

博士学位論文

モータ固定子内部で発生する
絶縁不良箇所検出に関する研究

平成 26 年 3 月

茨城大学大学院理工学研究科
情報・システム科学専攻

中山 健一

Abstract

In modern automobiles, the ratio of the electric motors used has been increasing every year. Therefore, it is important to produce motors with high quality in automobile manufacturing. The quality of the motors depends on insulation characteristics of the stator coil. And the strict insulation test being conducted during the manufacturing process of the stator ensures quality of coil. However, this test cannot show the defect point of the insulation and so it is difficult to rework or repair the stator. If we could know the insulation defect point, the stator can be reused by minor repair and the improving productivity.

In a large scaled motor for use in a power plant, the electrical partial discharge due to the insulation defect at the stator coil, has been monitored by non-wired measuring systems. However, this monitoring system does not determine whether the motor works normally or not, and is not used to predict the location of the electric partial discharge point. We are able to measure the electromagnetic radiation caused by partial discharge at defects and determine location. Artificially we made an insulation defect at the edge of the stator core. In order to cause partial discharge, we peeled off enamel film of wire. The enamel wire conductor is exposed from the insulating paper.

Chapter 4 shows the measurement method. A shielded loop antenna measures range 5MHz-1000MHz of the frequency by using Anritsu's EMI probe MA2601 B. The digital oscilloscope used is Tektronix's DPO4104. Applied voltage was measured with the oscilloscope by using a high voltage probe of 1000:1. The antenna is terminated with $50\ \Omega$ at input point of the oscilloscope. The shielded loop horizontal and vertical antenna is placed in close proximity of

the inside of stator.

Chapter 5 shows a probability distribution of with and without insulation defect of the stator sample. From these results we can conclude that location of defect is available by applying equal to or higher voltage than PDIV, with electromagnetic radiation.

In this paper, we propose the measuring system of electromagnetic radiation to predict the insulation defect point due to electric partial discharge. Chapter 6 is concluded with major remarks.

目次

第1章 序論.....	5
1.1 研究の背景.....	5
1.2 本研究の背景と従来の研究.....	7
1.3 研究の概要.....	9
1章 参考文献.....	10
第2章 自動車向け駆動用モータの構造と課題.....	13
2.1 緒言.....	13
2.2 モータの歴史と種類.....	13
2.3 モータの回転原理.....	15
2.4 駆動用モータのシステム構造.....	18
2.5 駆動モータの構造と製造工程.....	20
2.6 ステータの絶縁検査と課題.....	24
2.7 大型電動機のトラブル事例.....	30
2.8 結言.....	32
2章 参考文献.....	33
第3章 ステータ構造における絶縁不良の課題.....	35
3.1 緒言.....	35
3.2 本実験サンプルのステータ構造.....	35
3.3 結言.....	41
3章 参考文献.....	42
第4章 微小ループアンテナを用いたステータの絶縁不良部検出測定方法.....	43
4.1 緒言.....	43
4.2 絶縁耐圧試験機を用いた絶縁不良部測定方法.....	43
4.3 微小ループアンテナの構造.....	46
4.4 結言.....	52
4章 参考文献.....	53
第5章 放電現象を利用したステータ絶縁不良部検出に関する実験結果.....	54
5.1 緒言.....	54
5.2 微小ループアンテナによる絶縁不良部検出.....	54
5.3 絶縁不良部有無による検出確率の相違.....	68
5.4 ループ径違いによる絶縁不良検出の測定.....	73
5.5 結言.....	82
5章 参考文献.....	84
第6章 結論.....	85
謝辞.....	87
研究業績.....	89

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

近年、環境負荷低減が求められる中、電気自動車 EV (EV: Electric Vehicle) やハイブリッド自動車 HEV (HEV: Hybrid Electric Vehicle), 直接充電できるプラグインハイブリッド P-HEV (P-HEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle) と呼ばれる次世代自動車に注目が集まっている。

現在、HEV や EV が量産化され、更に車種展開が進められている。モータはエンジンと比べ、反応の速さと制御のしやすさがある。これら自動車の内燃機関に代わりモータを使用すると、エネルギー効率が低い。自動車用モータに伴い材料などで新技術が採用され、それらの技術を一般家庭で使用されるモータにも適用されてきている [1-1]- [1-2]。

モータは図 1-1 に示すようにマンションやビルのエレベータや商業施設のエスカレータ、工作機械、空調装置など、あらゆるところに使われている [1-3]。モータの消費電力は、国内の総消費電力量 9850 億 kWh のうち 50% 以上にも及び、モータの効率を 1% 向上させることができれば、約 1.5 基分の原子力発電所の電力を削減することができる試算になるといわれている。

トヨタ自動車株式会社は HEV の世界累計販売台数が 2013 年 3 月末で 500 万台を突破した。1997 年 12 月に販売された HEV のプリウスから本格的な普及が始まり、本田技研工業株式会社や日産自動車株式会社だけでなく、海外メーカーからも相次いで発売された。今後、世界で HEV, EV が普及していくものと思われる。2020 年には世界で年間 1000 万台以上の市場になると予想されている。

EV はエンジンやトランスミッションなどの部品が不要となるため、モータ、インバータ、バッテリーといった電気部品が主要部品となる。従来、ガソリン自動車 1 台あたりの部品点数は 2 から 3 万点といわれているが、EV は構造がエンジン車ほど複雑でないため、およそ半分の部品点数まで削減することができると言われている [1-4]。構造が比較的簡単であるため、各部品を各メーカーから調達して車体に組み込みさえすれば自動車を作ることが可能となった。

このため、シリコンバレーの Tesla Motors 社や、Li-ion Motor 社、American Electric 社、Myers Motors 社はベンチャー企業として電気自動車に参入している。既存の自動車メーカーとベンチャー企業との競合が激化する可能性があるため、自動車産業に大きな変化が起こることが予想される[1-5]。

今後、主要部品といわれるモータ、インバータ、バッテリーのモジュール化、材料開発や生産技術の開発がますます重要になっている。さらに、自動車部品の信頼性向上は重要な課題でもある。モータのステータでは特に、コイルの高密度巻線の小型化、高効率化が求められている。自動車の燃料消費量は車体重量に比例して増加することから、車体重量を軽くすることが必須となっている。つまり、車体に搭載されるモータやインバータ、バッテリーを含めたあらゆるコンポーネントには、実装スペースの制限も含め、小型・軽量化が強く望まれている[1-6]。

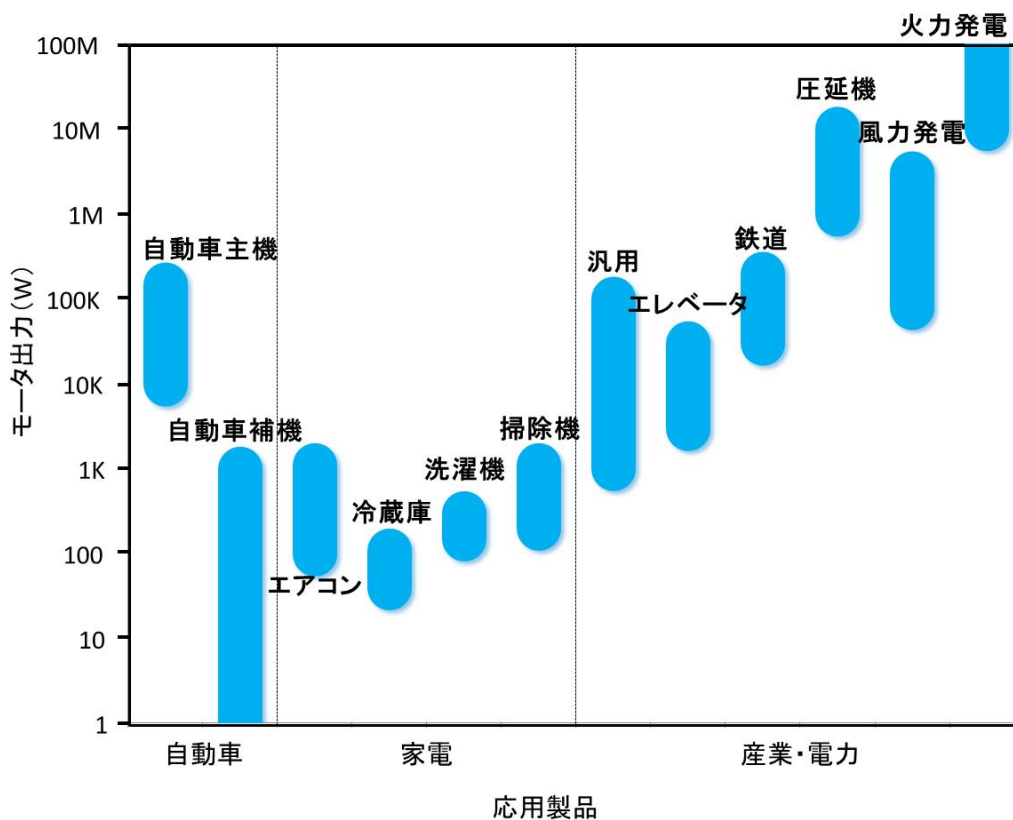


図 1-1 産業に使用されるモータ

1.2 本研究の背景と従来の研究

EV, HEV の主要部品として使用されるモータは小型・軽量, 高効率の要求が高まっている。その中で, モータを高効率で駆動させるために, インバータの高速なスイッチングを行う IGBT と制御方式によって, 正弦波電流を作り出している。しかし, この高速なスイッチングによって過大なインバータサージがモータに印加される。インピーダンスの不整合によりサージの反射が発生しステータコイル間に高電圧が発生し, それに伴いコイルの絶縁劣化が生じる恐れが懸念されている。インバータサージ対策が新たな課題となっている [1-7]-[1-8]。さらに, 電磁ノイズを発生させる EMI/EMC の問題も発生している [1-9]-[1-10]。

これらに対してモータの材料開発による対策が報告されている。部分放電によってエナメル皮膜の絶縁層の劣化が促進されるため, 課電寿命を向上させたコイルが開発されている。さらに, トランスミッション内にモータが組み込まれているため, モータは小型化が要求され, ミッションオイルに浸った高温環境に置かれる [1-11]。エナメル線の耐熱化・高電圧化が進み, さらに耐サージ性エナメル線が開発されている [1-12]-[1-13]。

一方, 絶縁破壊事故を未然に防止するという観点から, 絶縁欠陥部位を特定することが有用である。これまで大型発電機を対象として部分放電を測定し劣化診断や, 余寿命予測を行う報告や [1-14] ~ [1-16], 光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier Tube) や, 真空放電試験装置を用いて, ステータ巻線を模擬したツイストペアコイルやステータの絶縁欠陥部位を視覚的に捉える方法が報告されている [1-17]。さらに, 放電電流を測定する CT (Current Transformer) 法や検出インピーダンス法によって絶縁劣化寿命を評価する検討も進められている [1-18]。

モータのステータ製造工程において, エナメル線や絶縁紙の損傷により絶縁

不良が発生することがある。通常の生産ラインにおいて絶縁耐力試験を行い十分な絶縁耐力があるか確認する。そこで、この絶縁耐力試験時に絶縁欠陥部があった場合、位置を特定できれば不良原因を把握でき、前工程にフィードバックし信頼性の高いステータを生産することができる。また、定期点検でモータをオーバーホールしたときに異常の有無を容易に確認できる。

製造工程内の放電位置検出方法として放電による電磁波をアンテナで検出する試みが報告されている。モータ巻線に絶縁不良があると、不良箇所において放電が発生することに着目[1-19]して、電磁波の検出時間と信号強度から絶縁劣化した場所を特定する手法がある[1-20]が、放電自体のばらつきが存在するため不良部を検出できない場合が予想される。また、予め巻線間の分担電圧を測定しインパルス電圧を印加して巻線間の異常を判断する手法[1-21]は、製品毎の専用装置となってしまうためコスト増が問題となる。このように実際のモータ構造での電磁波による測定は非常に難しいことがわかる。そこで、モータの絶縁診断を目的として基礎的な研究としてサンプルコイルを用いてアンテナで測定する検討も進められている[1-22]-[1-24]。

放電位置検出方法として放電からの電磁波をアンテナで検出する試みが報告されているが、一般的な検査工程である絶縁耐力試験時にループアンテナを用いて、絶縁欠陥部位を特定するための測定手法は報告されていない。以上を踏まえ、本研究の背景及び意義を述べるとともに、本研究のステータに正弦波を印加したとき、ループアンテナを用いた絶縁欠陥部を特定する手法について述べる。本論文は実物のステータで測定し、一般的な検査工程である絶縁耐力試験時に不良箇所を特定するための処理方法やアンテナ配置を明らかにする。さらに、基礎実験はなされているが実物のモータなどのものはなく、実際のもので有効なのかを明確化することである。

1.3 研究の概要

本論文は、インバータ駆動の交流モータにおけるステータ巻線部の絶縁不良箇所を、絶縁耐力試験時に、絶縁不良に伴って発生する放電を電磁的に検出し、モータ製造工程にフィードバックすることで、製品の信頼性向上、歩留まり向上に貢献することを目指している。

具体的には、絶縁耐力試験時の電圧印加時にステータから発生する部分放電に伴う電磁波測定の可能性、測定方法、実物モータによる測定データの提示とその信頼性評価について述べている。論文は1章で研究の背景、論文の構成、2章で自動車用モータの構造、特性、技術的課題を整理している。3～5章では測定方法の提案と手順、放電電磁波検出のためのループアンテナの配置方法の検討結果、放電検出電圧測定値とその性質、及びこれらの測定結果をもとに、絶縁不良箇所である放電部位を特定するアルゴリズムの提示と測定データによる検証結果を述べている。6章で論文全体を総括し、結論をまとめている。研究内容は以下のとおりである。

最初にモータのステータ巻線とステータコア間に正弦波電圧を印加したとき、部分放電による電磁波が微小ループアンテナを巻線近傍に設定することにより、高速オシロスコープを用いて観測できることを確認する。絶縁不良部位置と電磁波検出レベルの関係を明らかにするため、エナメル巻線、絶縁紙にキズを付けることで擬似的に絶縁不良箇所を設け、微小ループアンテナの位置を変えて電磁波発生量の測定を行う。最後にこれらの実測データをもとに、絶縁不良箇所を特定する測定手順を提示し、放電現象観測により絶縁不良箇所を診断できることを明らかにする。

1章 参考文献

- [1-1] 堀洋一, 寺谷達夫, 正木良三:「自動車用モータ技術」, 日刊工業新聞社, (2003)
- [1-2] 久部泰史:「応用範囲が広がるブラシレス・モータ」トランジスタ技術, No. 4, 2011. 1
- [1-3] 三上浩幸, 井出一正, 清水幸昭, 妹尾正治, 関秀明:「進化するモータ (特集 電池・電動コンポーネント)」日立評論 No. 92, pp. 928-933, (2010-12)
- [1-4] 「“トヨタ流” ハイブリッドが米国の主役」日経エレクトロニクス, pp. 61-68 (2011-2)
- [1-5] 「特集 新生モータ全開 電動車両が進化を牽引」日経エレクトロニクス, pp. 37-54 (2010-9)
- [1-6] 日本特許, 日立オートモティブシステムズ株式会社:「永久磁石回転電機及びそれを用いた電動車両」, 特許公開 2013-225997
- [1-7] 大石和城, 吉岡靖浩:「インバータ駆動電動機におけるサージ対策の基礎検討」明電時報, 2010年 No. 3
- [1-8] 「インバータサージの絶縁システムへの影響」電気学会技術報告・No. 739号, 1999
- [1-9] 誘導機の高性能化技術調査専門委員会:「誘導機の高性能化技術」電気学会, No. 997, (2004)
- [1-10] 小比賀亮介, 石井禎, 立松義伯, 長田克巳:「インバータ機器用エナメル線の開発」古河電工時報 No. 112 (2003-7)
- [1-11] 鬼丸貞久, 松井啓仁, 田口知成, 大高健二, 市岡英二, 水谷竜彦:「ハイブリッド電気自動車 (HEV) のATFを用いたモータ冷却構造の熱解析」, デンソーテクニカルレビューVol. 13 No. 1 pp. 19-25(2008)

- [1-12] 菊池英行, 鉄芳之, 糸永貞美: 「省エネモータの信頼性向上に対応した耐インバータサージエナメル線」, 日立電線”, 2002.1 No. 21
- [1-13] 菊池英行: 「ナノコンポジット材料によるエナメル線の耐部分放電性向上に関する検討」, (2013)
- [1-14] D.Fabiani, A.Cavallini, and G. Montanari: 「A UHF Technique for Advanced PD Measurements on Inverter-Fed Motors」, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 5 pp. 2546-2556 (2008)
- [1-15] 松本聡, 渋谷義一, 西村延晃, 稲葉宣考, 小倉竜一, 平林朋也, 藤崎 満: 「3 軸ループアンテナの部分放電検出特性」, 電気学会研究会資料, EWC-10-13, pp. 25-30 (2010-2)
- [1-16] 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 武蔵谷敏男, 黒木悟, 大澤輝也, 田中宏毅: 「発電機固定子コイルの絶縁破壊現象に伴う GHz 帯放射電磁波測定による絶縁劣化診断法」, 電学論 B, Vol. 118, No. 3 pp. 274-281 (1998-3)
- [1-17] N. Hayakawa, M. Morikawa, and H. Okubo: 「Partial Discharge Inception and Propagation Characteristics of Magnet Wire for Inverter-fed Motor under Surge Voltage Application」, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 1 pp. 39-45 (2007)
- [1-18] 尾畑功治, 福士慶滋, 武内良三: 「インバータサージ電圧下の課電寿命特性」, 電学論 A, Vol. 125, No. 3, pp. 261-267 (2005-3)
- [1-19] 大久保仁: 「高電界現象論 基礎と応用」, オーム社, (2011)
- [1-20] 日本特許, トヨタ自動車株式会社: 「ステータの絶縁不良箇所特定方法及び絶縁不良箇所特定装置」, 特許公開 2005-69745
- [1-21] 日本特許, 株式会社東芝: 「回転電機巻線の製造工程内絶縁試験方法及び回転電機巻線の製造方法」, 特許公開 2010-8199
- [1-22] 岡田真一, 福永顕一, 大塚信也, 木村健, 匹田政幸: 「繰り返しインパ

ルス電圧下でのツイストペアにおける PD 放射電磁波の検出」, 平成 19 年電気学
Vol. 2007, pp. 55(2007-3)

[1-23] 伊豆田明宏, 山本欣輝, 衛藤洋史, 工藤裕紀, 藤本真人, 矢原直幸, 小
迫雅裕, 匹田政幸, 堀田計之:「微小ループ型センサによる高圧回転機用モデル
コイルの部分放電放射電磁波の測定」, 平成 23 年電気学会全国大会, Vol. 2011,
pp. 47(2011-3)

[1-24] 謝鵬, 早川直樹, 花井正広, 大久保仁:「繰返しサージ電圧下におけるエ
ナメル線の部分放進展および絶縁破壊特性」, 平成 23 年電気学会全国大会,
Vol. 2011, pp. 118(2011-3)

第2章 自動車向け駆動用モータの構造と課題

2.1 緒言

まず、第 1 章では、自動車業界のモータ動向について述べた。自動車は単位時間あたりの生産台数が多いため、生産性を上げることが重要である。その中で主要部品といわれるモータ、インバータ、バッテリーも生産性の向上を図る必要がある。ステータは生産ラインにおいて短時間で出荷検査を行い十分な絶縁耐力があるか確実に検査することが必要である。世界で HEV, EV が普及していくと、使用環境に応じた信頼性を確保することが重要となってきた。2 章では自動車用モータの構造、特性、技術的課題を整理している。

2.2 モータの歴史と種類

マイケル・ファラデーはフランソワ・ジャン・ドミニク・アラゴによって発見されたアラゴの円板を改良して発電機を作った。これらの実験的な装置から始まり 2 世紀経った現在では解析技術や材料開発、生産技術により技術革新が進み自動車分野に幅広く用いられるようになった[2-1] (図 2-1 参照)。

自動車にはモータが 60 個以上さらに高級車になると 100 個以上搭載されている。駆動用モータは電動車駆動用モータに要求される出力やトルク、モータ寸法などの仕様もさまざまであり、モータも自動車用に多様化している[2-2]。

一般的にはモータの分類の仕方には色々な方法があるが、電源の種類、駆動原理、内部構造、形状・外観、用途などによって分類される。図 2-2 はその分類例で、直流モータおよび交流モータに大きく分けることができる。

自動車駆動用によく用いられるものは永久磁石式同期モータ、誘導モータである。効率、体格、重量などの面で優れていることから駆動モータとしては主

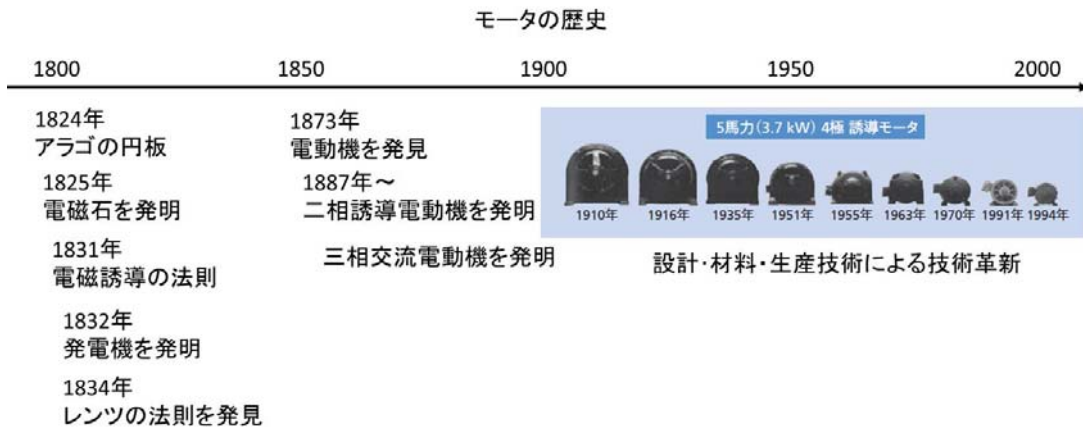


図 2-1 モータの歴史

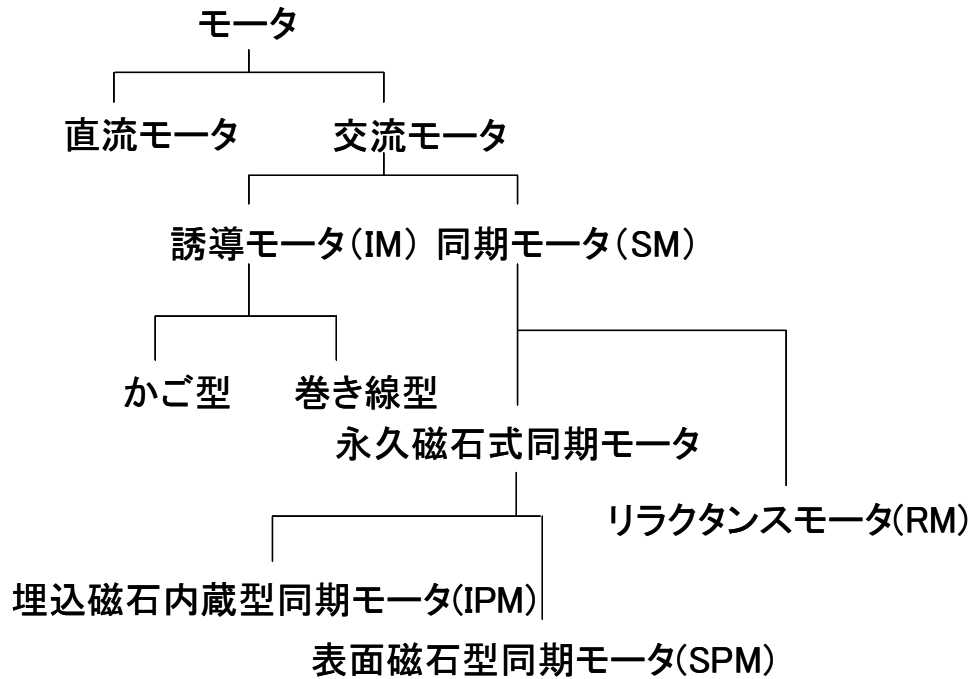


図 2-2 モータの分類

に永久磁石式同期モータが使われている。永久磁石式同期モータは効率や制御装置が容易であり、誘導モータは堅牢性や高速性に優れる。

永久磁石式同期モータは希土類磁石のひとつであるネオジム磁石により強磁性化と耐熱性向上により、トルク、小型化などを満たすことができるようになった。それに伴い、エンジンからモータに置き換えにより大幅な二酸化炭素排出量の削減が期待されてる。高出力なモータを高効率で駆動制御するインバータと組合せることで、自動車を高効率に制御できるため、低燃費かつ低排出ガスを実現している[2-3]。

