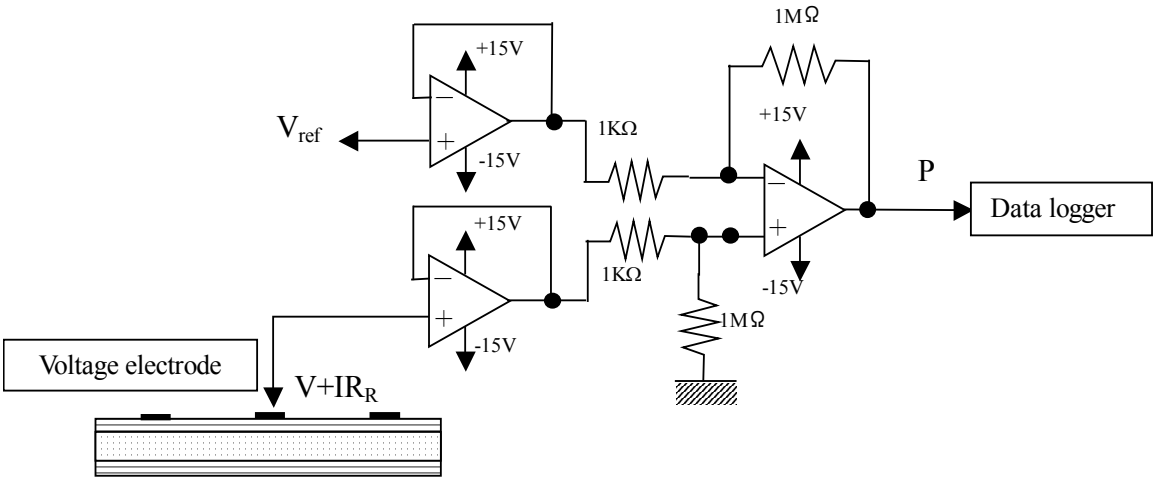
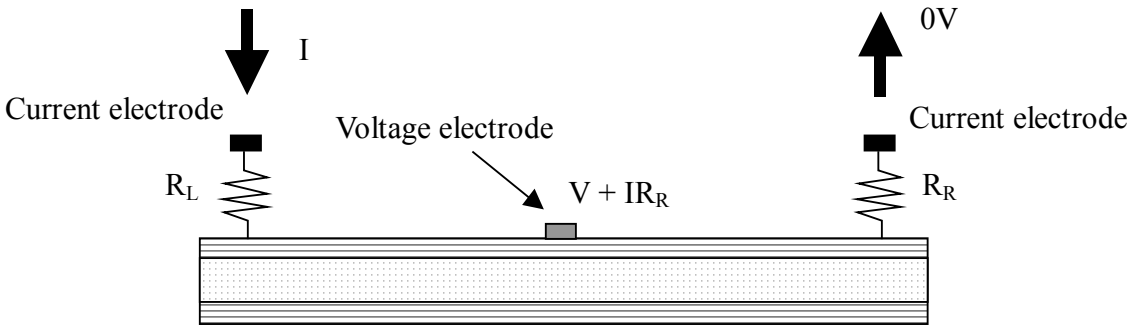