2.3 モータの回転原理

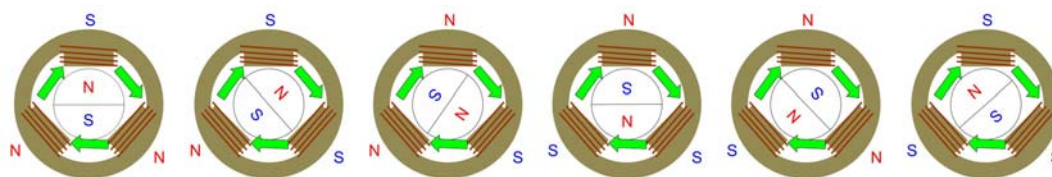


図 2-3 交流モータの回転の原理

交流モータは、ステータにコイルを使用し、そこに駆動用電源となる交流電流を流す。交流電流は、電圧のプラスとマイナスが交互に入れ代わる性質を持っている[2-4]～[2-7]。これによってコイル側に、回転する磁界（磁界の方向が回転している磁界）が発生し、この回転磁界に回転子が引き寄せられて回転する。図 2-3 に交流モータの原理を示す。ロータが回転磁界と同じ速度で回転するところが特徴である。回転に必要な回転磁界を電氣的につくるには次のように行う。図 2-3 のように固定子に三つの巻線を 120° ずらして配置した三相巻線を施す。三相巻線の各端子に三相交流を流す。すると、時刻とともに回転

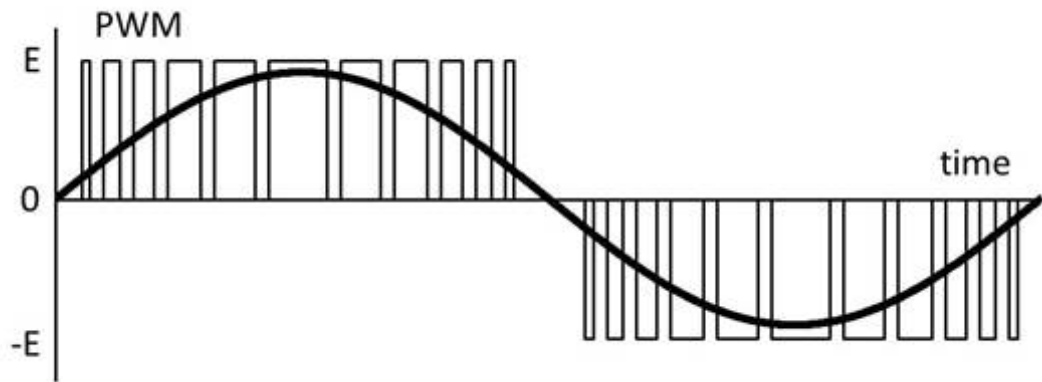


図 2-4 パルス幅変調した信号

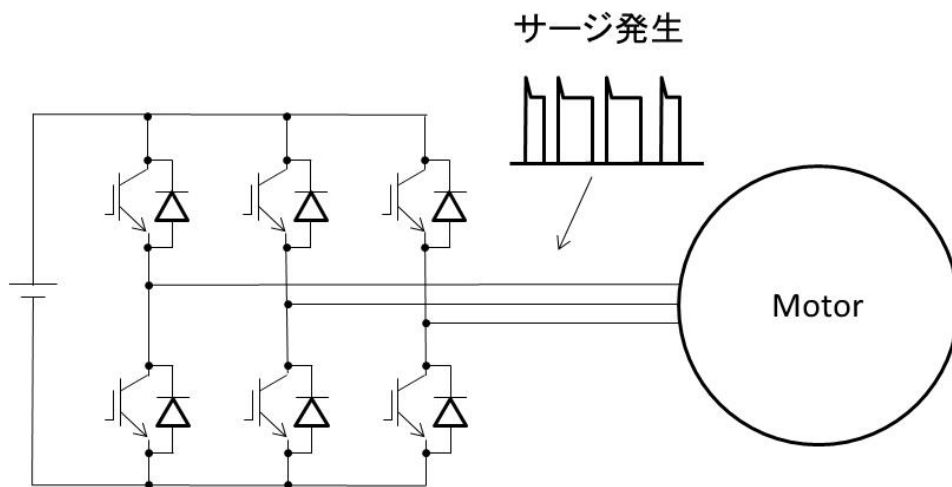


図 2-5 インバータ動作原理

する回転磁界ができる。以上は、2極の例であるが、4極、6極のモータもステータの配置などを変更することにより容易に構成できる。

自動車駆動に用いられている永久磁石式同期モータは、近年では出力電圧の位相等をインバータ制御を用いる。インバータ制御は始動時のトルク制御や高速運転への移行が容易にでき、可変電圧可変周波数制御 VVVF (VVVF : Variable Voltage Variable Frequency) を容易に実現することができる。

インバータでは、整流回路を用いて直流にし、IGBT (IGBT : Insulated-Gate Bipolar Transistor) や MOSFET (MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) といったパワートランジスタやサイリスタなどで高速スイッチングを行うことで矩形波形を作り、任意の周波数で任意の電圧を作る [2-8]。このような VVVF 制御と言う。インバータ回路により発生させた図 2-4 に示すような正弦波をパルス幅変調 PWM (PWM : Pulse Width Modulation) した信号によって駆動する。バッテリー電圧もしくは DC-DC コンバータによる電圧を直流入力電源とし、三相交流をモータに印加する。

パルス電圧の立ち上がりが急峻なため、オーバーシュートによってサージが発生する (図 2-5 参照)。このサージが電源ケーブルを介してモータに印加されるが、電源ケーブルが持つインダクタンスの影響やモータと電源ケーブルのインピーダンス不整合による反射によってインバータ出力の約 2 倍程度まで増大する。増大した電圧がモータに印加されるとモータの巻線コイル間やコア間の絶縁性能が悪化し、絶縁不良になってしまう恐れがある。

2.4 駆動用モータのシステム構造

エンジンとモータという2つの動力源を持つハイブリッド車を説明する. ハイブリッド車には, 大別してシリーズ・ハイブリッド, パラレル・ハイブリッドという方式がある[2-9]~[2-11].

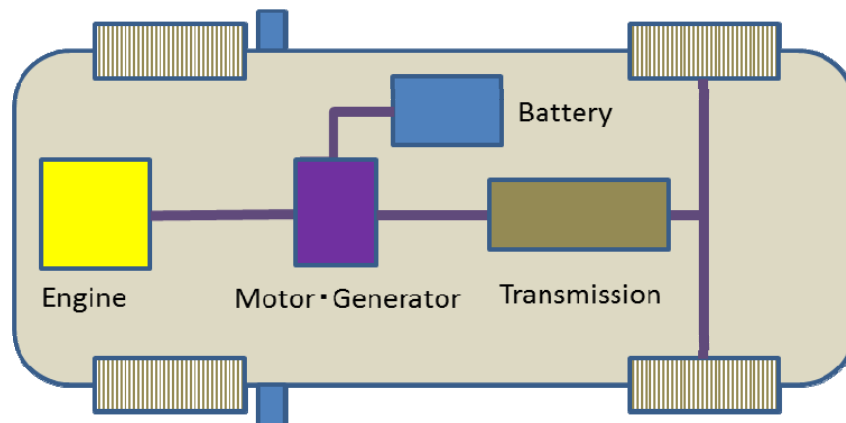


図 2-6 パラレル・ハイブリッド

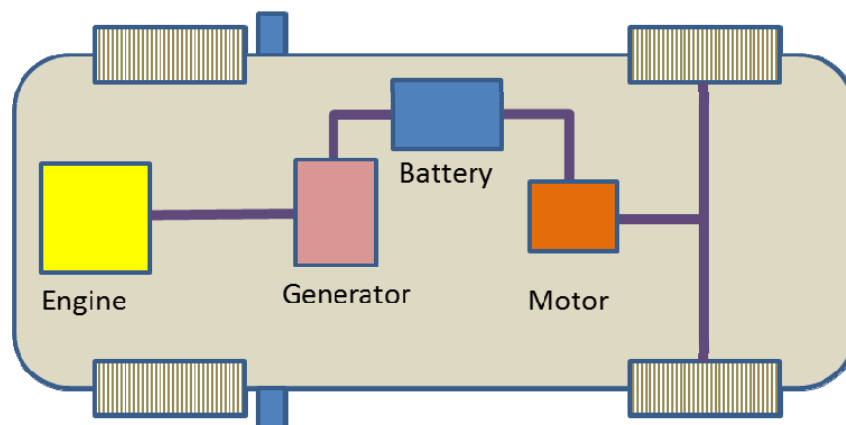


図 2-7 シリーズ・ハイブリッド

図 2-6 はモータもエンジンも車輪の駆動に使うのがパラレル・ハイブリッドである。減速時のエネルギー回生やモータで走行していないときの発電には、モータを発電機の代わりとして使う。

パラレル・ハイブリッドは、モータとエンジンを共に車輪の駆動に利用することで、トルクの不足を補い合える。モータとエンジンのトルク配分を適正化することで効率を上げる。

図 2-7 はシリーズ・ハイブリッドである。エンジンで発電機を回して発電やバッテリーへの充電を行い、その電力を使ってモータで車輪を駆動する方式である。エンジンを発電専用に使ひ、モータ以外に発電機を搭載する。また、モータは減速時のエネルギー回生にも利用する。

エンジンを発電専用にするため、効率の良い領域（回転数やトルク）でエンジンを回せることが特徴である。ただし、全領域でモータ走行となるため、高出力のモータが必要となり、モータにおいては効率の悪い領域も使わなければならない。モータは車内に組み込まれているため、モータは小型化が要求され、ミッションオイルに浸った高温環境に置かれる場合もある。

2.5 駆動モータの構造と製造工程

ハイブリッド自動車に用いられるモータについて説明する。図 2-8 はモータの全体構造と内部を断面で示している。モータは、ケース 1 の内部に配置される。ケース 2 はステータコアを保持する。このステータ内には回転自在に配設されるロータが備えている。ケース 1 は、エンジンのケースや変速機のケースなどによって構成されている。

このモータは、永久磁石式同期モータである。モータは、ステータコアに巻線されるステータコイルに三相交流が供給されることで、ロータを回転する。また、モータは、エンジンによって駆動すると、発電機として作動して三相交流の発電電力を出力する。つまり、モータは、電気エネルギーに基づいて回転トルクを発生する電動機としての機能と、機械エネルギーに基づいて発電を行う発電機としての機能の両方を有しており、自動車の走行状態によって機能を選択的に利用することができる。

ステータは、円筒状のステータコアと、このステータコアに巻線されるステータコイルで構成される。ステータコアを構成する電磁鋼板を図 2-9 に示す。ステータコアは、軸方向に平行な複数のスロットが周方向に等間隔となるように形成されている。さらに図 2-9 に示していないが、スロットにステータコイルが収められる。ステータコアのティースは、ステータコイルによって発生した回転磁界をロータに導き、ロータに回転トルクを発生させる働きをする。ステータコアは、電磁鋼板を打ち抜き加工またはエッチング加工により成形し、成形された円環形状の電磁鋼板を複数枚積層されている。さらに、ステータコイルは三相のスター結線/デルタ結線された相コイルを構成し、断面が四角形状の平角エナメル線であって、スロットの内部の断面をできるだけ有効に利用し、スロット内の空間が少なくなるような構造とすることが効率の向上につながっている。この平角エナメル線は外周がエナメルの絶縁被膜で覆われている。

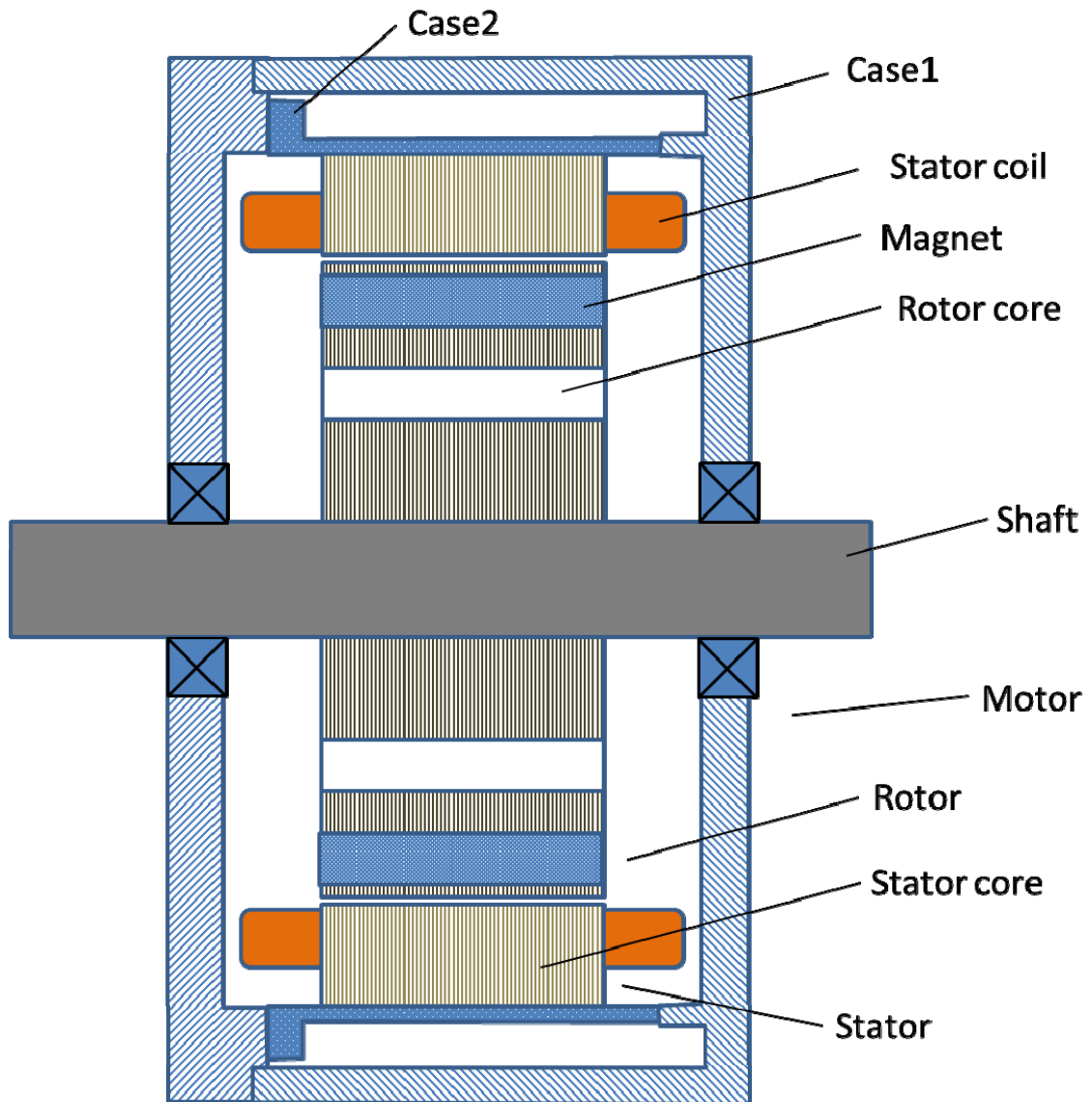


図 2-8 モータ構造

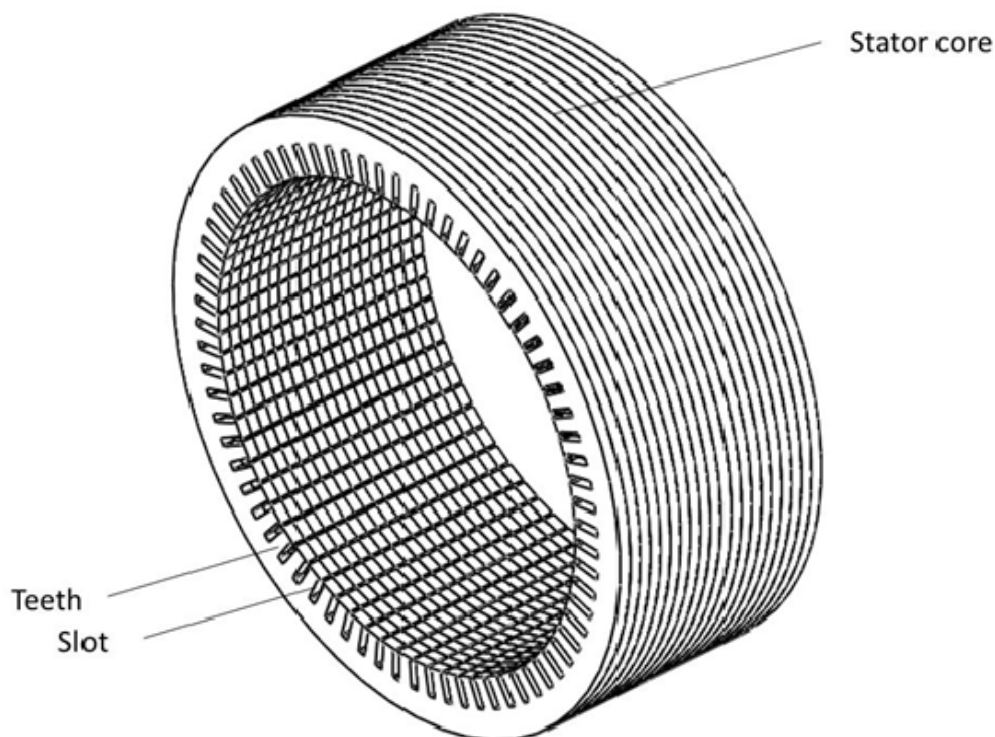


図 2-9 ステータ構造

ステータは、この交流端子U、V、Wを介して電力変換装置に接続されることで、交流電力が供給されるようになっている。ステータコイルは、エナメル製の絶縁被膜で覆われた構造となっている。電気的な絶縁性が維持されているが、絶縁被膜に加えて絶縁紙絶縁ワニスなどにより絶縁を維持することができる。

次にロータについて説明する。ロータはロータコアに設けられたスロットに永久磁石が保持されている。ロータコアには、磁石を挿入するスロットが外周部近傍において周方向に等間隔で形成されており、スロットには永久磁石が埋

ステータ	ロータ	モータ組立	出荷検査
ステータコア	ロータコア	ステータ組付	出荷試験
絶縁紙挿入	磁石挿入	ロータ組付	梱包
巻線	バランス確認		
絶縁処理			
絶縁検査			

図 2-10 モータ製造工程

め込んでいる。ステータコアやロータコアは、モータを構成する主要部品である。モータの性能を設計通りに引き出すためには、ロータコアやステータコアに永久磁石やコイルが挿入され、精度良く組立られなければならない。さらに、ステータはコイルの高密度巻線の小型化・高効率化が求められている。

これらの製造手順を図 2-10 に示す。永久磁石は、ロータの界磁極を形成するものである。各磁極を形成するための永久磁石を複数に増やすことで、永久磁石が発する各磁極の磁束密度が大きくなり、磁石トルクを増大することができる。永久磁石の磁化方向は径方向を向いており、界磁極毎に磁化方向の向きが反転している。すなわち、ある磁極を形成するため永久磁石のステータ側の面がN極、シャフト側の面がS極に磁化されていたとすると、隣の磁極を形成する永

久磁石のステータ側の面は S 極，シャフト側の面は N 極となるように磁化されている。

三相交流がステータコイルに供給されることによりステータに回転磁界が発生すると，この回転磁界がロータの永久磁石に作用して磁石トルクが発生する。つまり，ロータには，この磁石トルクに加えて，上述のリラクタンストルクが発生するので，ロータには上述の磁石トルクとリラクタンストルクとの両方のトルクが回転トルクとして作用し，大きな回転トルクを得ることができる構成となっている。

これらのモータは車体重量を軽くすることが必須となっている。モータは駆動力であると同時に自らが荷重となるため，燃費向上，走行距離の向上のためには高出力密度化，高効率性能を実現しなければならない。

2.6 ステータの絶縁検査と課題

表 2-1 モータ絶縁検査項目 [2-12]

試験項目	検出箇所
絶縁抵抗試験	ステータコイル—ステータコア間
絶縁耐圧試験	ステータコイル—ステータコア間
部分放電試験	ステータコイル—ステータコア間，ステータコイル間
インパルス試験	ステータコイル間
線間抵抗試験	ステータコイル間

表 2-1 に示したようにステータコイルの絶縁状態を確認するための試験がある。具体的には，絶縁抵抗試験，絶縁耐圧試験などのステータコイルとステータコアとの間を対象とした試験と，インパルス試験，線間抵抗試験などのステータ

タコイル間を対象とした試験がある。インパルス放電試験などの各相のステータコイル間（例えばU相コイルとV相コイルの間などの異相コイル間）を対象とした絶縁試験などが行われる。

絶縁検査は、製造時と運転中あるいは保守・点検時に継続的に行われる。これ以外にも吸収電流試験、誘電正接試験、交流電流試験などがあり絶縁劣化診断を行っている。コイルの絶縁層は高電界で使用されるため運転中に劣化して絶縁破壊すると直ちに運転不能に陥ることもある。このため、絶縁体の劣化を的確に診断して、絶縁破壊する前に更新や修理することが求められる。

各種試験で得られた結果と製造時の試験結果を比較することによって、機器自体やそれを構成する部品の絶縁劣化を検出し、それをもとに機器、部品の偶発故障機、劣化・摩耗期での長期信頼性、機器や部品の安全性を確認することが目的である。しかしながら、各種試験結果と劣化の進行状況および機器・部品の残存寿命との関係を知ることは容易ではなく、各メーカーともさまざまな試験法を実施している。

図 2-11 にコイル-コア間において絶縁紙に破損を加え欠陥箇所としたものに対して交流電圧を印加する場合を示す. コイルとコアは無限に広いものと仮定する. エナメル質と絶縁紙の誘電率を ϵ_1, ϵ_2 厚さを d_1, d_2 各層に加わる電界を E_1, E_2 とすると

$$E_1 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} V$$

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2 d_1 + \epsilon_1 d_2} V$$

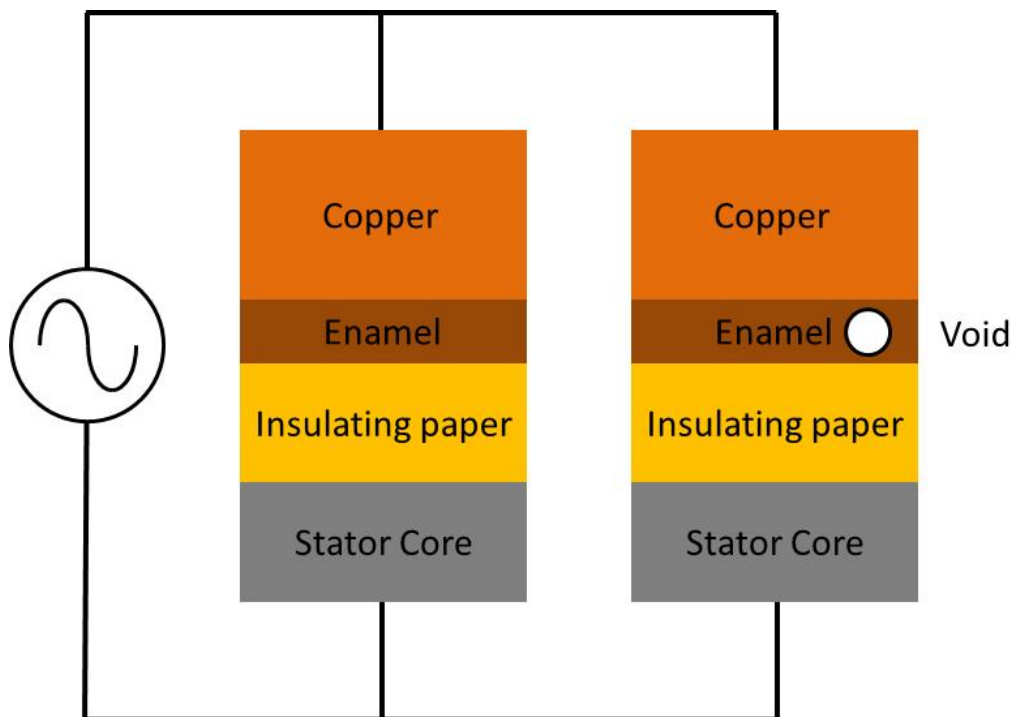


図 2-11 絶縁欠陥箇所での現象 [2-21]

となる。絶縁紙を剥離した欠陥箇所がある場合に加わる電界を E_1' 、 E_2' とすると、絶縁紙の誘電率、空気の誘電率1なので、となり、欠陥箇所に大きな電界がかかることが分かる。

$$E_1' < E_1 \quad E_2 < E_2'$$

一般的に、固体は気体に比べて絶縁破壊電界が高いので、電極間の印加電圧を徐々に上げていくと空気層で放電が発生する。このとき、固体層にかかる電圧(電界)が絶縁破壊電圧(電界)以内であれば、電極間の全路破壊にならず、放電は空気層のみで部分放電(電極間を短絡しない誘電層内での放電)にとどまる。

印加する電圧を上げていくと部分放電の発生に伴い電磁波が放射される。またステータコイルに絶縁不良があると、不良箇所において放電が発生することに着目して、この電磁波を検出することにより部分放電を測定する。部分放電による電磁波の検出に使用するアンテナはループアンテナ、ダイポール・アンテナ、平面アンテナなどが報告されている。

特に最近では電動機の設備保全という観点からパッチアンテナを使用した絶縁診断手法が報告されている。これらは設備を常に監視し故障の兆候を収集されたデータをもとに予測する方法をとっている[2-13]～[2-20]。

表 2-2 に代表的な部分放電測定の検出原理とセンサを示す。代表的な部分放電測定法について述べる。

表 2-2 部分放電測定の見出し原理とセンサ [2-21], [2-22]

検出現象, 原理	使用センサ
パルス電流, 電荷	検出インピーダンス, CT, 内部電極, 箔電極
電磁波, 磁界	UHF アンテナ, ループアンテナ, ホーンアンテナ
音波, 超音波	AE センサ, 光ファイバ
放電光	蛍光ファイバ, 光電子増倍管 (PMT)
分解ガス	化学的センサ

(1) 高周波 CT 法 [2-8]

高周波 CT 法は, 設置得線など, 部分放電に起因する電流が流れる部分に変流器を結合させつものである。測定対象と変流器は絶縁物あるいは空気を介して電磁的に結合している。また変流器の接続による被測定系のインピーダンスの変化は非常に小さく, 被測定系に与える影響が小さいことからオンライン診断として稼動している機器の計測に使用している。

また, 絶縁系にサージ性の電圧を印加されると, 立ち上がり(あるいは立ち下り時)に急峻で大きな充電電流(変位電流)が流れるため, この電流と部分放電電流とを識別する必要がある。ツイストペアのように静電容量が小さい場合は, 充電電流の影響が小さいため通常の交流電圧下の測定と同様に接地線に CT を結合させることで部分放電の測定が可能となる (図 2-12 参照)。

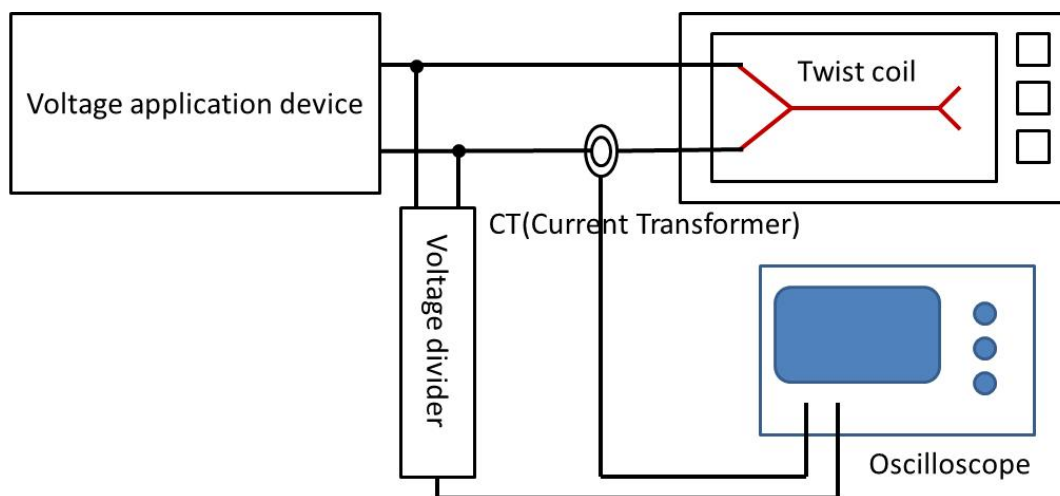


図 2-12 高周波 CT による測定法

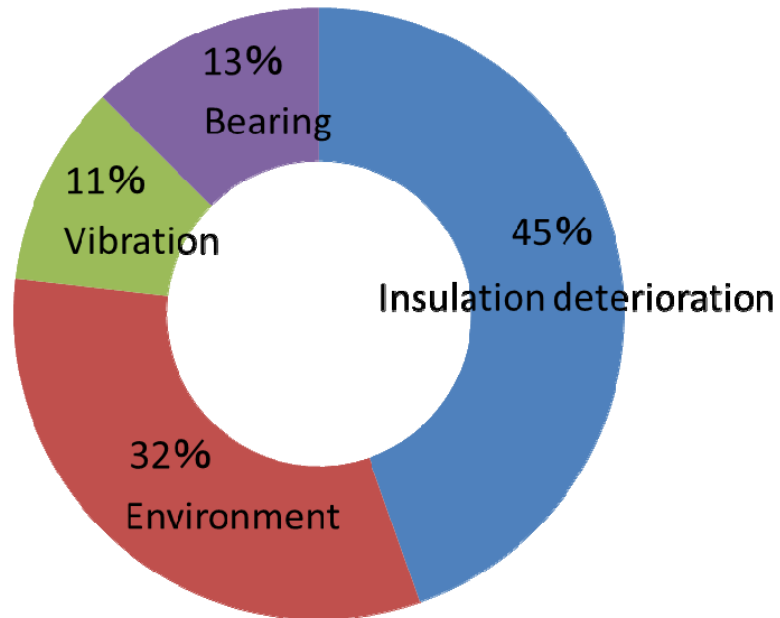
(2) 電磁波測定法

部分放電の発生に伴い電磁波が放射される。この放射電磁波を検出することにより絶縁状態を検査する方法が注目され研究がなされている。部分放電による電磁波検出に検討されているアンテナには、対象物に応じてマイクロストリップアンテナ、ループアンテナ、ホーンアンテナ、ログペリアンテナなどが報告されている。

(3) 光学的手法

光電子増倍管(PMT: Photomultiplier Tube)は真空管の内部に配置された光電面での光-電子変換により発生した電子を直流電圧で加速し金属面に衝突させ、2次電子増倍を繰り返すことで電流増幅する。光電子増倍管を部分放電検出に使用すると、電圧印加回路との電気的な結合をなくすることができるため、インパルス電圧の急峻な立ち上がり部分で発生する充電電流の直接の影響が無く、部分放電発光による信号を検出する。

2.7 大型電動機のトラブル事例



事故原因の関係
(稼働年数11～20年)

図 2-13 大型発電機の事故原因 [2-23]

図2-13は大型電動機の運転年数が11～20年で事故の発生台数はいちばん高いときの原因を示したものである。原因は絶縁劣化，環境によるものが全体の80%弱となっている。モータの損傷原因のうち，コイルに関係するものが70%以上も占め，なかでも絶縁劣化に起因する絶縁破壊事故が主要因である。ステータはモータの故障原因全体の約4割を占める[2-24]-[2-25]。

電気機器や設備においては，必ずしも設定値以上の電圧，電界が加わって絶破壊を生じるとは限らず，様々な要因によって絶縁性能は初期の状態から低下し続け，遂には必要性能を満たさなくなる。機器の稼働により構成部品，材料

に長時間電界が印加される間に様々なストレスを受け、徐々に化学的もしくは物理的変化を生じて絶縁性能が低下する。絶縁劣化はその要因から次に示す3点に分類される。これ以外にも環境的劣化としてコイル絶縁層表面の汚損、水滴湿度によって劣化を進展させる要因にもなっている。

(1) 熱劣化

熱劣化とは、誘電体が熱にさらされるために酸化や加水分解等の化学反応などで分子構造に変化が生じることにより絶縁性能が低下することである。熱の原因としては使用環境の温度、運転による温度上昇や局所的な過熱などが挙げられる。温度による劣化スピードは指数関数的に増大する。一般的に化学反応による熱劣化の場合には10℃半減則が成り立ち、温度が10℃上がると、絶縁材料の寿命が半減する。

(2) 電氣的劣化

誘電体内のボイドや誘電体と電極間の空隙、誘電体上の異物など絶縁層内に初期から存在していた微小欠陥に加え、主に熱的及び機械的ストレスにより新たに微小欠陥が形成され、これらに電界集中源の存在によって部分放電が生じる。この部分放電にさらされた部分においてそのエネルギーで化学反応により分子の分解や構造変化が生じたり、誘電体表面が徐々に削り取られ絶縁劣化が生じる。高速にスイッチング動作を繰り返すことで、モータ駆動に必要な正弦波電流を作り出しているが、この時インバータの出力端子には、スイッチング動作の度にバッテリー電圧を超えるサージ電圧が発生する。そして、このサージ電圧は、ケーブルを介しモータ内部にまで伝播するため、モータ内のコイル間には、瞬間的に高電圧が加わることになる。コイル間に加わるサージ電圧は、インバータの駆動条件やケーブル長、モータ構造等によって変わるものの、場合によっては最大で駆動電圧の2倍程の大きな電圧が加わることもある。コイル

間に高い電圧が加わり、ある電圧を超えると、コイル皮膜の表面間で微小な放電の部分放電が発生する。この部分放電が発生し続けると、長い時間をかけて皮膜を浸食し、絶縁破壊電圧や機械強度が低下する[2-26]。

(3) 機械的劣化

外部や機器自体の運転によって運転によって生じる圧力、振動、機械的な力などが誘電体に加わって、誘電体・導体間や誘電体の剥離、誘電体に亀裂などが生じることによって絶縁劣化が生じる。機械的劣化は単独でも生じるが他の劣化と同時に生じることも多い。

2.8 結言

本章では自動車用モータの構造、特性、技術的課題を整理した。大型発電機のステータはモータの故障原因全体の約4割を占めており絶縁が課題であることがわかった。自動車の主要部品となるモータも同様にステータの信頼性向上は重要な課題である。特に、駆動用モータのステータは小型化が求められているため、多様な作業工程が増えてきている。その中で、これらの製品を生産する上で短時間で各検査を行い十分な絶縁耐力があるか確認する。

そこで、この絶縁耐力試験時に絶縁欠陥部があった場合、位置を特定できれば不良原因を把握でき、さらに前工程にフィードバックし信頼性の高いステータを生産することが可能となる。

本論文では、この課題に対して解決法を提案し、実験を通して提案法の有効性を確認しながら研究を進めていく。

2章 参考文献

- [2-1] 三上浩幸, 井出一正, 清水幸昭, 妹尾正治, 関秀明:「進化するモータ (特集 電池・電動コンポーネント)」日立評論 Vol. 92, pp. 928-933, (2010-12)
- [2-2] 堀洋一, 寺谷達夫, 正木良三:「自動車用モータ技術」, 日刊工業新聞社, (2003)
- [2-3] 「特集 新生モータ全開 電動車両が進化を牽引」日経エレクトロニクス, pp. 37-54 (2010-9)
- [2-4] 「モータの基礎と実用制御回路設計」, トランジスタ技術, No. 12 pp. 120 (2005-12)
- [2-5] 多田隈進, 石川芳博, 常広譲:「電気機器学基礎論」電気学会, (2004)
- [2-6] 「超基礎 電気自動車」MOTOR FAN, Vol. 55 (2011-4)
- [2-7] 石橋文徳:「原理からわかる モータ技術入門」, p4, p40, p45, p49, 丸善出版, (2011)
- [2-8] 繰返しインパルスにおける部分放電計測調査専門委員会:「繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁」(2011-4)
- [2-9] 「ハイブリッド再定義」MOTOR FAN, Vol. 67 (2012-5)
- [2-10] トヨタ:「ハイブリッド車」<http://www.toyota.co.jp/jpn/tech/environment/hv/>
- [2-11] アイシン・エイ・ダブリュ:「教えて!AT・CVT・ハイブリッドシステムの仕組み」<http://www.aisin-aw.co.jp/products/drivetrain/structure/>
- [2-12] 角田昌隆, 袴田武司, 狩野育志:「誘導電動機絶縁の機能試験法」, 日立評論, Vol. 54, pp. 10-14 (1972-5)
- [2-13] 電気学会:「JEC-0401-1990 部分放電測定」電気学会, 電気規格調査会
- [2-14] 工藤祐紀, 藤本真人, 小迫雅裕, 匹田政幸:「回転機絶縁診断に向けた微小ループアンテナ開発に関する基礎的検討」電気学会基礎・材料・共通部門大会, (2010)
- [2-15] F. H. Kreuger, 岡田 亨, 内藤 克彦:「部分放電検出」コロナ社, (1968)

- [2-16] N. Hayakawa, M. Morikawa, and H. Okubo: 「Partial Discharge Inception and Propagation Characteristics of Magnet Wire for Inverter-fed Motor under Surge Voltage Application」, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 1 pp. 39-45 (2007)
- [2-17] 森川真人, 犬塚健太, 早川直樹, 大久保仁: 「インバータ駆動モータサンプルのサージ過電圧印加時における部分放電の推移特性」 電気学会研究会資料, 放電研究会, (2006)
- [2-18] 明石康行: 「高圧回転機余寿命推定技術」, 明電時報, Vol. 337 pp. 10-12 (2012-10)
- [2-19] 内田克己, 反田哲史: 「特集 ケーブル・電気機器のオンライン診断技術 総論」 IEEEJ JOURNAL, Vol. 127, No. 1, (2007)
- [2-20] 匹田政幸: 「電力機器の絶縁診断における部分放電測定技術」 電学論 B, Vol. 121, No. 6, pp. 695-698 (2001)
- [2-21] 小井戸正之, 石川元之, 山竹重雄, 柏村吉清: 「高圧誘導電動機の予防保全技術」, 日立評論, Vol. 72, p807-814, (1990-08)
- [2-22] 神谷宏之, 末長清佳: 「特集 ケーブル・電気機器のオンライン診断技術 回転機のオンライン診断技術」 IEEEJ JOURNAL, Vol. 127, No. 1, pp. 13-15, (2007)
- [2-23] 井上利夫, 兼子慶市, 島崎譲: 「3. 3kV 級型巻コイルの耐熱寿命試験」 日立評論, Vol. 44, pp. 565-570, (1962-4)
- [2-24] 黒川進, 弘中健一: 「低圧誘導電動機の絶縁」 日立評論, Vol. 58, pp. 877-880, (1976-11)
- [2-25] 吉野勝美: 「高電圧・絶縁システム入門」, pp44-52, pp67-69, pp75-79, pp137-142, 森北出版, 2007
- [2-26] 日本特許, 株式会社日立製作所: 「回転電機の絶縁診断法」, 特許公開 2013-24669

第3章 ステータ構造における絶縁不良の課題

3.1 緒言

第2章の課題で述べたように、自動車部品の信頼性向上は重要な課題である。製品を生産する上で短時間で各検査を行い十分な絶縁耐力があるか確認する。最近では、モータを小型化するために平角エナメル線を用いたり、集中巻構造も増えておりモータ構造自体が複雑化している[3-1]-[3-2]。さらに、磁束を大きくするために、ロータとステータ間のギャップを小さくして、磁気抵抗を低くすることが有効であり、そのためステータやロータの加工精度や組立精度が非常に重要である[3-3]。モータの構造も多様したために組立作業工程が増えている。本章では本実験で用いるモータのステータ構造について述べる。次に本実験サンプルの絶縁不良部で部分放電を発生させ、その部分放電にともなう電磁波を検出するための模擬した絶縁不良部について述べる。

3.2 本実験サンプルのステータ構造

ステータの仕様と構造を図 3-1 と表 3-1 に示す。ステータは平角エナメル線を用いた三相の分布巻きによるスター結線で構成されている。ステータコアは電磁鋼板を打ち抜き加工したものを積層して構成し、周方向に等間隔にコイルを挿入するスロットが形成される。ステータの外径は直径約 260mm、内径は直径約 200mm で積厚は約 100mm である。スロットの中は平角エナメル線、絶縁紙、ワニスで構成されている。

図 3-2 はステータコイルの巻線構造の W 相の一部を示す。ステータは小型化を図るために、ステータコアのスロットから突出するコイルエンド部の突出量を小さくする必要がある。そこで、コイルはスロットから突出するステータコ

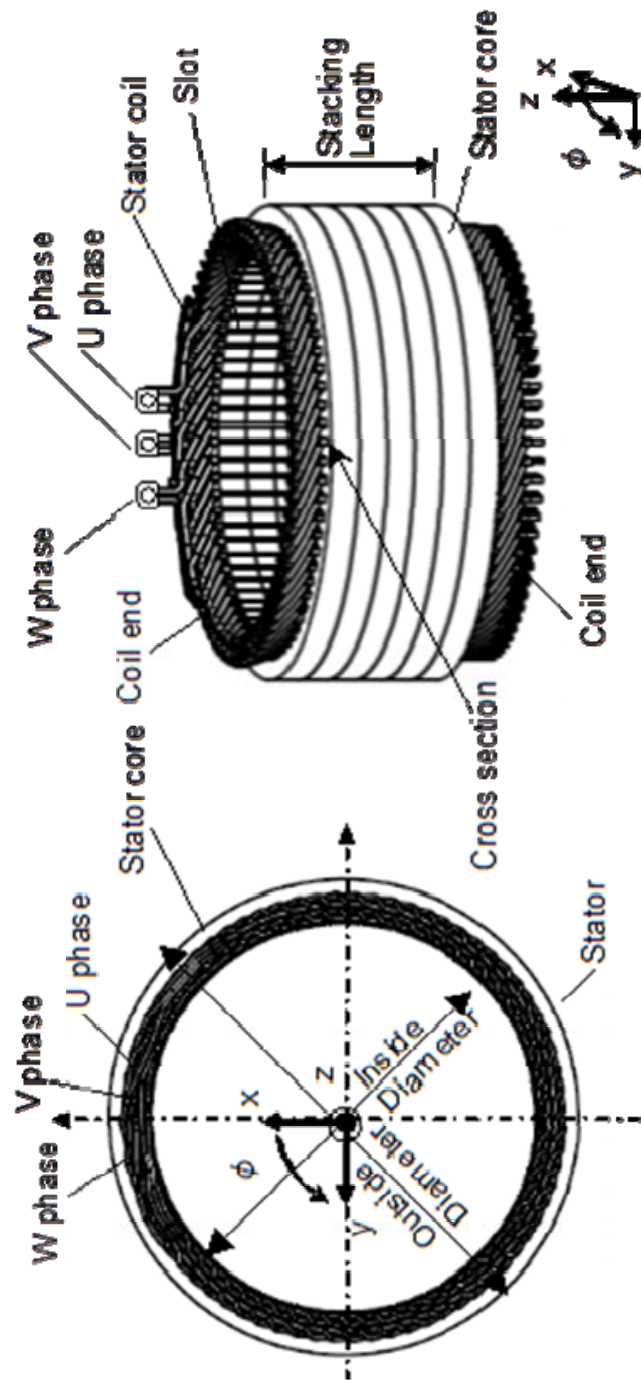


図 3-1 本研究のステータ構造

表 3-1 本研究のステータ仕様

Phase number		3
Slot number		72
Outside diameter		260mm
Inside diameter		200mm
Stacking length		100mm
Winding		Distributed
Stator coil		Rectangular
Location of insulation defect	Sample1	$\phi = 180^\circ$
	Sample2	$\phi = 210^\circ$