Fig. B-1 Differential amplifier



V : Electric potential at voltage electrode

R_L, R_R: Contact resistance at current electrodes

Fig. B-2 Electric potential at voltage electrode

This page intentionally left blank

This page intentionally left blank

Appendix　C

ーはく離実験結果ー

C.1.　2 段階同定電位差法に対するはく離実験結果

応答曲面作成用（測定値は増幅回路によって 1000 倍した値）

		電極間電位差変化 [V]				
		1st stage				
測定位置 [mm]	測定寸法 [mm]	BC	CD	DF	FG	GH
-82.8	3.6	0.3175	0.095	0.0475	0.01	-0.0025
-75.6	12.5	1.0175	0.2425	0.1125	0.0125	-0.0025
-75.3	6.9	0.3725	0.1125	0.06	0.015	-0.02
-68.0	3.4	0.2175	0.0625	0.035	0.0025	0.015
-60.8	8.9	0.565	0.17	0.0825	0.0225	-0.0025
-52.2	5.2	0.175	0.2325	0.1125	0.025	0.0125
-43.8	13.8	0.025	0.2575	0.1175	0.015	0.0075
-39.1	9.0	-0.0475	0.085	0.1525	0.0175	0.0125
33.9	19.8	0.0075	0.015	0.2775	0.1325	-0.14
34.2	16.6	-0.0375	-0.015	0.1125	0.12	-0.1725
37.0	20.7	0.0025	0.0225	0.1875	0.2325	-0.3325
49.5	10.5	0.0125	0.015	0.0525	0.115	0.01
52.3	10.6	0.045	0.015	0.12	0.225	0.17
53.9	11.4	0.035	0.0375	0.1725	0.4325	0.1725
63.4	14.0	-0.015	0.0025	0.16	0.5125	1.37
69.0	10.2	0	0.0075	0.0375	0.18	0.75
71.2	3.1	0.035	0.0025	0.0275	0.05	0.23
73.1	7.8	-0.03	-0.075	0.0475	0.1975	0.785
83.1	5.8	-0.025	0.04	0.01	0.045	0.365
83.9	4.3	-0.0025	0.01	0.065	0.1175	0.3975
-6.1	17.9	-0.01	-0.03	0.05	-0.01	0.005
-3.2	9.5	0.11	0.34	1.315	0.14	0.0375
-1.4	29.3	0.0175	0.095	0.67	0.1525	-0.035
2.1	25.3	-0.05	0.0125	0.6	0.05	-0.055
13.4	17.3	0.015	0.0125	0.0975	-0.035	-0.0475
17.3	16.7	0.02	0.0175	0.06	-0.085	-0.075
17.5	7.7	-0.0125	0.0125	0.65	-0.5125	-0.0375

電極間電位差変化 [V]		
2nd stage		
CD	DF	FG
-1.26	0.635	0.31
-0.795	0.925	0.1375
-1.975	-0.2675	1.515
-0.99	-0.0225	0.5875
-0.185	-0.9925	0.775
-0.3225	-1.4925	0.7125
-0.24	-0.265	0.135

はく離同定用（測定値は増幅回路によって 1000 倍した値）

		電極間電位差変化 [V]				
		1st stage				
測定位置 [mm]	測定寸法 [mm]	BC	CD	DF	FG	GH
-77.9	8.7	0.75	0.2925	0.1675	0.03	-0.0625
-74.5	8.7	0.78	0.285	0.115	0.0775	0
-73.0	4.5	0.225	0.07	0.025	0.0025	0.0075
-64.4	12.0	0.9425	0.29	0.085	0.0225	0
-56.8	11.9	0.28	0.2875	0.1075	0.0025	-0.0025
-52.3	5.5	0.115	0.155	0.0725	0.025	0.015
-48.8	8.0	-0.0175	0.1325	0.0525	0.0125	0.0125
-36.8	19.9	-0.23	0.2275	0.1025	0.005	-0.0425
-31.0	18.8	-0.2675	0.065	0.175	0.0575	0.0175
26.1	9.2	0.0125	0.0175	0.0425	-0.0025	-0.055
34.8	10.4	0.015	0.01	0.1275	0.085	-0.1925
37.5	11.4	-0.0075	-0.0175	0.1025	0.195	-0.13
43.3	9.0	0.015	0.0175	0.07	0.13	-0.095
47.5	17.8	0	-0.005	0.15	0.265	0.015
50.9	8.2	0.015	0.02	0.0725	0.1675	0.125
55.9	12.6	0	0.0375	0.2275	0.395	0.645
64.2	11.2	0.0175	0.015	0.06	0.14	0.5325
70.5	10.1	0.02	0.01	0.04	0.1	0.355
72.5	7.0	0.02	0.0275	0.0975	0.2025	0.46
-16.3	18.7	-0.0175	-0.1625	0.195	0.0575	0.0225
-15.5	9.8	-0.0375	-0.7125	0.8325	-0.04	-0.0325
-3.6	25.5	-0.1125	-0.0225	0.38	-0.02	-0.09
-2.8	23.8	-0.0825	-0.0375	0.2875	0.0125	-0.01
1.0	19.0	0.02	-0.025	0.0775	-0.0275	0.0025
10.8	15.9	-0.0125	0.0175	0.8025	-0.6675	-0.03
11.4	23.7	0.02	0.055	0.535	-0.2075	-0.06
15.9	7.5	-0.085	0.03	0.375	-0.29	-0.0025