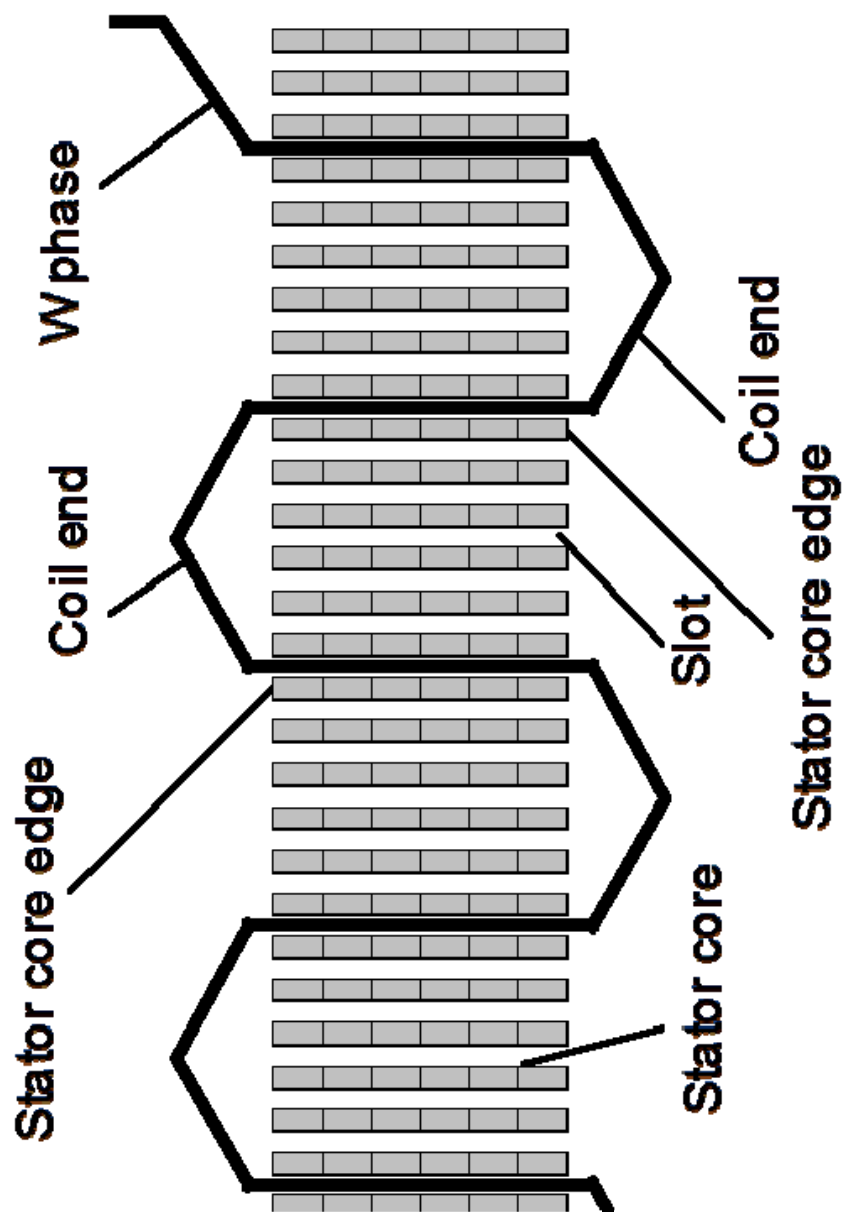


図 3-2 ステータコイルの巻線構造の W 相の一部

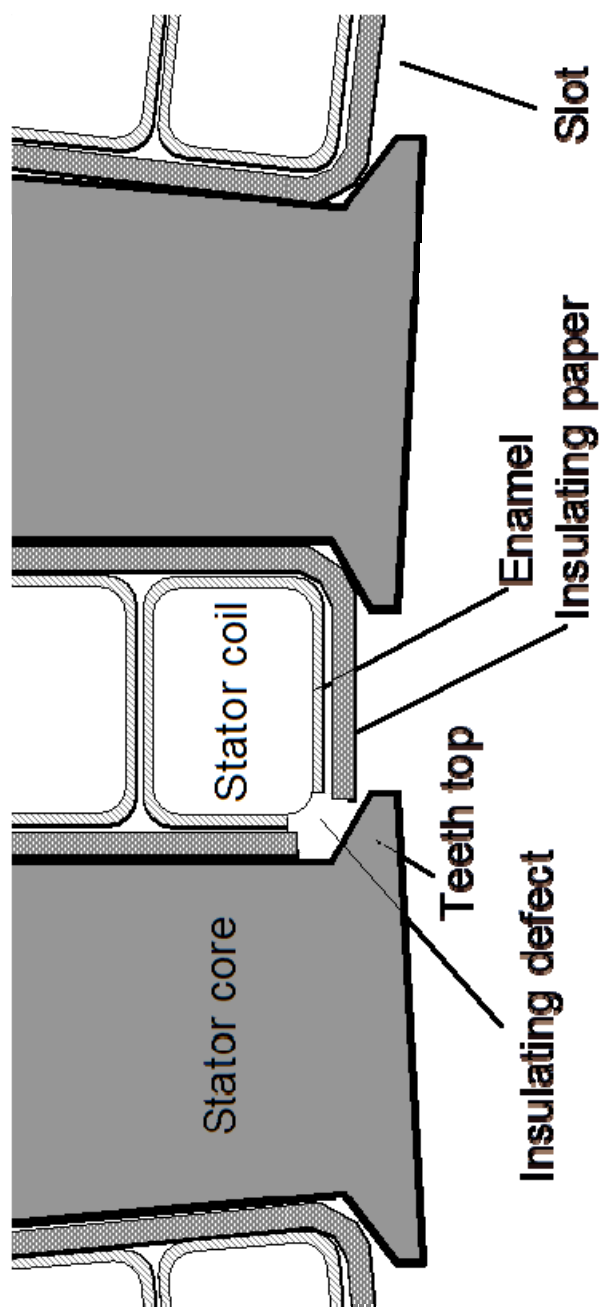


図 3-3 スロット断面の模擬した絶縁不良部の詳細図

ア端部で曲げる。このため、絶縁紙はステータコア端部とコイルに挟まれることによって破れたりエナメル皮膜が損傷し、絶縁不良の原因となる問題があった。その結果、ステータコア端部に絶縁不良が発生する可能性が高い。このエナメル皮膜や絶縁紙の損傷は、目視にてひと目でわかるような場合もあれば、判断することが困難な場合もある。

ここで、図 3-3 に図 3-1 で示した断面の詳細を示す。模擬した絶縁不良は、ステータコアのティース先端部の金型が摩耗しやすく鋭利なバリが発生するステータコア内径側のコイルに設けた(図 3-3 参照)。そして、ステータコア端部にあたる $z=+50\text{mm}$ の位置に、 $\phi=180^\circ$ と $\phi=210^\circ$ に模擬した絶縁不良を設けたサンプル 1, 2 を準備した。絶縁不良部はワニス、エナメル皮膜を剥がし、絶縁紙から平角エナメル線の導体が露出した状態とした。

近年、小形化や高効率化のため、ステータのロット内での平角エナメル線の占積率が高まっている。ロット内に複数本の平角エナメル線を挿入したりほとんど隙間がない状態で巻線されるため、平角エナメル線をロットに挿入するときに機械的外力により傷やピンホールが発生しやすくなっている。

[3-4]-[3-5].

さらに、図 3-4 に示すように平角エナメル線をロットに挿入しようとする時、絶縁紙の端部に平角エナメル線が押し付けられたり、コイルがロット内部から曲げられているため、機械ストレスによって、絶縁紙の厚みが薄くなり、絶縁不良が発生する可能性もある。また、絶縁紙が破けたり曲がりによる損傷の発生が発生する可能性もある。絶縁紙が損傷を受けると、電気絶縁耐力は著しく低下し、絶縁不良を起こして平角エナメル線対ステータコア間の短絡につながることもある。各モータメーカーでは絶縁性能を確認するための試験を行うことで、モータの特性や事前に故障しやすい箇所の特特定を行っている[3-6]～[3-9].

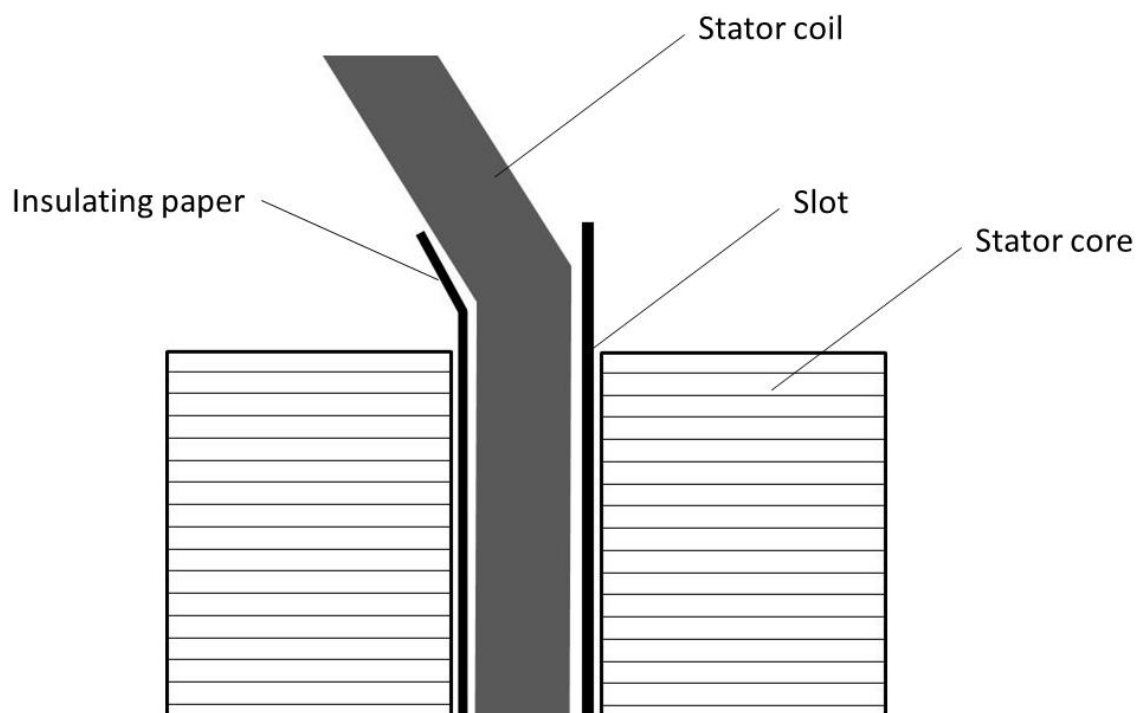


図 3-4 スロット断面図

3.3 結言

本章では、本実験で用いるステータと絶縁と絶縁不良部について述べた。ステータの小型化により絶縁紙の端部に平角エナメル線が押し付けられたり、コイルがスロット内部から曲げられているため、機械ストレスによって、絶縁紙の厚みが薄くなり、絶縁不良が発生する問題点を明らかにした。そして、絶縁不良を模擬したステータサンプルについて述べた。

次節ではその絶縁不良を模擬したサンプルを用いて絶縁不良に伴って発生する放電を電磁的に検出するための測定方法を提案する。

3章 参考文献

- [3-1] 石上孝, 北村正司, 眞田一志:「EPS用モータのステータコア構造と巻線工法の考察」, 電学論D, Vol. 128, No.12, pp65-72, Feb.2014.
電学論A, Vol. 134, No.12, pp1411-1417, Oct.2008.
- [3-2] 田中雄一郎, 石上孝:「車載モータ用角線重ね巻ステータのコイル製造技術」, 精密工学会大会, Vol.2011, Mar.2011.
- [3-3] 脇坂岳頭, 新井 聡, 黒崎洋介:「ハイブリッド/電気自動車駆動モータ用電磁鋼板の最近の動向」, 新日鉄技報 Vol. 378号(2003-8)
- [3-4] 日本特許, 株式会社日立製作所:「回転電機の固定子及び固定子コイル挿入装置」, 特許公開平 11-27888
- [3-5] 糸永貞美, 増淵重春, 鉄芳之, 佐藤二郎, 鈴木和則:「モータの高効率化に対応できる新しい自己潤滑耐熱エナメル線」日立電線 Vol.20 pp.115-120 (2001-1)
- [3-6] 日本特許, トヨタ自動車株式会社:「ステータの絶縁不良箇所特定方法及び絶縁不良箇所特定装置」, 特許公開 2005-69745
- [3-7] 日本特許, 株式会社東芝:「回転電機巻線の製造工程内絶縁試験方法及び回転電機巻線の製造方法」, 特許公開 2010-8199
- [3-8] 日本特許, 株式会社日立製作所:「回転電機の絶縁診断方法および絶縁診断装置」, 特許公開 2002-365326
- [3-9] 日本特許, 株式会社日立製作所:「回転電機の絶縁診断方法および装置」, 特許公開 2004-45307

第4章 微小ループアンテナを用いたステータの絶縁不良部検出測定方法

4.1 緒言

本章ではエナメル皮膜や絶縁紙の損傷は、目視にてひと目でわかるような場合もあれば、判断することが困難な場合もある。この問題を解決するため絶縁不良部で部分放電を発生させ、その部分放電にともなう電磁波を検出するための提案する測定方法について述べる。一般的な検査工程である絶縁耐力試験時に不良箇所を特定するための処理方法やアンテナ配置について述べる。

4.2 絶縁耐压試験機を用いた絶縁不良部測定方法

図 4-1 に測定系の構成を示す。微小ループアンテナはアンリツ製 EMI プローブ MA2601B であり、アンテナの動作周波数範囲は 5MHz から 1000MHz となっている。デジタルオシロスコープはテクトロニクス製 DP04104 である。電圧の印加は絶縁耐力試験装置の菊水電子製 TOS5051A にて、50Hz の正弦波電圧 V_e をステータコイルとステータコア間に 1 秒間印加する。減衰比 1000:1 の高電圧プローブによりオシロスコープで印加電圧を測定しトリガとして使用する。アンテナは同軸ケーブルを介してオシロスコープに接続し、 50Ω で終端する。ステータの放電開始電圧 (PDIV: Partial Discharge Inception Voltage) は図 4-1 の一点鎖線で示した総研電気製の部分放電測定器 DAC-PD-7 を用いて同時に測定する。図 4-2 に示すように微小ループアンテナはステータコア側面に対して水平面、垂直面にそれぞれ切り替えて円筒状のステータから発生する電磁波の受信感度の違いを確認する。垂直面は A と B の 2 方向で測定する [4-1]~[4-3]。

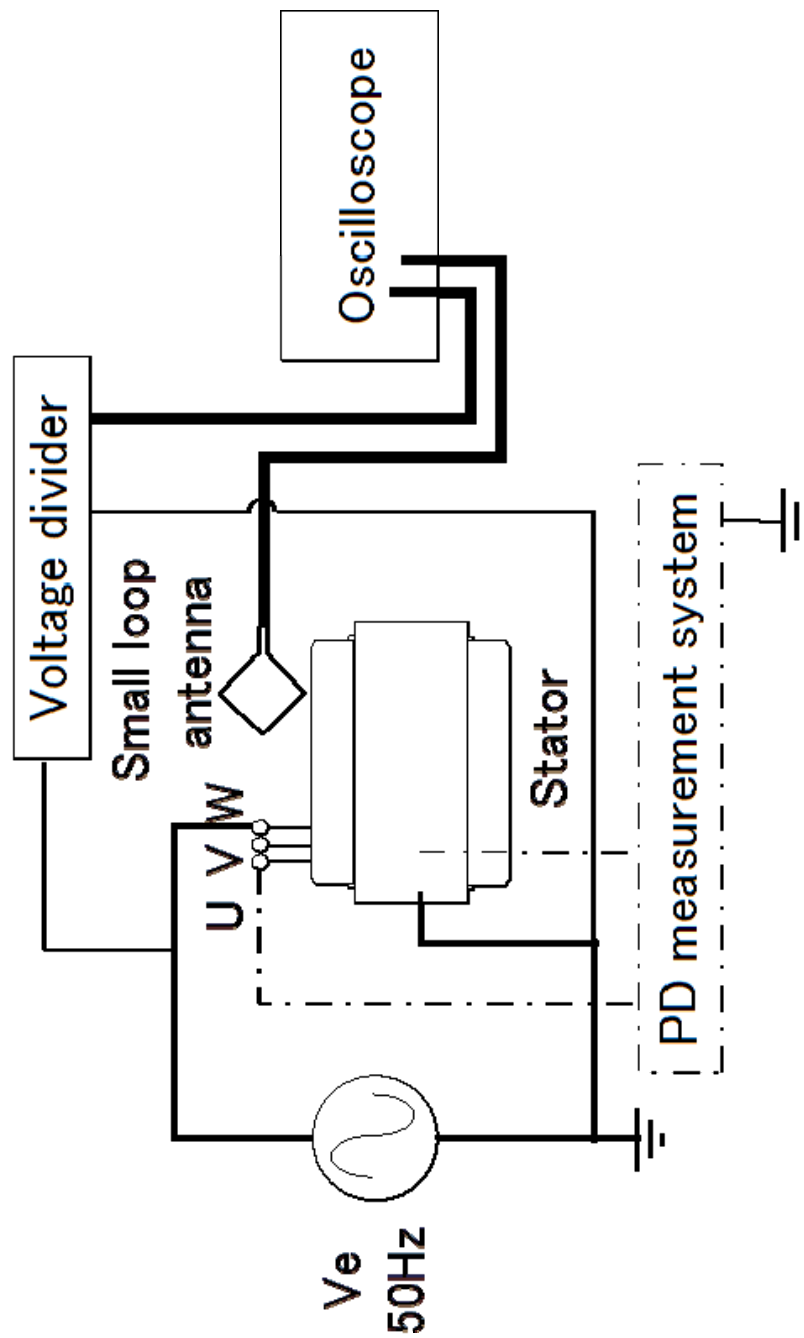


図 4-1 本実験の測定方法

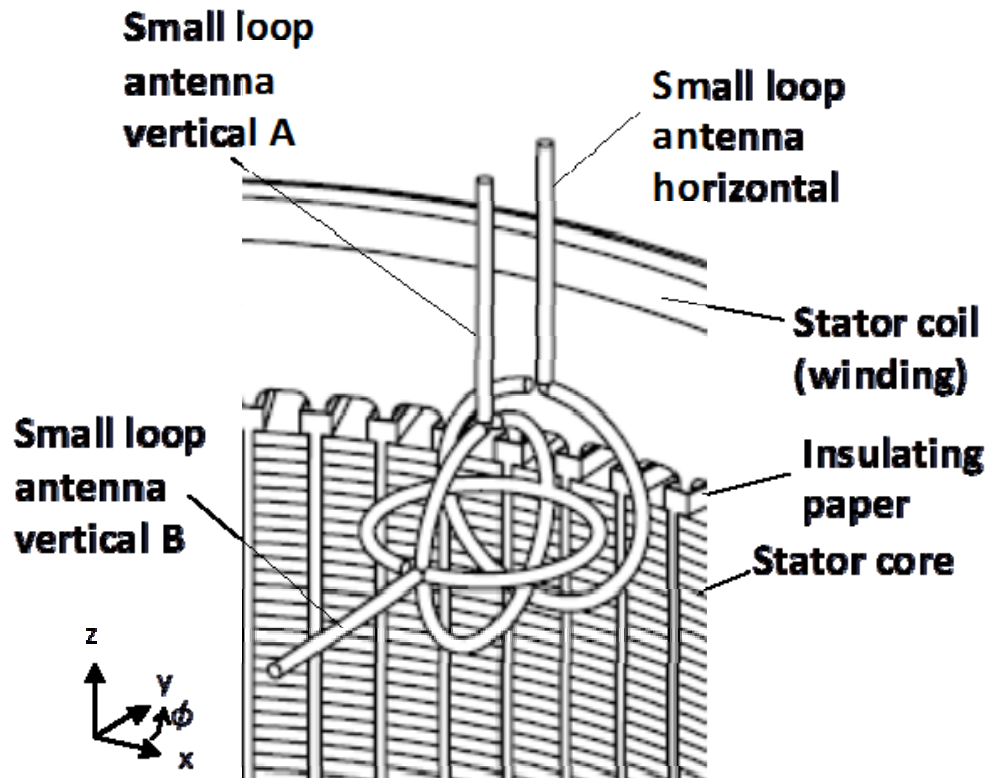


図 4-2 微小ループアンテナの配置方法

4.3 微小ループアンテナの構造

ループアンテナは円形あるいは正方形や長方形にコイルを巻いたもので、ループ内の磁束の時間変化に比例した出力が得られる。本研究の実験で放電検出に用いた Anritsu 製 EMI プロブは、微小ループアンテナの構造を用いたものである（図 4-3 参照）。本節では微小ループアンテナの動作原理について述べる [4-4]。

微小ループアンテナは線の全長が波長に対して非常に短いループアンテナの一種であり、スモールループアンテナ、マグネチックループアンテナとも呼ばれる。その周囲長は受信用で波長の1/10以下程度、送信用で1/4以下程度として用いられる。動作原理は1波長ループアンテナとは異なり、ファラデーの電磁誘導の法則によるものである。

多くのアンテナと異なって、このアンテナは電界ではなく磁界を検出するため、電氣的なノイズを受けにくい特徴がある。また複数のループアンテナを同心円状に配置し、信号の到来方向を特定しようとする試みもなされている。

図4-3に微小ループアンテナの例を示す。ループの半径 a [m]が到来する電磁波の波長に対して十分に小さいとき、ループ中心での磁束密度 B はループ内でほぼ一定とみなせる。遠方からの電磁波がループアンテナの面に沿って到達しているとき、電磁波による磁束 ϕ はループに直交することになる。また、電磁波による磁束 ϕ は電磁波の周波数と同じ速さで方向と大きさが変化している。この ϕ の時間変化によって、ループの一部に設けたギャップには起電力 e が生じる。微小ループの導体損は無視できるものとする、ファラデーの法則から起電力 e は次のように求められる。

$$e = -\frac{\partial \phi}{\partial t} = -j\omega N\pi a^2 B \sin \theta$$

ただし、 ϕ : 磁束[Wb], B : 磁束密度[Wb/m²], ω : 角周波数[rad/sec]

θ : ループ面と磁界のなす角[rad], N : 巻き数 とする.

このように、ループと鎖交する磁束とギャップに生じる起電力には比例関係があるため、微小ループアンテナは磁界検出用のプローブとして利用できる.

なお、微小ループアンテナの指向特性はループの巻回軸方向である.

また、微小ループアンテナのインピーダンスは、ほぼループの自己インダクタンスに各周波数を乗じたものに等しく、導体損が小さければほとんどが正のリアクタンス素子と考えて良い. なお一般的に、検出用プローブとしては、給電線による外乱を少なくするため、同軸線路で微小ループを構成した、シールドループアンテナを用いることが多い.