電極間電位差変化 [V]		
2nd stage		
CD	DF	FG
-1.2775	1.07	0.3025
-0.115	0.2675	0.195
-1.0475	0.45	1.1375
-1.0925	0.385	1.21
-0.6725	0.06	0.63
-0.465	-0.5	0.6275
-0.9375	-0.785	1.8475
-0.1325	-0.3125	0.3425

等価導電率探索用（測定値は増幅回路によって 1000 倍した値）

		電極間電位差変化 [V]				
		1st stage				
測定位置 [mm]	測定寸法 [mm]	BC	CD	DF	FG	GH
31.0	11.6	0.0125	0.025	0.0775	0.0225	-0.0675
53.0	8.0	0.0075	0.015	0.0575	0.265	0.1025
69.5	10.6	0.005	0.0075	0.0375	0.18	0.77

C.2. 非対称電流負荷電位差法に対するはく離実験結果

応答曲面作成用（測定値は増幅回路によって 1000 倍した値）

		電極間電位差変化 [V]							
測定位置 [mm]	測定寸法 [mm]	AC①	CE①	EG①	GI①	AC②	CE②	EG②	GI②
-75.0	8.1	0.6775	0.11	0.01	0.0075	0.0025	-0.0025	0.0025	0
-74.2	18.4	3.34	0.7825	0.0625	0	0.3575	0.1	-0.0275	0.0125
-72.6	23.7	2.9625	0.7775	0.0525	0.0025	0.3275	0.03	0.065	0.065
-70.2	10.0	0.5325	0.2475	-0.015	0.035	0.0425	0.3325	-0.0775	-0.17
-69.4	10.8	0.4775	0.2075	0.0275	0.005	0.09	0.065	-0.095	-0.025
-62.4	20.0	3.41	1.7775	0.28	0.0325	0.365	0.45	0.0325	-0.0125
-62.3	8.8	0.26	0.21	0.0475	0.0475	-0.0325	0.1775	-0.345	-0.1925
-58.4	4.0	0.23	0.1125	0.015	0.0025	0.0125	0.04	0.005	0.02
-56.6	6.8	0.345	0.5675	0.01	0.0175	0.035	0.14	-0.135	-0.02
-56.1	3.4	0.4975	0.15	0.03	-0.0025	-0.0475	0.2475	0.0325	-0.0475
-52.1	24.0	-0.995	2.8175	0.1325	0.005	-0.26	0.57	-0.08	0.07
-52.1	12.5	-0.245	0.465	0.025	-0.005	-0.05	0.2025	-0.0225	0.085
-51.4	11.4	-0.2475	0.575	0.1075	0.0175	-0.115	0.34	-0.0075	0.0325
-46.6	15.2	-0.6475	0.675	0.0575	0	-0.3225	0.2725	0.03	0.04
-41.9	11.0	-0.35	0.5125	0.0775	0.0075	-0.3825	0.425	0.0025	-0.0475
-36.4	4.4	-0.38	0.48	0.01	-0.0025	-0.06	-0.0325	0.0525	0.1075
-36.4	11.9	-0.6425	0.7025	0.0325	-0.0075	-0.2375	0.255	0.04	-0.025
-35.8	5.8	-0.9625	1.14	0.015	-0.0025	-0.0175	-0.0575	0.05	-0.14
-35.1	25.5	-1.8775	2.2075	0.2	0.03	-2.11	1.935	0.6625	0.0825
-29.8	14.0	0.02	2.0175	0.2075	0.0075	-1.0425	0.9225	0.6475	0.055
-29.1	19.2	-0.315	0.3	0.095	0.015	-1.6525	1.0025	0.9575	0.0775
-24.7	14.2	-0.08	0.4725	0.0575	0.005	-0.7975	0.4225	0.345	0.025
-18.7	9.3	0.0875	0.315	0.14	0.045	-0.355	0.5375	0.3375	0.0225
-18.3	3.4	0.02	0.05	0	-0.005	-0.21	0.8575	0.0075	0.025
-15.1	12.0	0.0325	0.0525	-0.1175	-0.0025	-0.35	-0.3775	0.7775	0.095
-14.3	17.5	0.06	0.2575	-0.2775	-0.035	-0.5675	-0.815	1.44	0.14
-2.7	11.8	0.1	1.14	-1.015	-0.115	-0.4275	-0.885	1.1525	0.0975
6.1	7.2	0.045	0.3175	-0.2975	-0.035	-0.0325	-0.1275	0.2375	0.03
8.1	16.6	0.09	0.8625	-0.8175	-0.1275	-0.0725	-0.4175	0.475	0.0175
9.5	30.3	0.305	2.4925	-1.5225	-0.815	-0.19	-2.4225	2.87	0.21
9.8	6.5	0.025	0.2325	-0.1825	-0.045	-0.005	-0.06	0.0875	-0.0075
9.9	13.3	0.0225	0.5325	-0.39	-0.19	-0.015	-0.12	0.0475	-0.03
15.7	7.8	0.0175	0.0325	0.1075	-0.11	-0.06	0.1425	0.19	-0.1175
23.8	6.9	0.0225	0.31	0.1975	-0.565	0.015	0.0225	-0.115	0.0075
27.2	10.3	0.0575	0.39	0.45	-0.7325	-0.025	0.1475	0.05	-0.1025
27.9	3.7	0.0325	0.215	0.1775	-0.3475	-0.065	0.23	0.02	-0.125
30.1	17.4	0.0575	0.5475	0.905	-1.7525	0.0225	0.0425	1.045	-0.4975