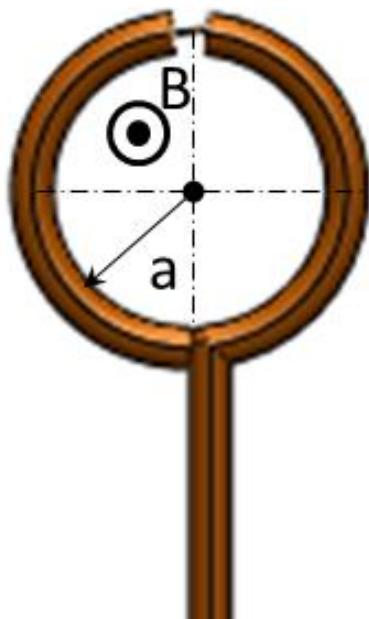


図 4-3 微小ループアンテナ

つまり、直線状電流近傍磁界を検出するには、磁界に直交する形でループアンテナを配置するのが最適である。また金属板表面磁界の検出においても、金属表面の境界条件から、金属面と平行に存在する磁界を検出できるようにループアンテナを配置することが最適と考えられる。しかし、図 4-1 に示した構造においては、複数のコイルの配置やステータコアの影響により磁界分布は複雑となり、事前に推定することは困難である。

そこで、本研究では先に説明したような、3つのすべての配置に関し、特性評価を行う。単純な1本のワイヤに流れる電流によって形成される磁界を検出する場合は、コイルにループ面が平行となるように設置するのが良い（図 4-4 参照）。しかし、今回の場合は、コイルは狭い間隔で何本も配置され、かつ U, V, W 相のコイルがあり、またステータコアの金属がある。よってこの状況で、放電発生に伴い磁界が発生しても、どういう磁界分布になるかを予想することは困難である。よって可能性として、3ベクトルを測定すれば、取りこぼしはないと考え、3つの配置すべてについて測定することにした。

ステータは中心軸が回転テーブルの回転軸に一致するように配置し、 ϕ 方向に 360° 回転できる。微小ループアンテナは $z=+50\text{mm}$ に合わせステータコアの内径から 10mm の地点に配置し、ステータを ϕ 方向に回転させて測定を行う。

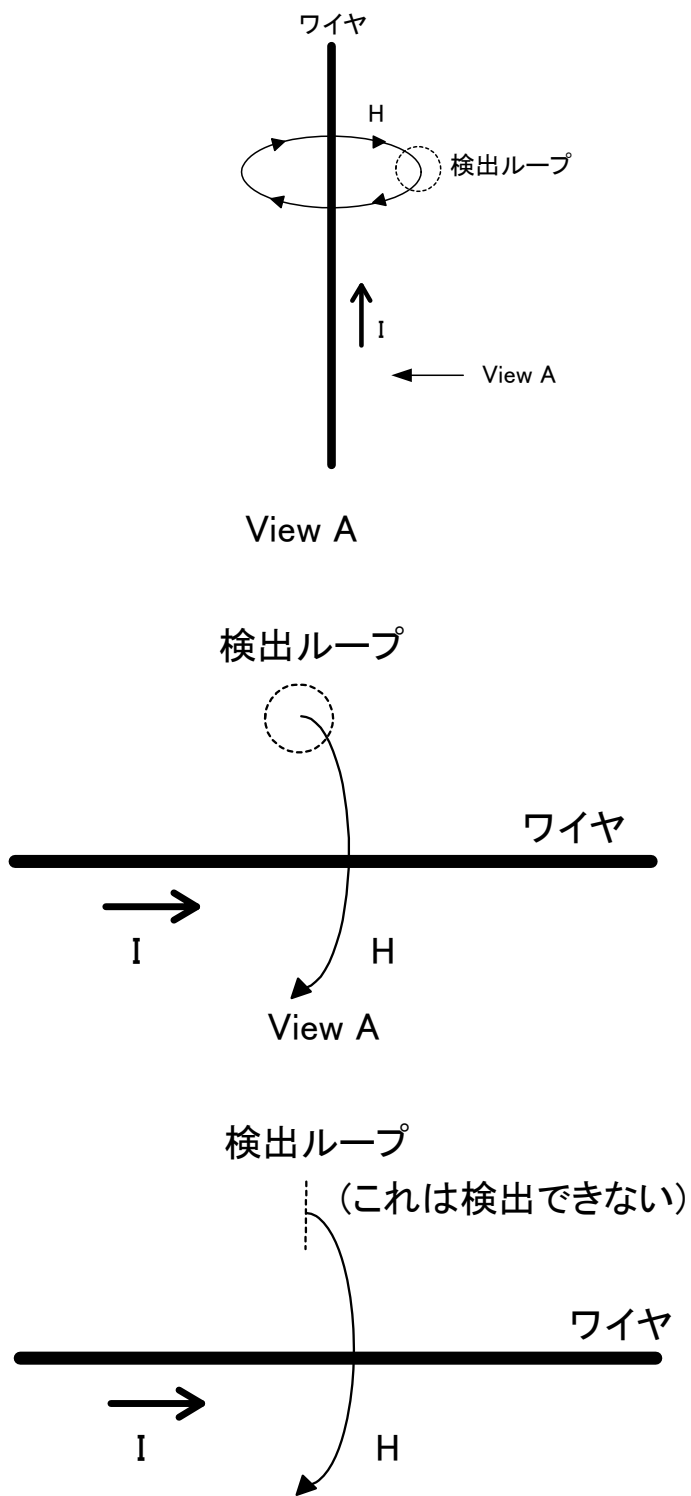


図 4-4 微小ループアンテナの測定

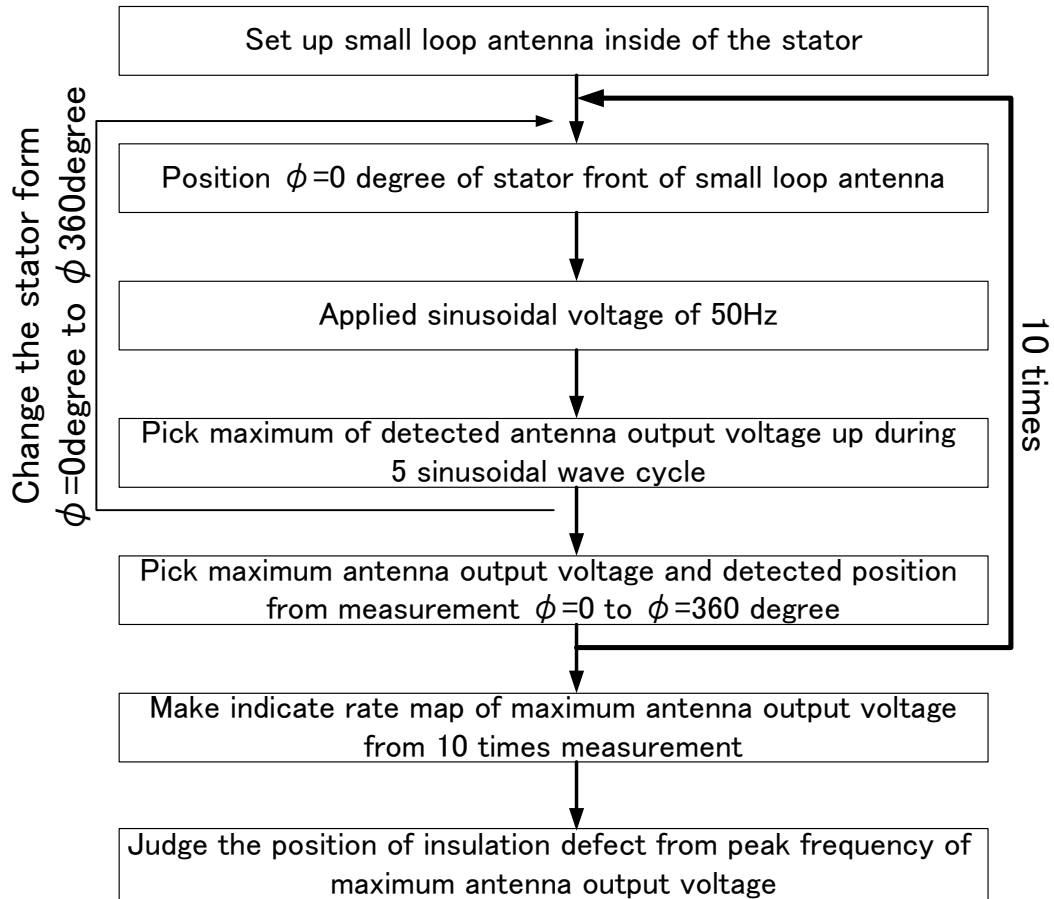


図 4-5 本測定のプロチャート

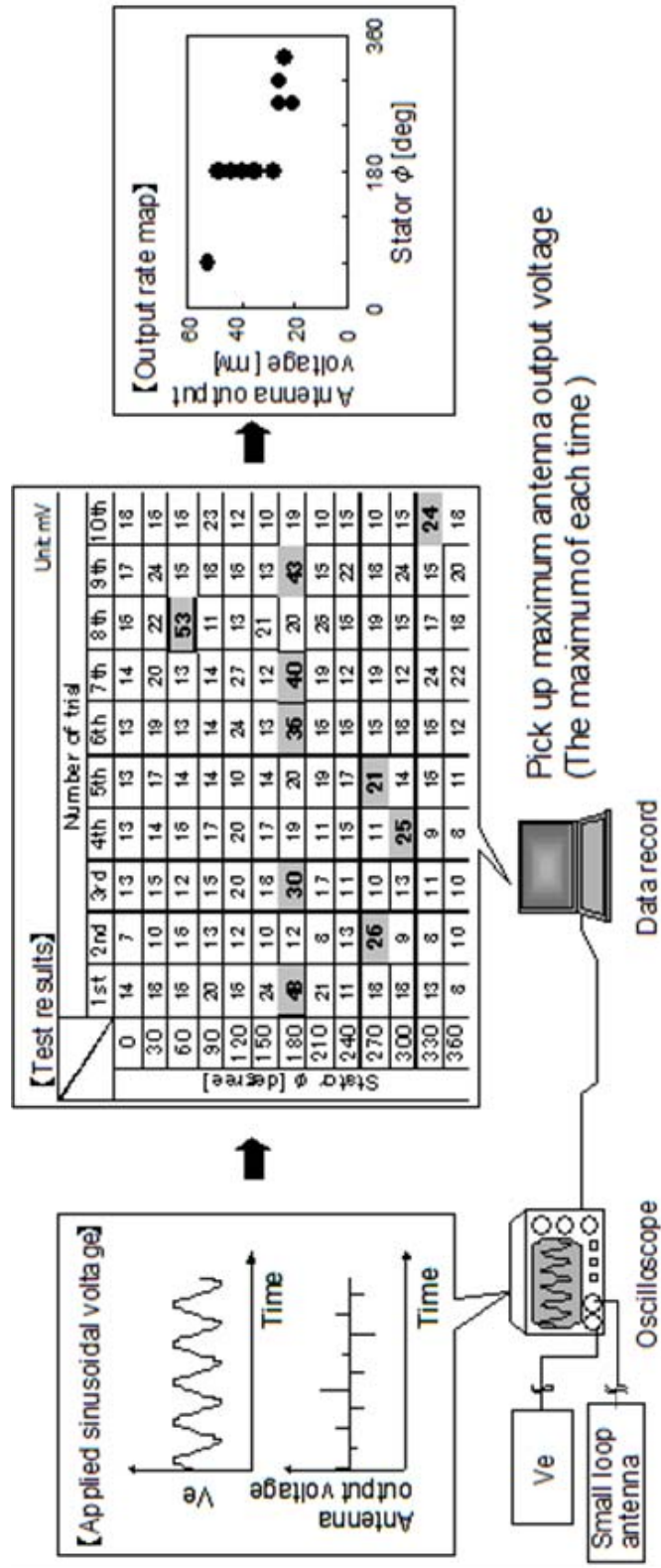


図 4-6 本測定構成

図 4-5 に本測定法のフローチャートを示す。微小ループアンテナをステータコア端に設置する。微小ループアンテナを固定しステータを ϕ 方向に回転し各々の位置で、50Hz の正弦波電圧を 1 秒間印加したときの、印加直後の 5 周期 (0.1 秒) からアンテナ出力最大値を抽出する。1 周を 1 回として、放電のばらつきや部分放電の経時変化を考慮しこの測定を 10 回繰り返す [4-5]-[4-6]。繰り返しの回数は、絶縁耐力試験の 1 分間電圧を印加する中で不良部を同時に測定できることを考慮した。データはそれぞれのアンテナ配置に対して 10 個存在する。

例えば図 4-6 に示すように微小ループアンテナを配置し、アンテナ出力最大値を抽出し、10 回測定した結果を記録する。抽出したデータの太字塗りつぶしで表示しているのが各回の最大値である。この最大値を角度毎にプロットし検出確率分布を作成する。

4.4 結言

本章では一般的な検査工程である絶縁耐力試験時に不良箇所を特定するための処理方法やアンテナ配置を述べた。モータのステータ製造工程において、エナメル線や絶縁紙の損傷により絶縁不良が発生することがある。通常の生産ラインにおいて絶縁耐力試験を行い十分な絶縁耐力があるか確認する。そこで、この絶縁耐力試験時に耐圧試験装置を用いて、位置を特定できれば不良原因を把握でき、前工程にフィードバックし信頼性の高いステータを生産することが可能となる。

放電のばらつきや部分放電の経時変化を考慮しこの測定を 10 回繰り返す。繰り返しの回数は、絶縁耐力試験の 1 分間電圧を印加する中で不良部を同時に測定できることを考慮した。アンテナ配置は 3 つのすべての方向に関して特性評価を行う。放電発生に伴う磁界分布を予想することは困難であるため、3 つの配置すべてについて測定する。

4章 参考文献

[4-1] 中山健一, 松竹由佳理, 柳澤隆久, 尾保手茂樹, 鹿子嶋憲一: 「ステータにおける放電箇所検出に関する検討」 電気学会全国大会, 巻:2011号, p124, March. 2011.

[4-2] Kenichi NAKAYAMA, Yukari MATSUTAKE, Takahisa YANAGISAWA, Shigeki TAKEDA, Kenichi KAGOSHIMA: 「study on locations of electrical discharge in a motor」 Antennas and Propagation (ISAP), pp.716-719, (2012)

[4-3] 中山健一, 松竹由佳理, 柳澤隆久, 尾保手茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘, 「モータ固定子内部で発生する絶縁不良箇所検出に関する検討」, 電学論A, Vol. 134, No. 2, pp65-72, Feb. 2014.

[4-4] 虫明康人, 「アンテナ・電波伝搬」 コロナ社, 1993

[4-5] 松本聡, 渋谷義一, 西村延晃, 稲葉宣考, 小倉竜一, 平林朋也, 藤崎 満: 「3軸ループアンテナの部分放電検出特性」, 電気学会研究会資料, EWC-10-13, pp. 25-30 (2010-2)

[4-6] 渋谷義一: 「部分放電からの電磁波発生とその検出」, 電力・エネルギー部門 高電圧研究会 pp. 77-82 (2012-1)

第 5 章 放電現象を利用したステータ絶縁不良部検出に関する実験結果

5.1 緒言

前章では絶縁不良部で部分放電を発生させ、その部分放電にともなう電磁波を検出するためのループアンテナの配置方法を検討した。本章では模擬した絶縁不良を設けたサンプルを用いて放電検出電圧測定値とその性質、及びこれらの放電測定結果をもとに、絶縁不良箇所である放電部位を特定するアルゴリズムの提示と測定データによる検証結果を述べる。

5.2 微小ループアンテナによる絶縁不良部検出

図 5-1 は絶縁耐力試験装置より 50Hz の正弦波電圧 $V_e=1.0$ (arb. unit) を印加した直後の 5 周期分の波形を示し、100MS/s のサンプリングのアンテナ出力を示したものである。これは模擬した絶縁不良を設けたサンプルをステータの中心で測定した放電波形である。印加電圧 V_e は本ステータの絶縁耐力試験の印加電圧で規格化し、任意単位 (arb. unit) としている。

図 5-1 のアンテナ出力波形からわかるように、ピークは正弦波の周期に対応して周期的に発生していることからステータから発生する電磁波を測定できていることが確認できる [5-1]。しかし、アンテナ出力の受信レベルはばらついている。

図 5-2 は測定を 30 回繰り返し検出した放電波形を各々、離散フーリエ変換を行い、その平均値を算出した振幅スペクトラムを示したものである。細線は 5GS/s、太線は 100MS/s のサンプリング周波数を示している。放電波形は次に示す離散フーリエ変換 (DFT) を用いて周波数解析を行った。DFT は離散群上のフー

リエ変換であり、信号処理等で離散化されたデジタル信号周波数解析等によく用いられる。等間隔にサンプリングしたN個の信号系列が $(x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ として表わされるとすると、それに対して定義されるフーリエ係数 C_k は次式のように表わされる。

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j\frac{2\pi}{N}ki} \quad k=0, \dots, n-1$$

ここで、 i は虚数単位、 e はネイピア数、 π は円周率である。

また、フーリエ係数 C_k に対応する周波数 f_k は

$$f_k = \frac{f_s}{N} k \quad k=0, \dots, n-1$$

と表わされる。ここで f_s はサンプリング周波数である。

サンプリング周波数によってスペクトラムは異なるが、白色ノイズとは違い30MHzと90MHzで振幅が大きい周波数特性を示している。放電部を含む構造に依存した放電による電磁波特性を示したものと考えられる。よって図5-2のピーク（パルス状の波形）はノイズではなく、30MHzと90MHzでピークが存在することが確認できることから測定系の熱雑音ではなく放電にともなう電磁波を検出できている[5-2]。

5GS/sのサンプリングレートではデータ処理時間が長くなってしまい、生産スループットが減少するため、サンプルレートを下げる必要がある。そこで、30MHzまでの信号の測定を想定して、データ処理時間の削減による生産性向上を図る。サンプリング周波数は、図5-2より2つのスペクトラムピークをカバーするよ

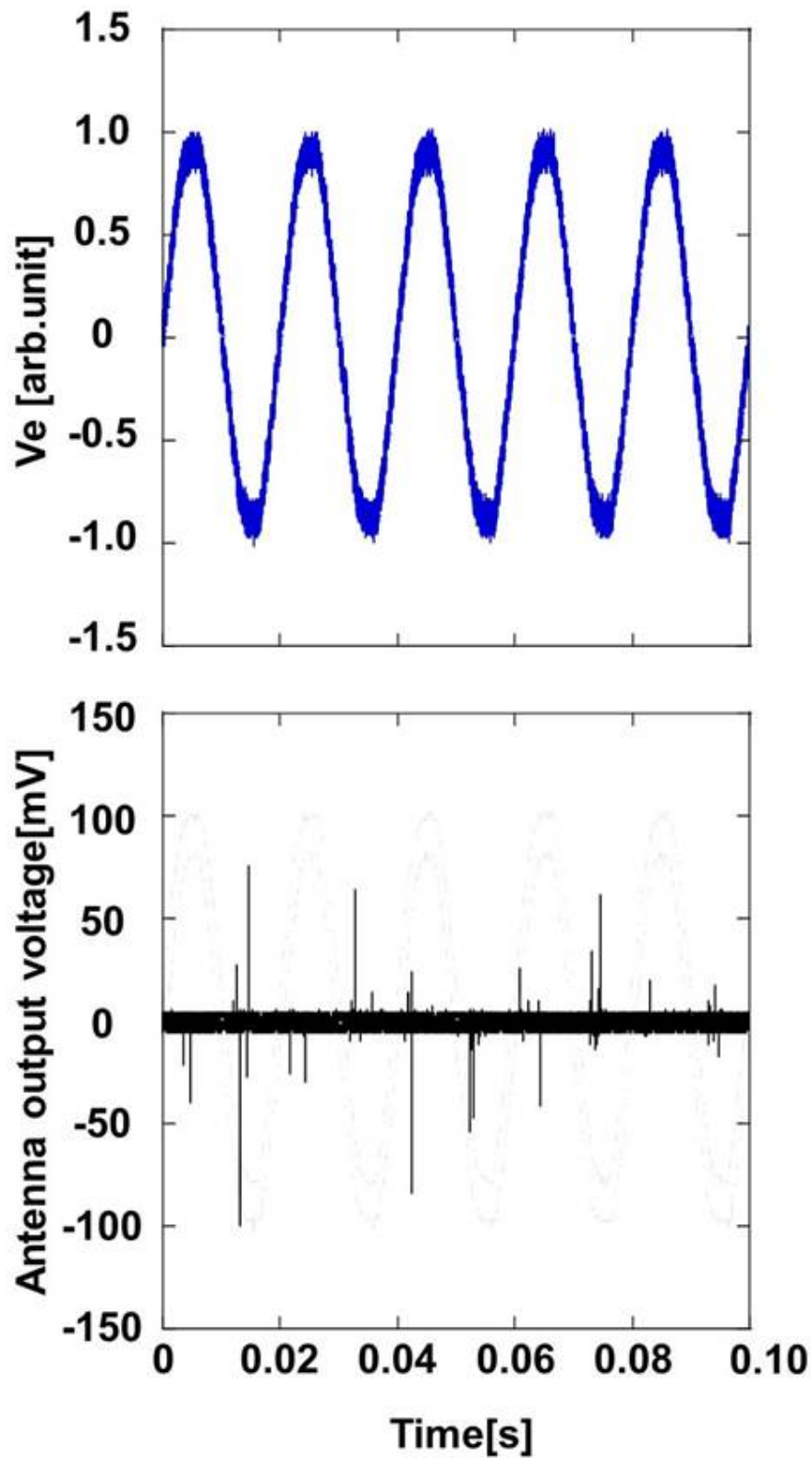


図 5-1 50Hz の正弦波電圧 $V_e=1.0$ (arb. unit) を印加した直後の 5 周期分の波形

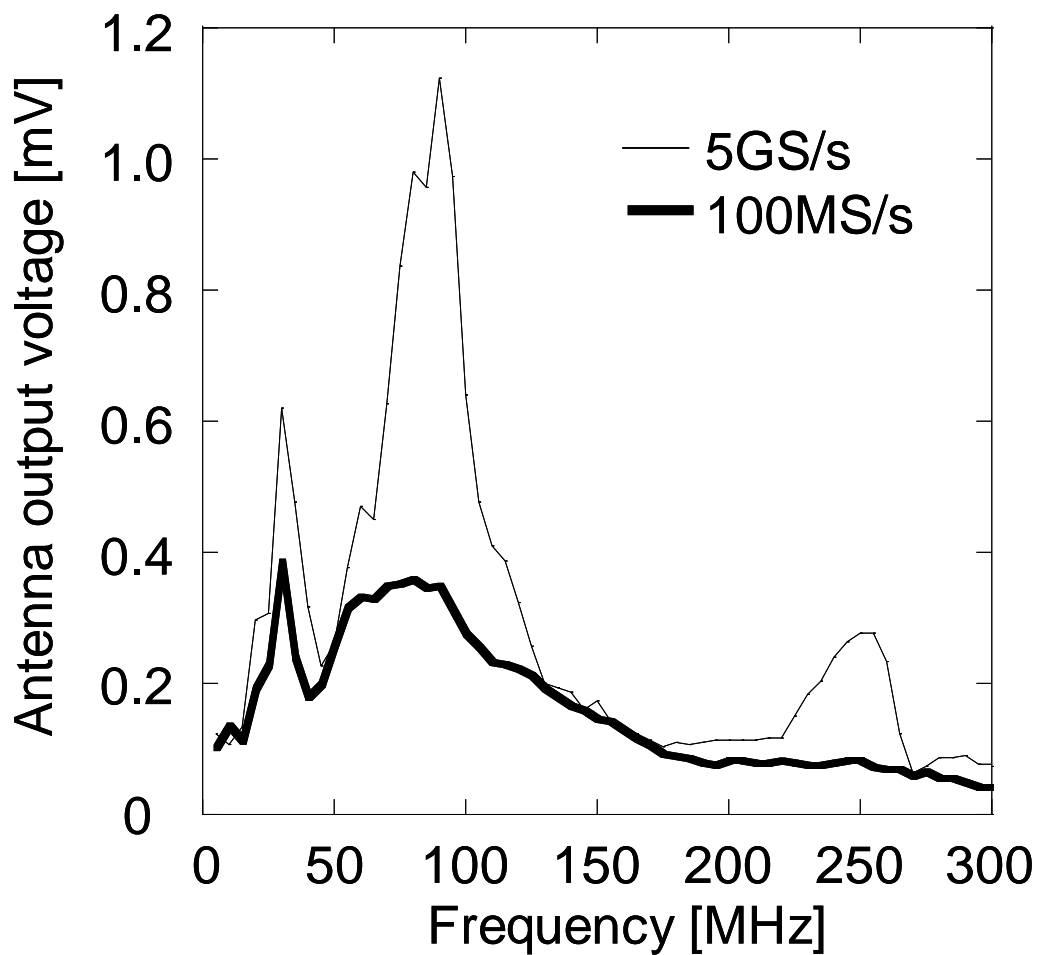


図 5-2 ステータから発生する電磁波振幅スペクトラム

う 200 MS/s 以上とするのが妥当と考えられるが、今回の実験では多くのデータを収集することと、データを迅速に処理することを優先し、少なくとも低い周波数ピークの 30MHz をカバーすることとし、やや余裕をとって 100MS/s とした。

図 5-3, 図 5-4, 図 5-5, 図 5-6, は, 図 4-5, 図 4-6 の手順に従って印加電圧

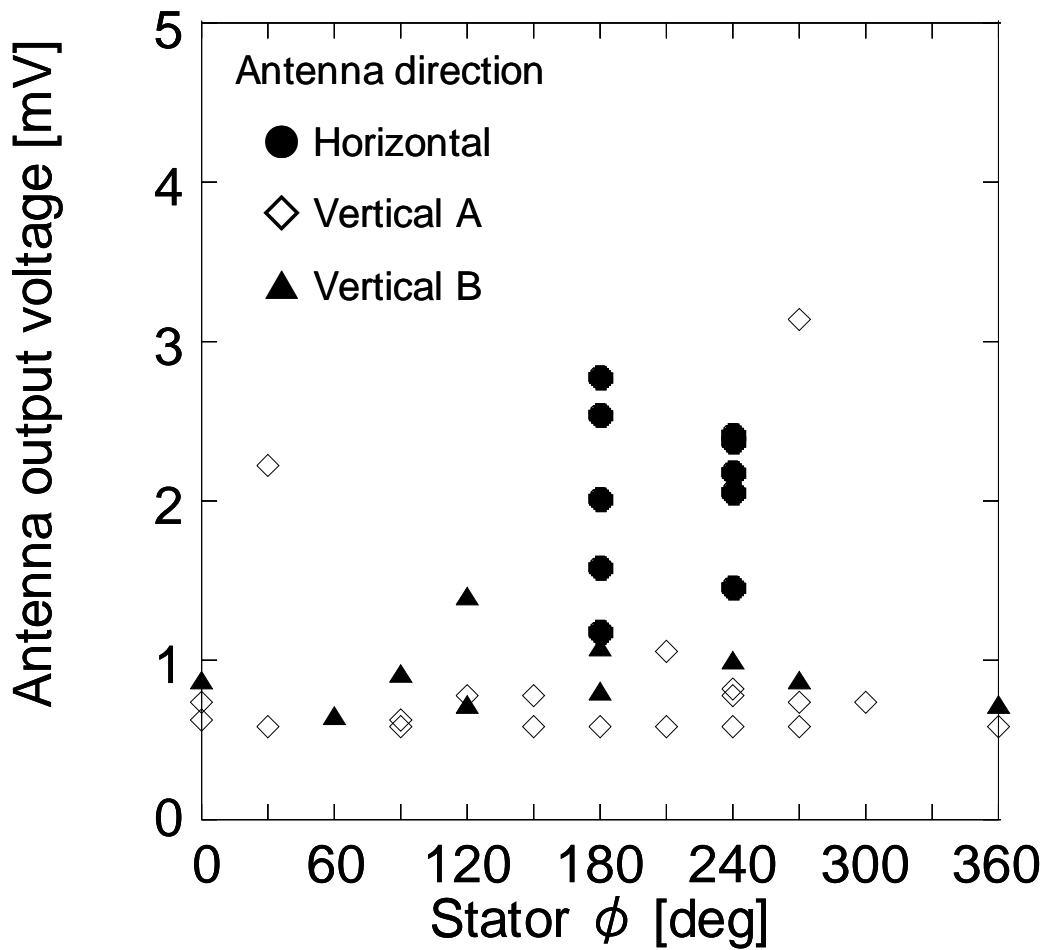


図 5-3 $V_e=0.69$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値

V_e と微小ループアンテナの設置向きを変え、ステータ全周を 10 回測定したときのアンテナ出力の最大値をそれぞれプロットしたものである。ここで、ステータコア面に対してループ面が向かい合わせになるように水平に設置した場合、印加電圧によってアンテナ出力に違いがあるが絶縁不良部を設けた $\phi=180^\circ$ で

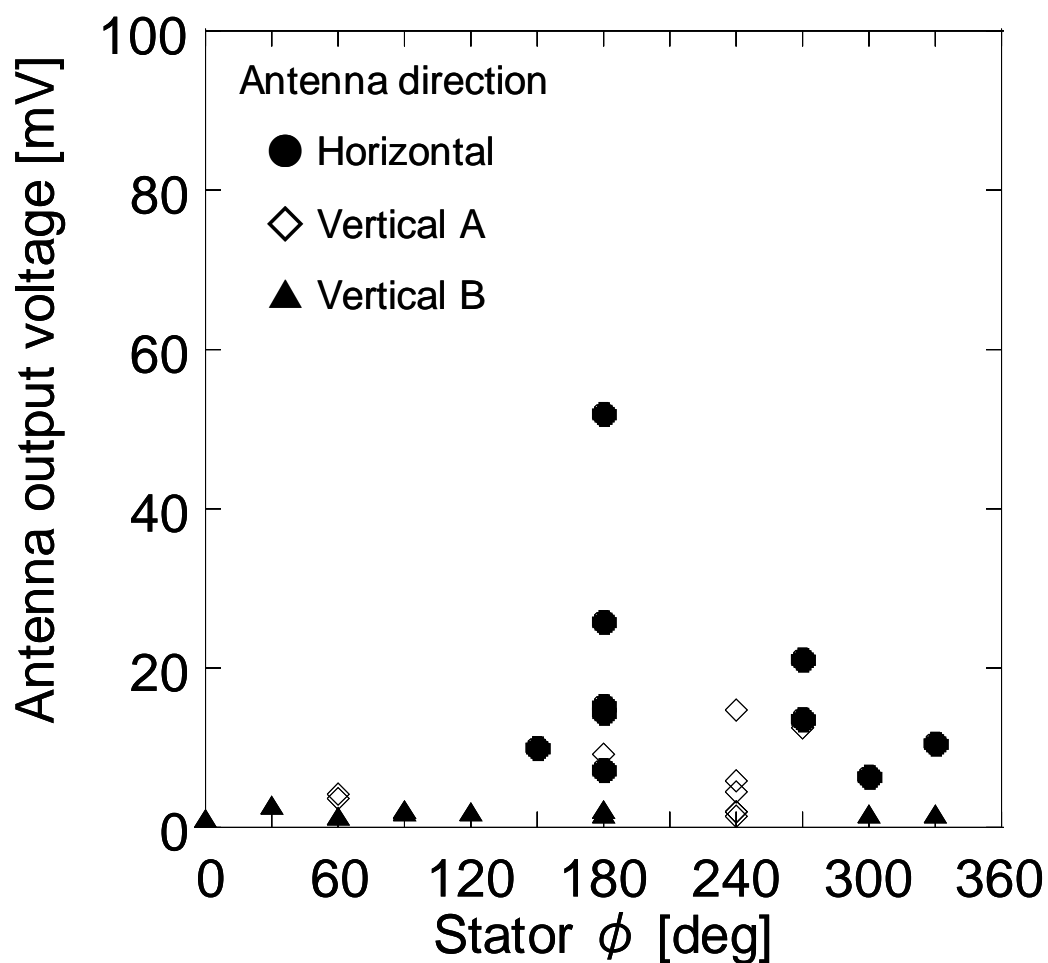


図 5-4 $V_e=0.77$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値

アンテナ出力が高く、また発生回数が多いことがわかる。しかし、図 5-5 に示すように絶縁不良部以外 ($\phi=270^\circ$) で最大のアンテナ出力が発生することもあるため最大値の検出確率分布による評価を行う。

図 5-7, 図 5-8, 図 5-9, 図 5-10 は図 5-3, 図 5-4, 図 5-5, 図 5-6 をもとに

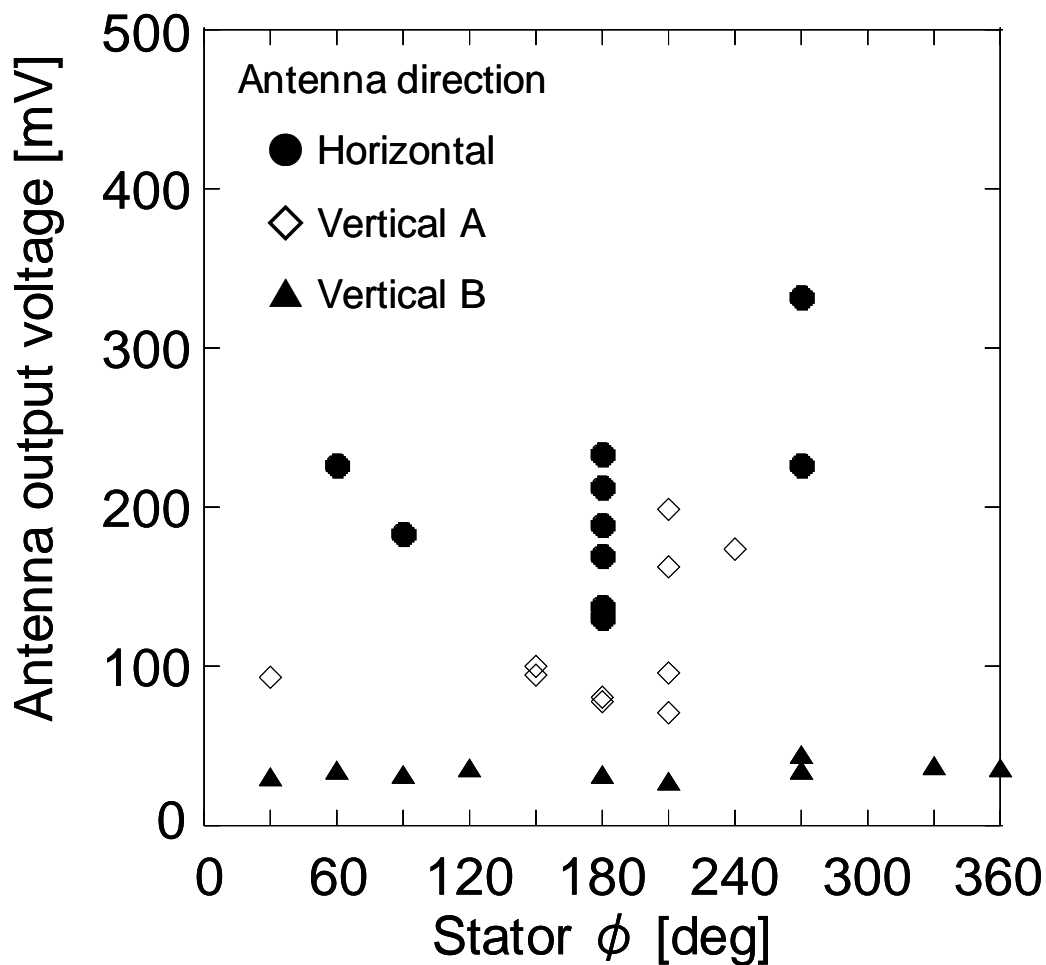


図 5-5 $V_e=0.85$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値

印加電圧 V_e を変えたときの最大値検出確率を示したものである．図 4-1 に示したようにアンテナ出力のピークは周期的に発生しているが受信レベルにばらつきがある．そこで，正弦波電圧を印加したときの 5 周期中に発生したアンテナ出力の最大値を抽出し，最大値の検出確率分布を作成する．例えば，全体で最

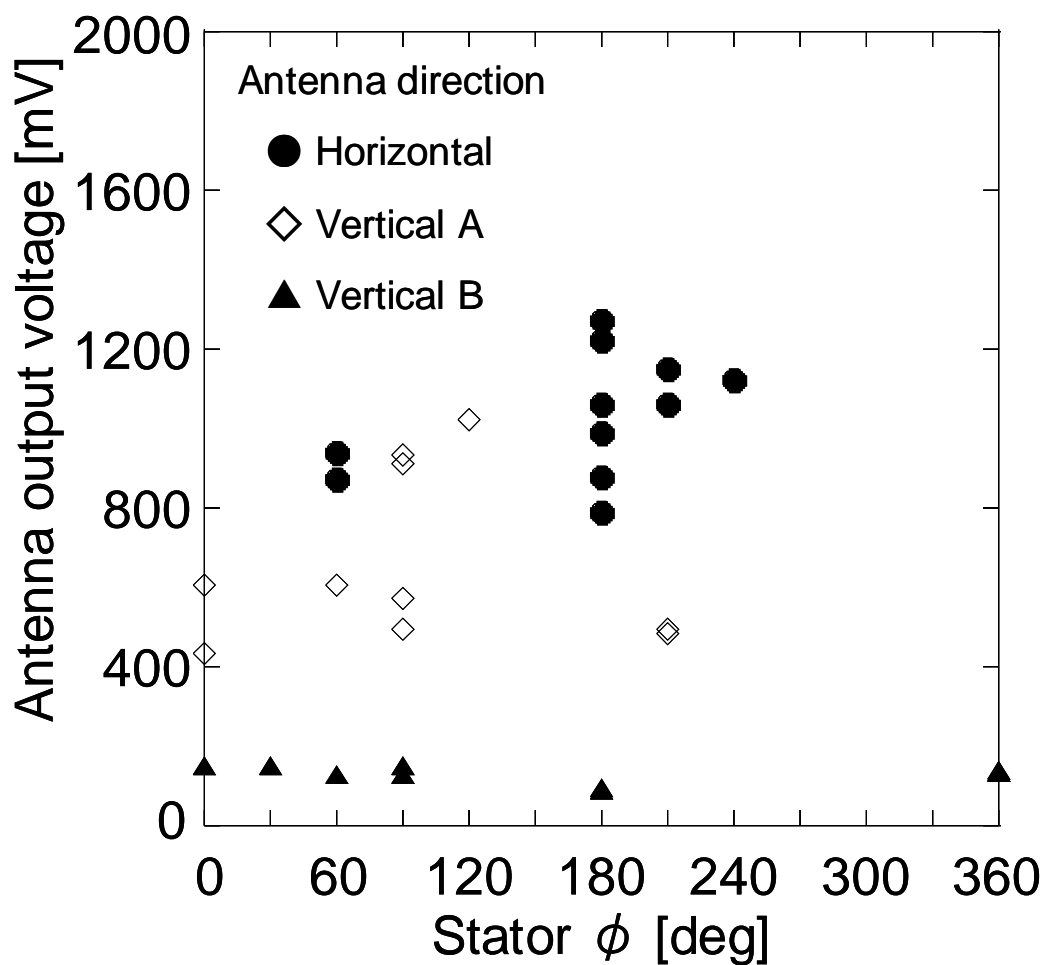


図 5-6 $V_e=1.0$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値

大値が発生したのが 10 個だとすると、不良部位の 180° において最大値が 2 個あれば、 $2/10 \times 100 = 20\%$ と計算される。

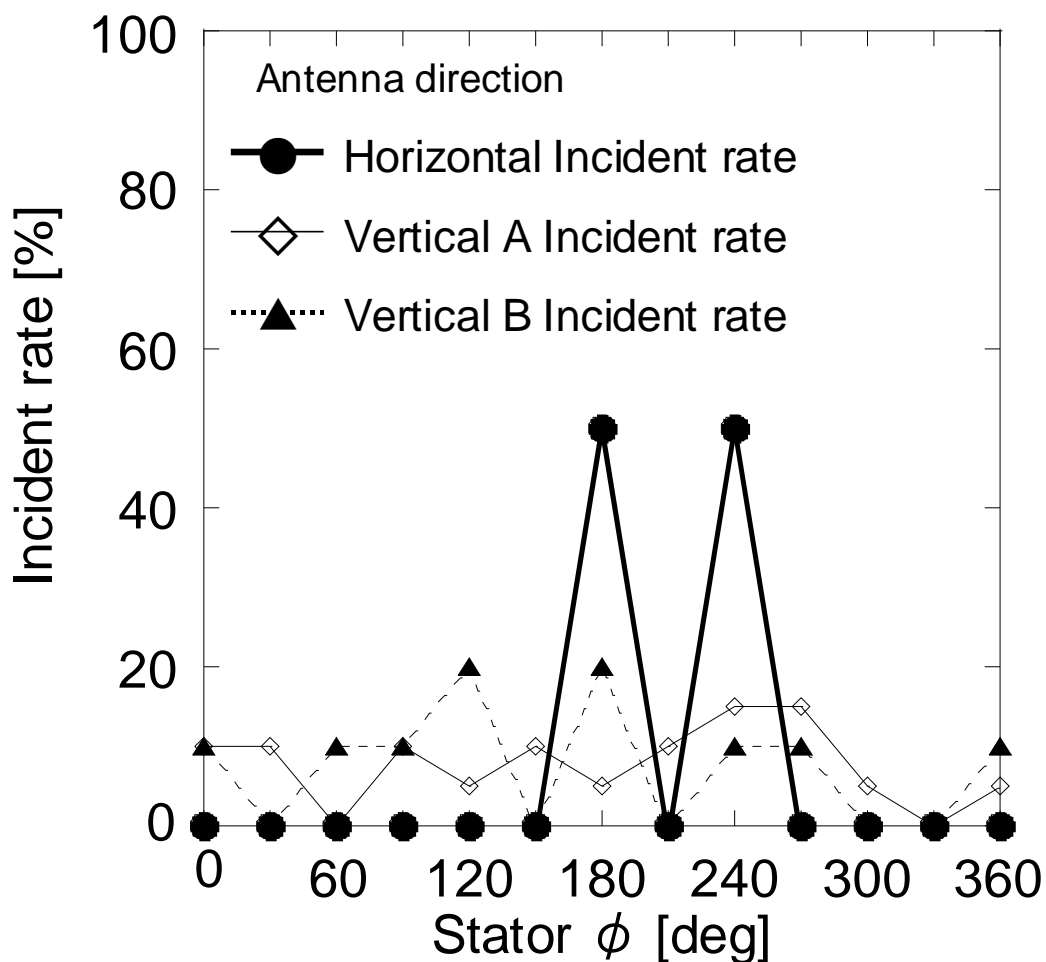


図 5-7 $V_e=0.69$ (arb. unit) 最大値検出確率

図 5-7 は水平に設置した場合、絶縁不良部の $\phi=180^\circ$ と $\phi=240^\circ$ で 50% の検出確率を示した。 $\phi=240^\circ$ の位置ではアンテナ出力は低いが見出確率は同じとなった。しかしながら、図 5-8、図 5-9、図 5-10 に示したように印加電圧 V_e を上げていくと水平に設置した場合、絶縁不良部を設けた位置の最大値検出確

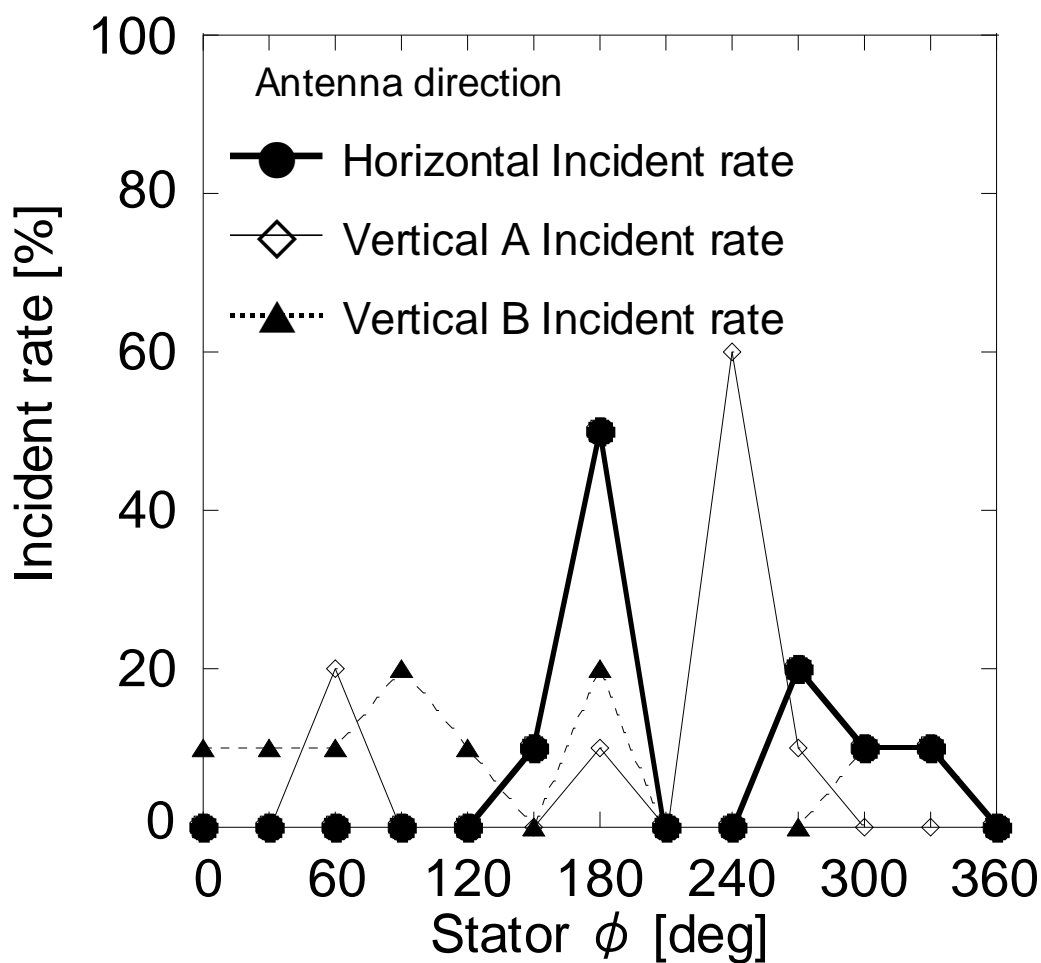


図 5-8 $V_e=0.77$ (arb. unit) 最大値検出確率

率が他に比べて 50%以上と極めて高くなる。なお図 5-7, 図 5-8 の $\phi=240^\circ$ は模式的に設けた絶縁不良部と関係ないが水平と垂直 A でピークを示した。外観上確認できる傷や絶縁紙の損傷は存在していないため、これらについては今後さらに検討が必要と考えている。

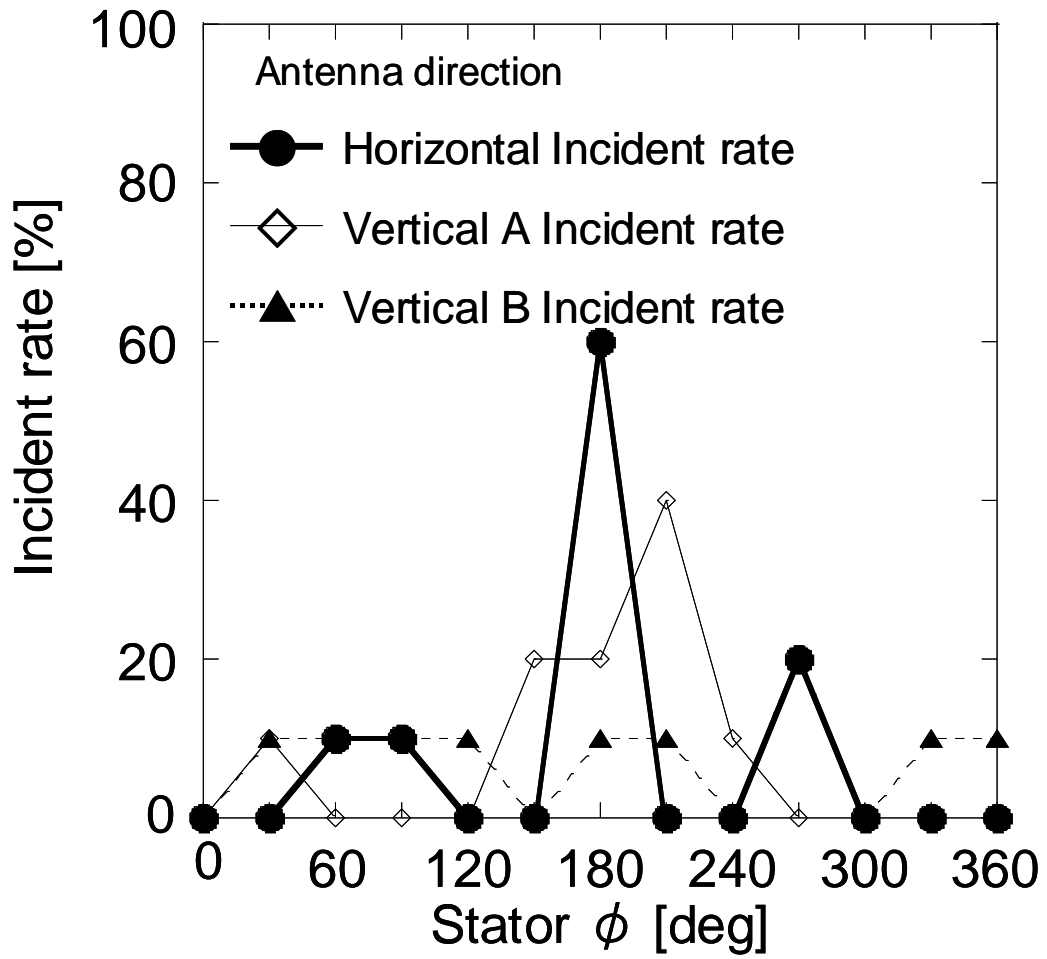


図 5-9 $V_e=0.85$ (arb. unit) 最大値検出確率

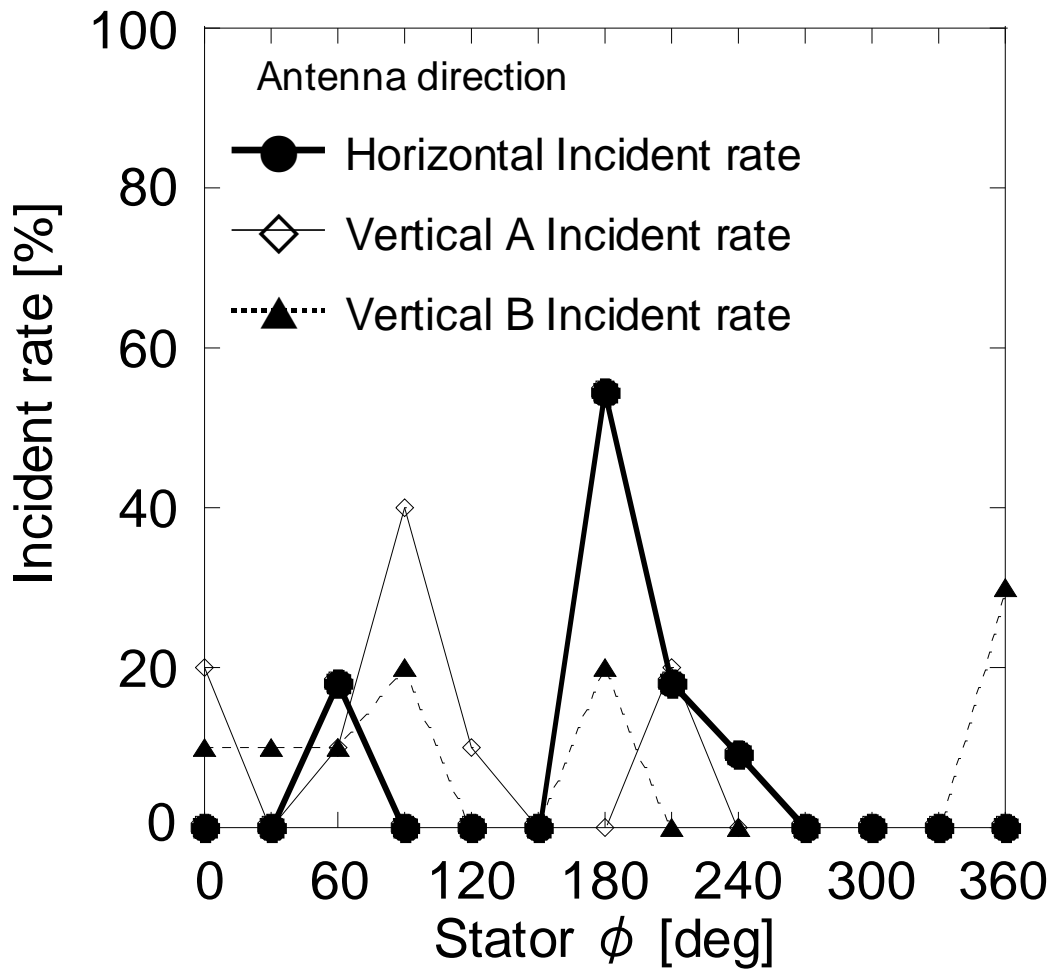


図 5-10 $V_e=1.0$ (arb. unit) 最大値検出確率

次に図 5-11 は、印加電圧 V_e を変えたときの部分放電測定器で放電電荷量を測定した結果と、図 5-7, 図 5-8, 図 5-9, 図 5-10 で求めた絶縁不良部でアンテナ出力の最大値検出確率を示した。まず、放電電荷量が印加電圧 $V_e=0.74$ (arb. unit) 付近で急激に増加し放電が発生している。