続き

		電極間電位差変化 [V]							
測定位置 [mm]	測定寸法 [mm]	AC①	CE①	EG①	GI①	AC②	CE②	EG②	GI②
33.1	11.4	0.05	0.085	0.4225	-0.4525	0.0075	-0.025	0.89	-0.7575
33.4	8.2	0.03	0.2175	0.5825	-0.69	0.0075	0.035	0.16	-0.2275
35.0	20.0	0.0325	0.3275	1.735	-1.795	-0.01	0.07	1.4825	-1.3425
37.5	6.2	0.0225	0.1425	0.285	-0.3025	0.035	0.0425	0.5725	-0.59
43.0	6.6	0.0125	0.0375	0.2	-0.1675	0.0025	0.025	0.1425	-0.0525
44.5	10.3	0.0225	0.075	0.4125	-0.375	0.0175	-0.0575	0.6175	-0.5425
51.7	10.6	0.0125	0.045	0.1775	-0.1225	0	0.0425	0.5975	-0.3675
58.9	14.3	0.015	0.04	0.1525	0.0275	-0.005	0.1025	1.2	0.21
60.8	22.4	0.01	0.055	0.15	0.105	-0.125	0.4175	1.5775	1.055
65.2	11.6	0.01	0.0075	0.03	0.0775	-0.0275	-0.0425	0.345	0.575
66.0	9.8	0.01	0.0475	0.0475	0.09	-0.005	0.025	0.4325	1.06
67.6	10.9	0.0025	-0.005	0.0025	0.045	0.0125	0.015	0.105	0.4175
70.0	30.6	-0.01	0.0175	-0.0375	0.1725	0.0525	-0.0525	0.805	4.845
70.2	20.7	-0.0075	0.02	0.0925	0.1725	0.0325	0.0825	1.1275	1.455
79.3	12.2	0.0075	0.005	0.0175	0.035	0.0625	-0.06	0.165	1.2925
81.7	9.3	0.0125	0.0625	0.06	0.1525	0.0225	0.07	0.1875	1.075
82.5	8.4	0.025	0.0325	0.02	0.09	0.0175	-0.005	0.0675	0.9