これは図 5-4 の微小ループアンテナを水平に配置したとき顕著な極大値を示したときの電圧 $V_e=0.77$ (arb. unit) とほぼ一致する電圧である。さらに, PDIV よりも印加電圧 V_e を上げていくと、放電電荷量も増加し予め設けた絶縁不良部の最大値検出確率が 50%以上と極めて高くなることが確認できる。次節では、もっとも感度が高かった水平配置に限定して絶縁不良部の有無による違いと絶縁不良部を異なる位置に設けたとき、それに対応した角度が出るか測定を行う。

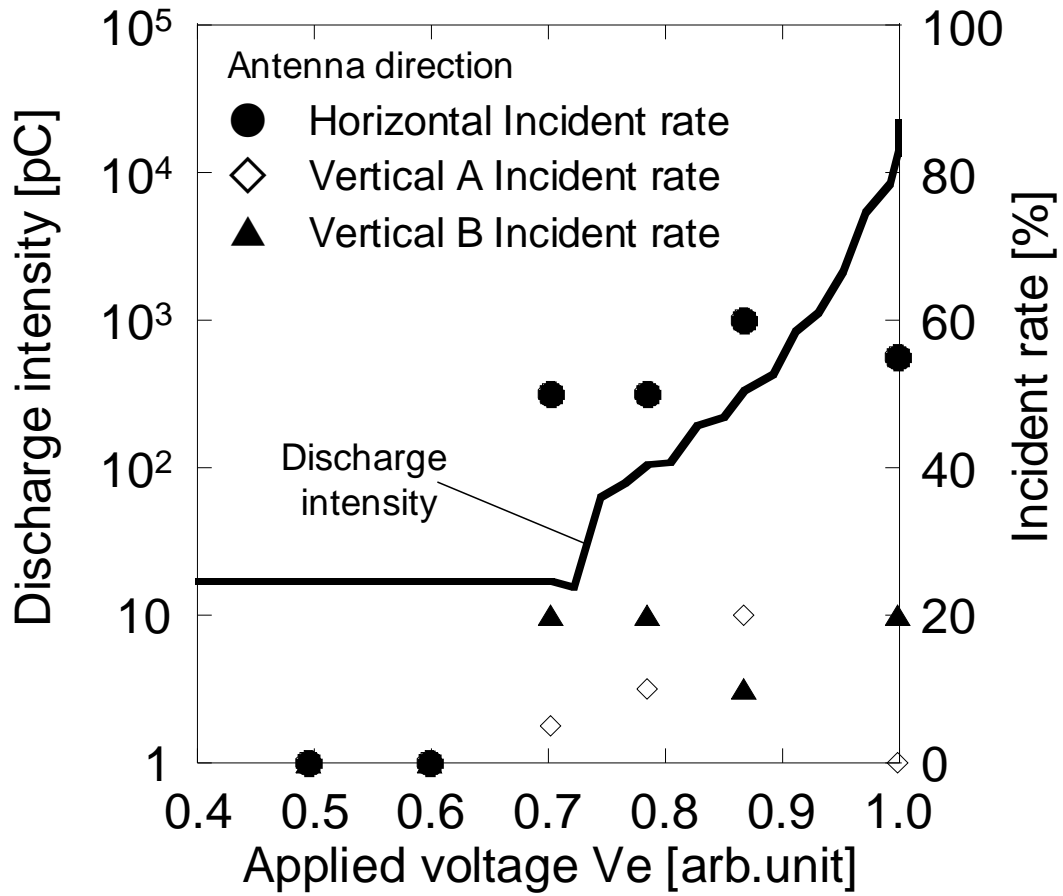


図 5-11 放電電荷量測定と最大値検出確率

5.3 絶縁不良部有無による検出確率の相違

絶縁不良部を設けない場合と、ワニス、平角エナメル線の皮膜を剥がし、絶縁紙から平角エナメル線の導体が露出した状態で $z=+50\text{mm}$ 、周方向 $\phi=210^\circ$ の位置に絶縁不良部を設けた場合の比較を実験により検証する。微小ループアンテナをコア面に対してループ面が向かい合わせになるように設置する(図 4-2 の水平面参照)。まず、PDIV を測定しそれと同じ電圧を印加した場合と、放電の検出確率から不良部を検出するために PDIV より高い印加電圧 V_e を与えることにする。

図 5-12 は $\phi=210^\circ$ に対して第 1 ピーク 54mV で $\phi=330^\circ$ の第 2 ピークの 27mV で約 2 倍の差で極大値を示した。図 5-13 は図 4-6 と比べて印加電圧は同じであるがアンテナ出力のレベルが大きく違うため出力電圧だけで不良部位を特定することは難しい。

次に図 5-14、図 5-15 に示したように印加電圧 V_e を上げると、 $\phi=210^\circ$ に集中して検出確率が他の角度に比べて 50%以上となり模擬した絶縁不良部の検出確率は 5.2 節の実験とほぼ同様の結果が得られた。絶縁不良部がないときアンテナ出力と検出確率ともに目立ったピークが存在せず、最大値が 2 個以上発生したものはない。

以上の結果より、不良部が特定できることが明らかになり、提案手法の有効性と実用性が確認できた。今後の課題として、なぜ水平配置が高い検出確率を与える結果になるかについて検討を進める。本実験は手動による実験で検討を行ったが、ステータの回転やデータ処理を自動で行えば短時間の測定が可能となるため、生産ラインで測定することは十分可能であると考えられる。

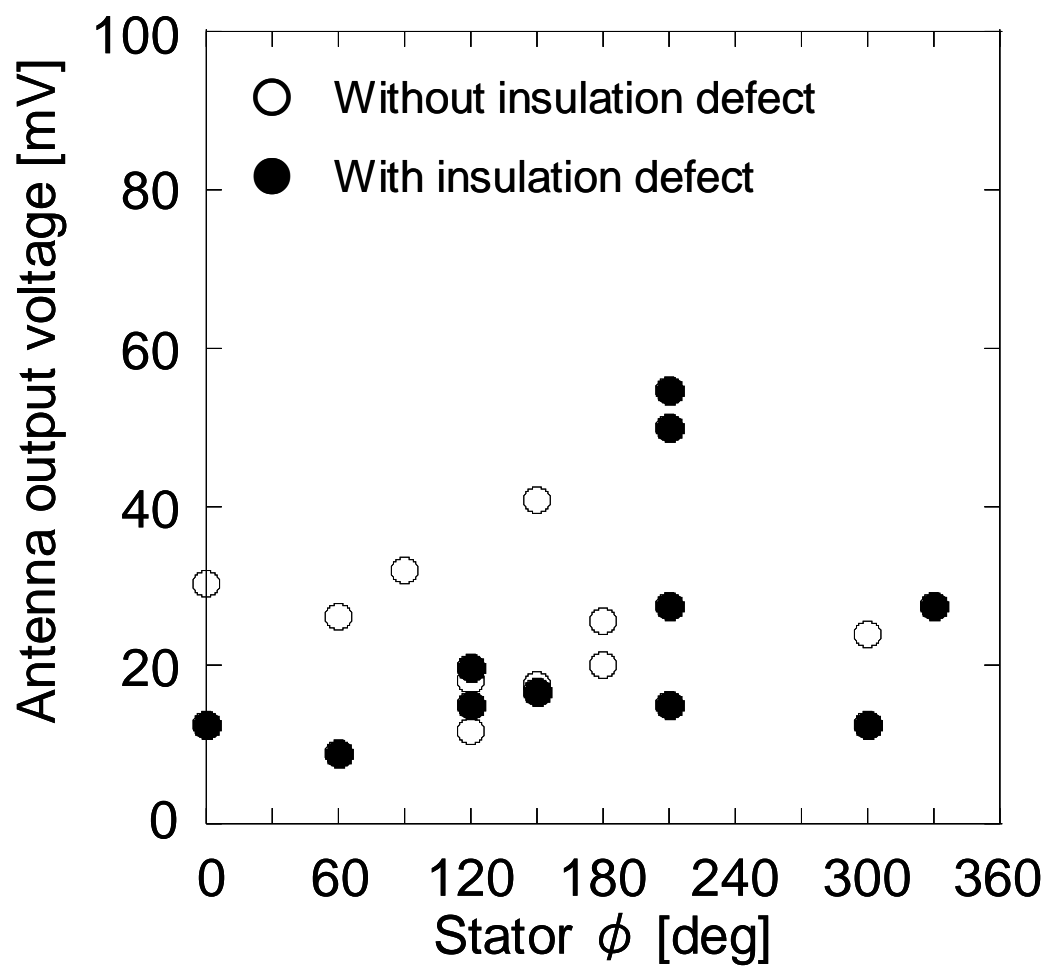


図 5-12 $V_e=0.77$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値 (Horizontal direction)

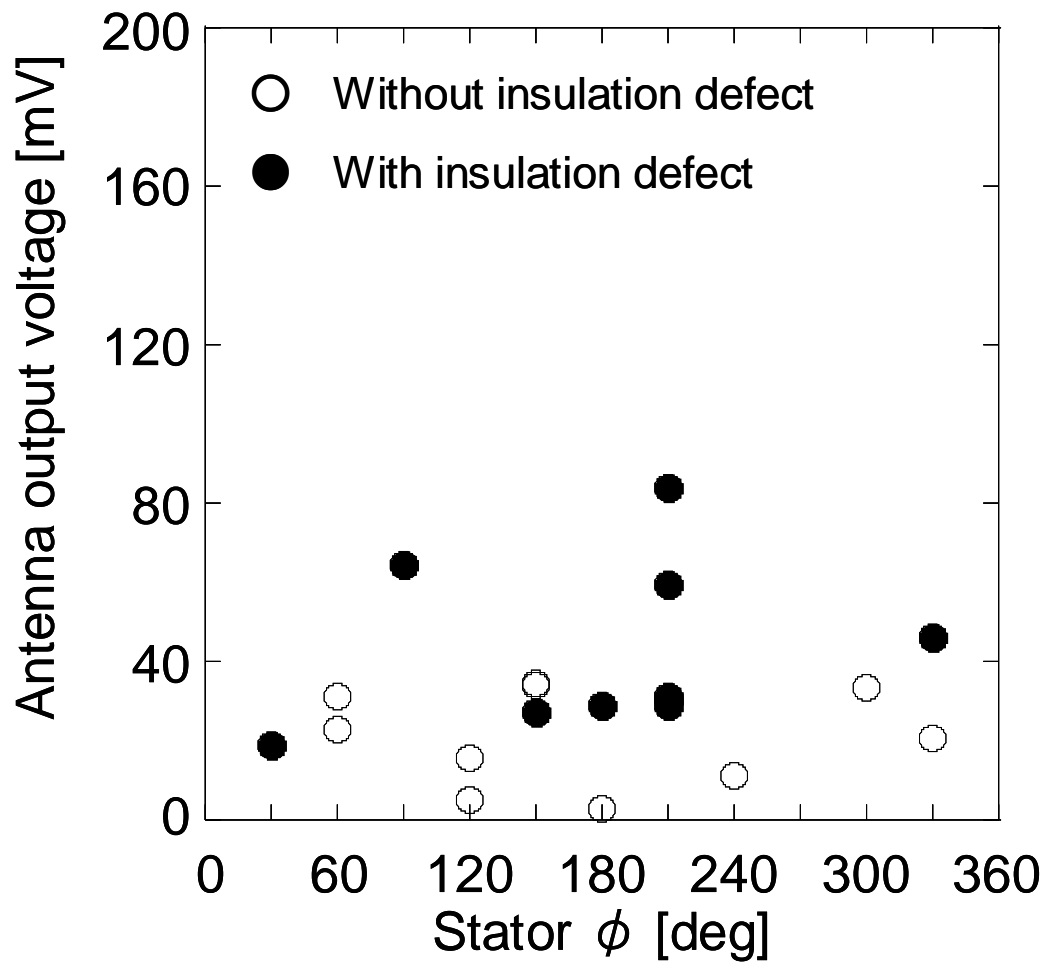


図 5-13 $V_e=1.0$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値 (Horizontal direction)

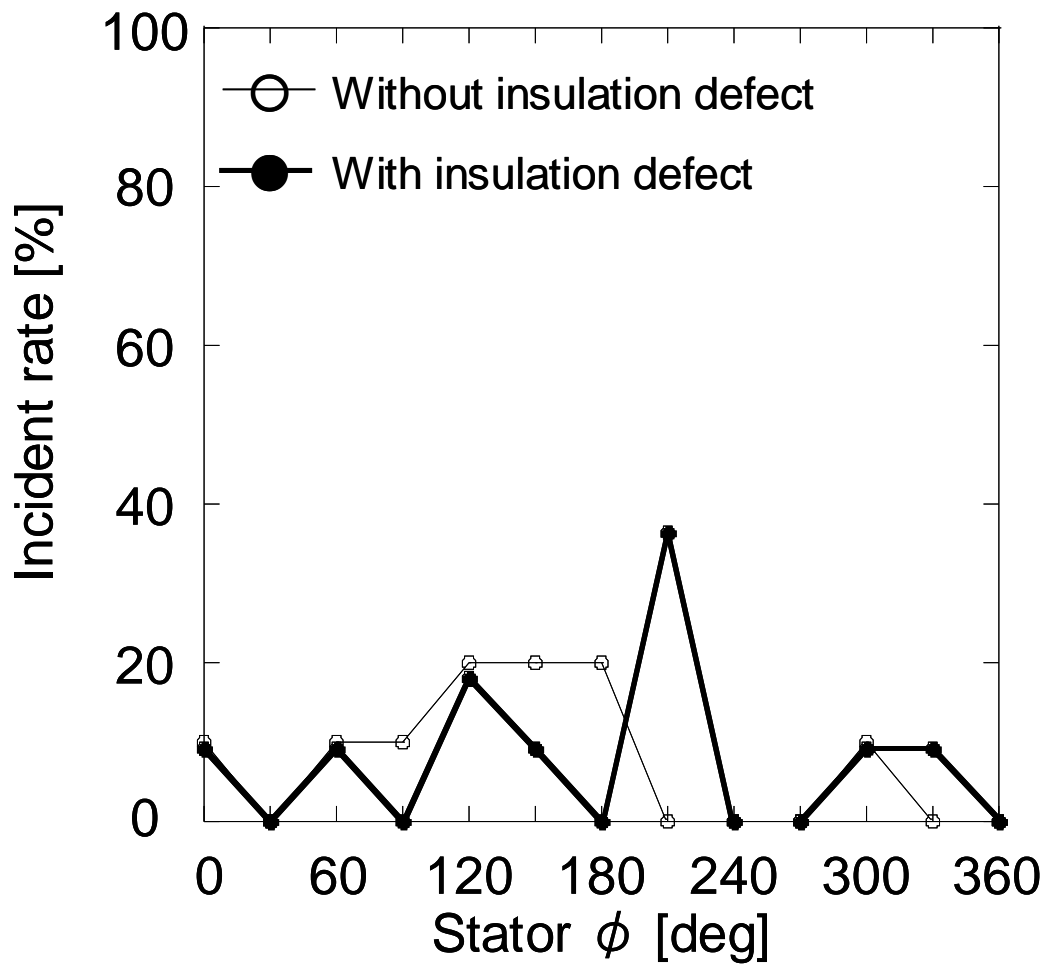


図 5-14 $V_e=0.77$ (arb. unit) 最大値検出確率 (Horizontal direction)

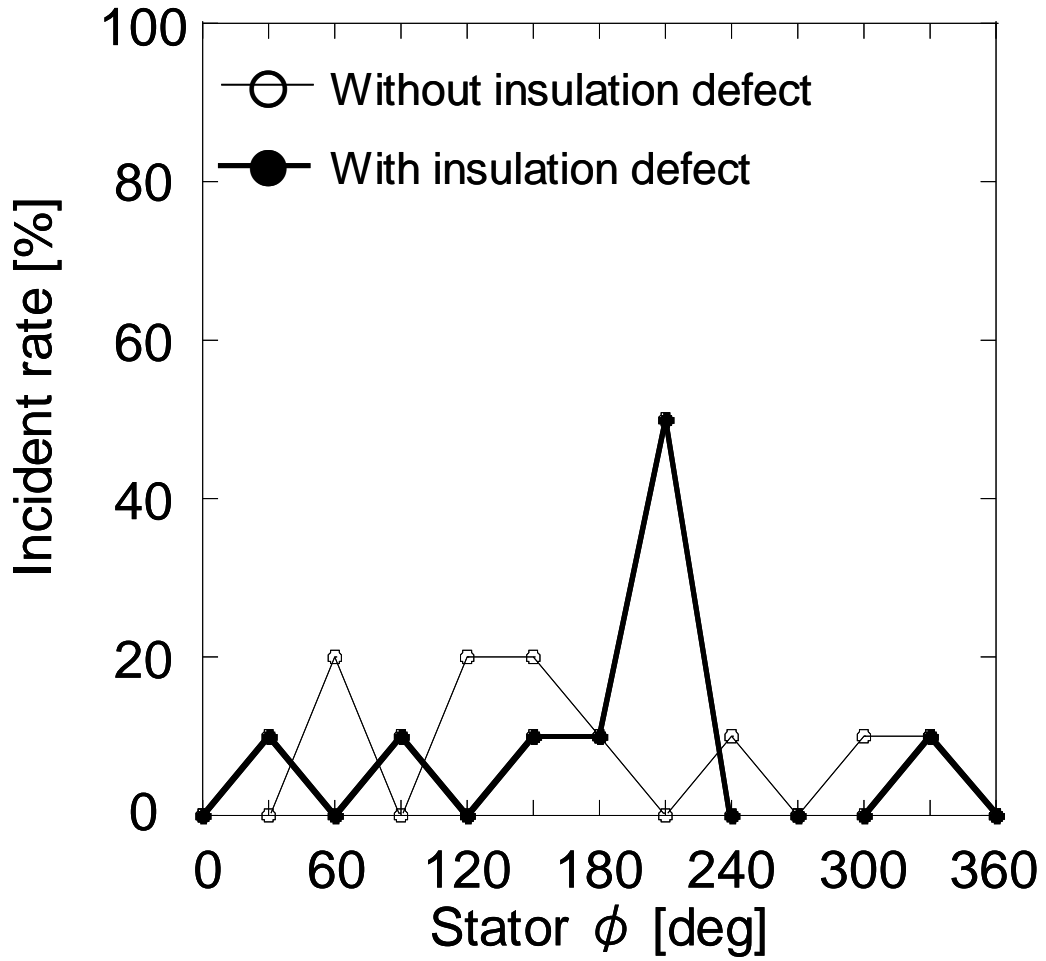


図 5-15 $V_e=1.0$ (arb. unit) 最大値検出確率(Horizontal direction)

5.4 ループ径違いによる絶縁不良検出の測定

5.3 節と同様に不良部を特定可能な結果が出るか確認するために径の小さいループアンテナを作製し測定を行った[5-3]-[5-4].

セミリジッドケーブルを用いて微小ループアンテナを作製した. 作製したループアンテナの簡易図を図 5-16 に示す. アンテナのループ直径は 20mm (半径 $a=10\text{mm}$) とした. 5.1 節, 5.2 節の実験で用いたアンリツ製 EMI プローブ MA2601B のループ直径は 25mm であり, それよりも 5mm 小型化した.

4.1 節に示した理論式より, ループ径が小さくなるとループに入る電磁波の量が減少する. そのため遠方から到来する電磁波が減少し, アンテナの近傍にある放電源からの電磁波の影響が強く表れることにより, 絶縁不良の影響がより顕著に表れるかの確認を行った.

測定系は図 4-1 の構成と同じである. デジタルオシロスコープはテクトロニクス製 DP04104 である. 電圧の印加は絶縁耐力試験装置の菊水電子製 TOS5051A にて, 50Hz の正弦波電圧 V_e をステータコイルとステータコア間に 1 秒間印加する. 減衰比 1000:1 の高電圧プローブによりオシロスコープで印加電圧を測定しトリガとして使用する. 作製したループアンテナは同軸ケーブルを介してオシロスコープに接続し, 50Ω で終端する. 作製したアンテナをコア面に対してループ面が向かい合わせになるように設置する (図 4.2 の水平面参照).

図 4-5, 図 4-6 の手順に従って印加電圧 V_e と微小ループアンテナの設置向きを変え, ステータ全周を 10 回測定したときのアンテナ出力の最大値をそれぞれプロットしたものである.

図 5-17, 図 5-18, 図 5-19 は, ステータ全周を 10 回測定したときのアンテナ出力の最大値をそれぞれプロットしたものである. 図 5-17, 図 5-19 は $\phi=180^\circ$ の絶縁不良部以外で最大のアンテナ出力が発生することもある確認できた. そのため最大値の検出確率分布による評価を行う.