はく離同定用（測定値は増幅回路によって 1000 倍した値）

		電極間電位差変化 [V]							
測定位置 [mm]	測定寸法 [mm]	AC①	CE①	EG①	GI①	AC②	CE②	EG②	GI②
-71.1	13.4	0.7825	0.1025	0.01	0.005	0.0425	0.075	0.03	-0.15
-65.3	16.6	1.6025	1.1975	0.135	0.0275	0.31	0.18	0.1325	0.015
-57.2	6.6	0.3875	0.29	0.03	0	0.01	0.0275	-0.04	0.0275
-47.1	12.2	-0.3975	0.4875	0.0775	0.005	-0.155	0.1775	0.0825	0.0175
-35.2	14.4	-0.575	0.4925	0.085	0.01	-0.89	0.85	0.2475	0.03
-20.3	26.5	-0.22	0.385	-0.0225	0.005	-2.185	-0.1875	2.425	0.115
-10.7	11.8	0.0275	0.035	-0.0725	0.005	-0.12	-0.2625	0.375	0.02
15.1	15.1	0.0575	1.02	-0.6325	-0.4475	-0.005	-0.0475	0.1875	-0.0075
18.9	15.3	0.17	0.9375	0.3525	-1.23	-0.005	-0.0125	0.2775	-0.1125
31.9	11.8	0.0075	0.15	0.4775	-0.6025	-0.005	0.18	0.03	-0.1675
35.7	20.1	0.0625	0.42	1.685	-1.8075	0.065	0.22	1.4775	-1.4775
49.5	8.0	0	0.0325	0.14	-0.1275	0.005	0.0975	0.28	-0.3025
56.4	24.4	-0.005	-0.0275	0.2225	-0.14	0.0125	0.0375	1.6175	0.645
63.0	12.6	-0.0125	-0.0775	0.0025	0.08	-0.005	0.115	0.4	0.7275
67.9	19.8	0.015	0.0175	-0.0075	0.0825	0.0325	0.075	0.5125	2.125
80.2	8.6	0.005	0.0225	0.015	0.1675	-0.06	0.12	0.0475	1.445

等価導電率探索用（測定値は増幅回路によって 1000 倍した値）

		電極間電位差変化 [V]							
測定位置 [mm]	測定寸法 [mm]	AC①	CE①	EG①	GI①	AC②	CE②	EG②	GI②
-64.9	17.8	0.86	0.6925	0.0225	0.0175	0.05	0.085	0.0275	0.01
-52.7	20.7	-0.7775	2.3875	0.2625	0.035	-0.2025	0.5225	0.2	0.0125
8.4	22.7	0.26	2.215	-1.535	-0.765	-0.0975	-0.5025	0.6725	0.1925
29.9	10.2	0.0775	0.265	0.4525	-0.6225	-0.0275	0.1675	0.05	-0.135

謝　辞

著者が東京工業大学 大学院理工学研究科 機械物理工学専攻 博士課程在学中の3年間の研究を遂行し，その成果をまとめるにあたり，多くの方々に御助力を頂きました．稿を終えるにあたり，ここに記して深甚なる感謝の意を表します．

横浜国立大学 小林英男教授には多くの御助言を頂きました．研究内容に関することのみならず，研究姿勢についても御指導頂き，先生から学んだことは人生の財産となるものでした．

東京工業大学 轟章助教授には本研究を遂行するにあたり，適切な御指導，御鞭撻を頂きました．また，日頃からの議論や，学会発表の機会を多く与えて頂いたことなど，3年間で著者の力を大きく伸ばすことができたのは御懇篤な御指導によるものです．謹んで深く感謝いたします．

東京工業大学 岸本喜久雄教授，萩原一郎教授，黛正巳教授，足立忠晴助教授，水谷義弘助教授には，本論文に対して有益な御討論と，数多くの貴重な御意見を頂きました．

日本大学 西村哲教授，中村義隆教授には学位取得にあたり様々な御支援を頂きました．

静岡大学 島村佳伸助教授，群馬大学 岩崎篤助教授，石川島播磨重工業株式会社稲田貴臣氏，東京工業大学 小出孝道技術職員には研究全般に対して御助言を頂きました．

各位に心から感謝いたします．

2006年2月21日

上田　政人