図 5-18, 図 5-19 に示したように印加電圧 V_e を上げると, $\phi=180^\circ$ に集中している. そこで, 正弦波電圧を印加したときの 5 周期中に発生したアンテナ出力の最大値を抽出し, 最大値の検出確率分布を作成する. 図 5-20, 図 5-21, 図 5-22 は示したように印加電圧 V_e を上げた場合, 絶縁不良部を設けた位置の最大値検出確率が他に比べて極めて高くなる.

模擬した絶縁不良部の検出確率は 5.2 節の実験とほぼ同様の結果が得られた. アンテナ検出確率はループ径が小さくなったことにより若干減少したが, 検出確率はほぼ 5.3 節と同様の傾向が得られた. ループ径を 5mm 小さくしても検出感度はほぼ同様の結果が得られることが分かった.

以上の結果より, 提案手法の有効性と実用性が作製したループアンテナで確認できた.

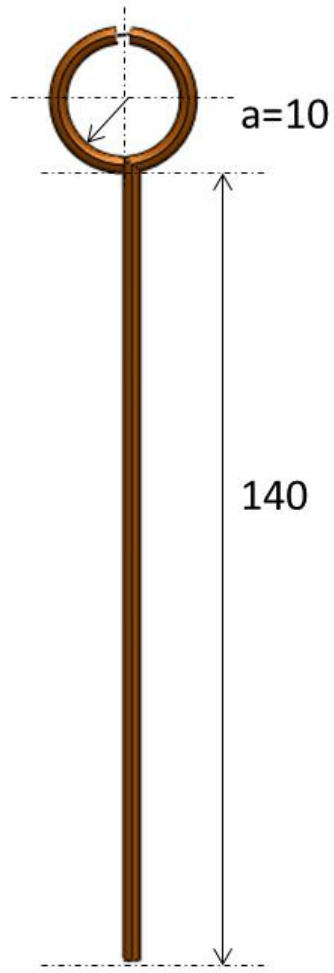


図 5-16 ループアンテナ構造

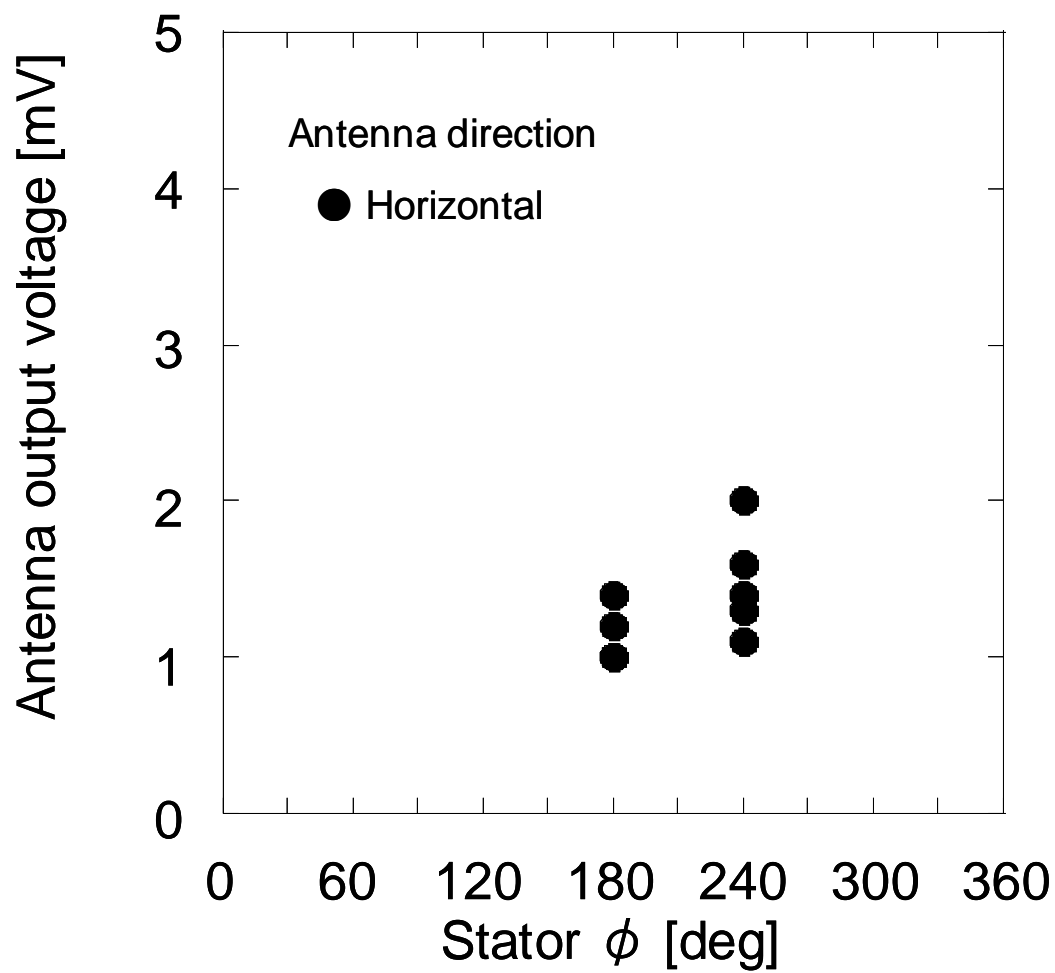


図 5-17 $V_e=0.69$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値(Horizontal direction)

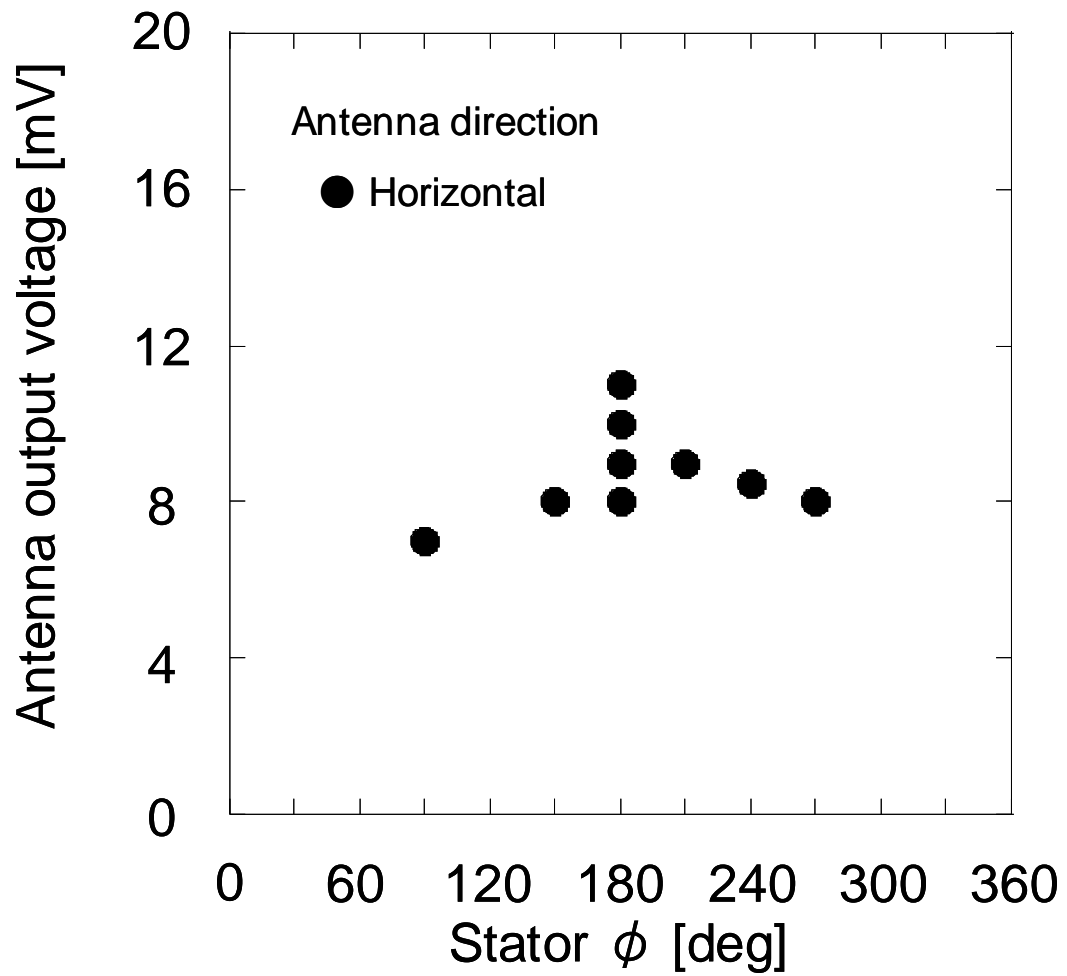


図 5-18 $V_e=0.77$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値 (Horizontal direction)

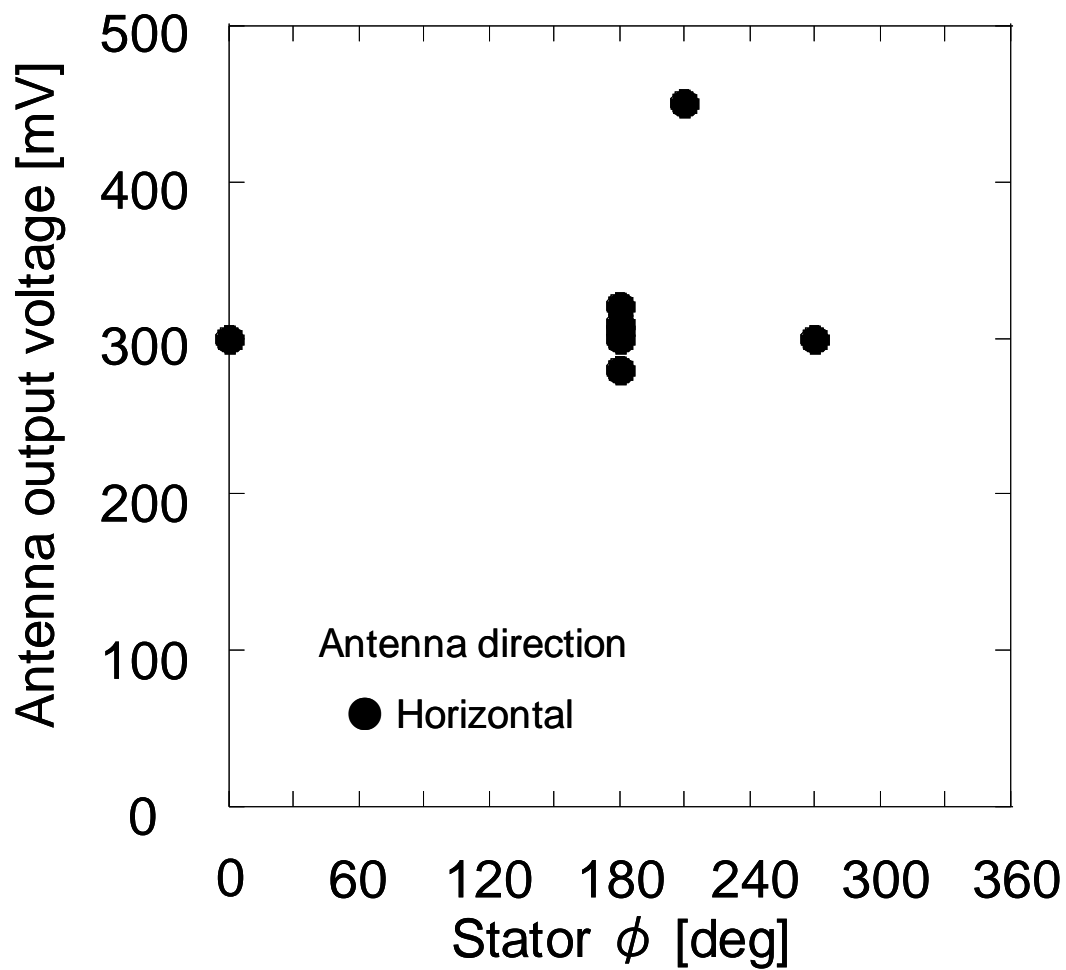


図 5-19 $V_e=0.92$ (arb. unit) アンテナ出力の最大値(Horizontal direction)

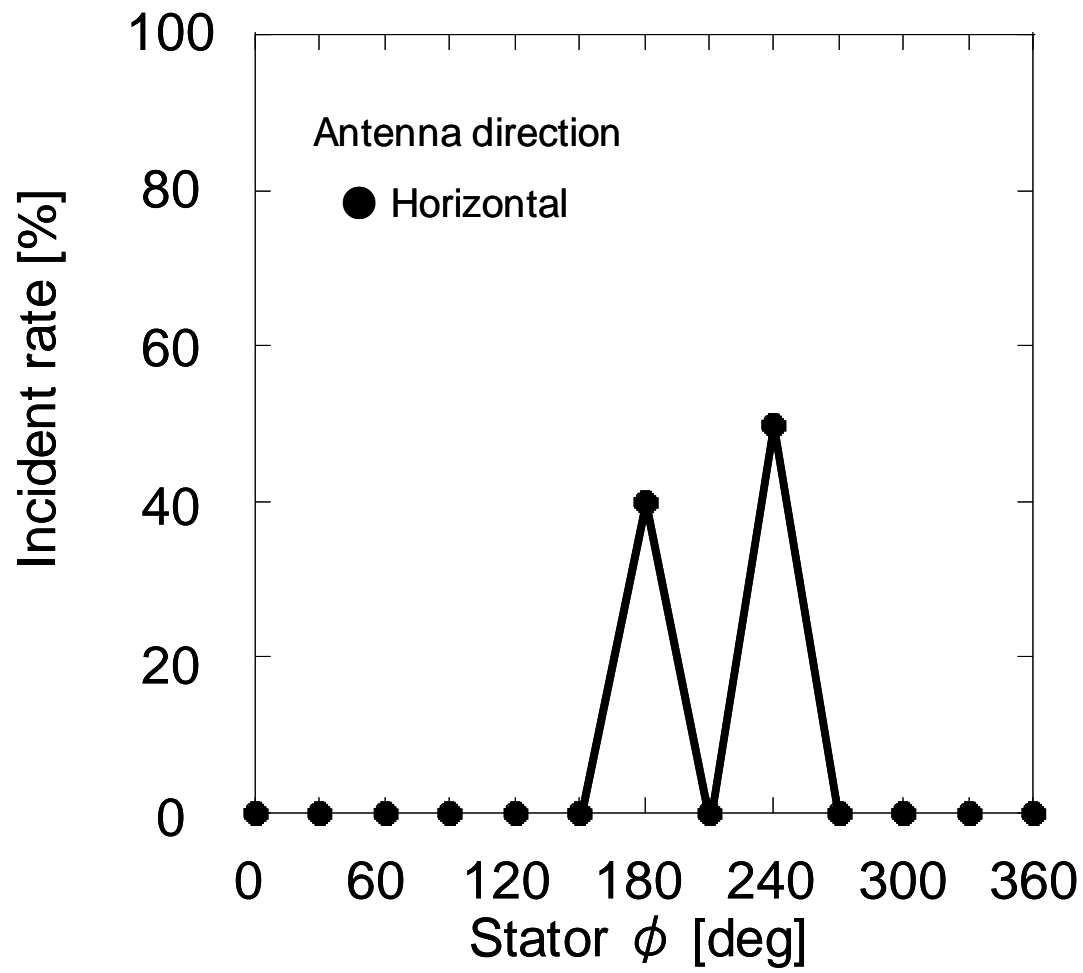


図 5-20 $V_e=0.69$ (arb. unit) 最大値検出確率(Horizontal direction)

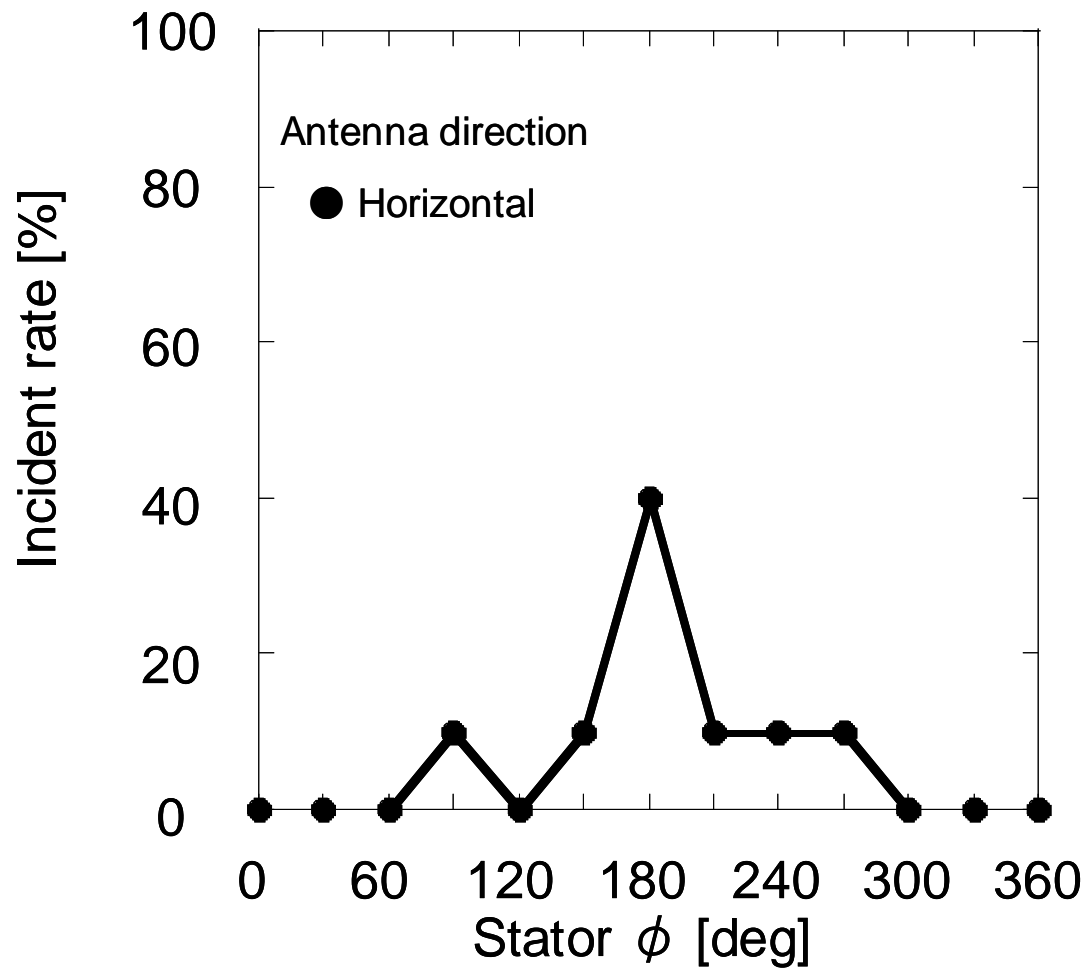


図 5-21 $V_e=0.77$ (arb. unit) 最大値検出確率 (Horizontal direction)

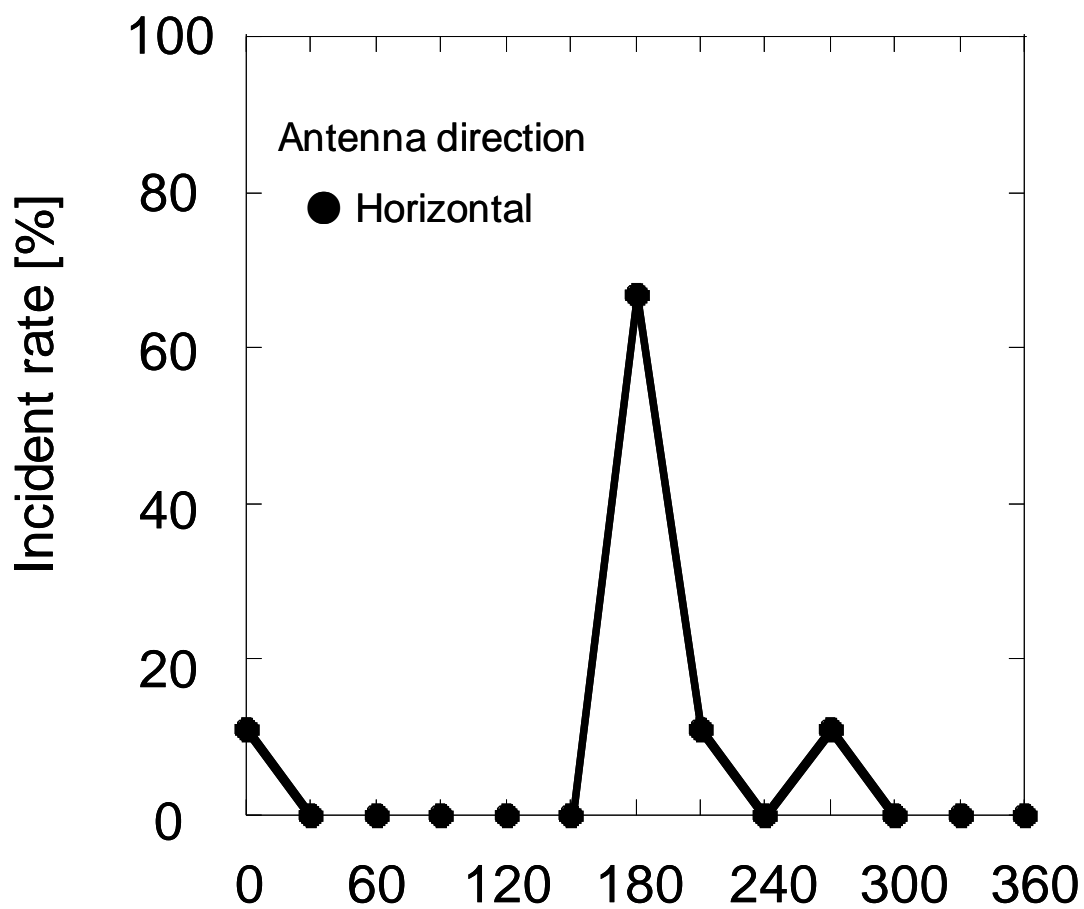


図 5-22 $V_e=0.92$ (arb. unit) 最大値検出確率 (Horizontal direction)

5.5 結言

本章では一般的な検査工程である絶縁耐力試験時に不良箇所を特定するための絶縁不良を設けたサンプルを測定した。

放電を測定した波形は正弦波の周期に対応して周期的に発生していることからステータから発生する電磁波を測定できていることが確認できた。さらに、検出した放電波形を各々、離散フーリエ変換を行ったところ白色ノイズとは違い 30MHz と 90MHz で振幅が大きい周波数特性を示した。これらは放電部を含む構造に依存した放電による電磁波特性を示したものと考えられる。今回の実験では多くのデータを収集することと、データを迅速に処理することを優先し、少なくとも低い周波数ピークの 30MHz をカバーすることとし、やや余裕をとって 100MS/s とし測定を行った。

微小ループアンテナをステータコア面に対してループ面が向かい合わせになるように水平に設置した場合、絶縁欠陥部の検出精度がよいことが実験的に確認できた。また、PDIV より印加電圧を高い電圧にすると、欠陥部以外で負荷電圧のピークが観測されるようになる。絶縁不良部以外で最大のアンテナ出力が発生することもあるため最大値の検出確率分布による評価を行った。また、製品毎のばらつきにより PDIV が多少異なるため、PDIV より高い電圧を与え、確率分布から欠陥部を特定することを提案し、確率分布を用いるデータ処理を行うことにより、印加電圧により値が異なるアンテナ負荷電圧に対して閾値を規定しやすいことがわかった。

また、アンテナを水平配置に限定して絶縁不良部を設けない場合と絶縁不良部を設けた場合の比較を実験により検証した結果、絶縁不良部がないときアンテナ出力と検出確率ともに目立ったピークが存在せず、最大値が 2 個以上発生しなかった。絶縁不良部の有無による顕著な差が確認できた。

なお、アンテナ検出確率はループ径を 5mm 小さくしても検出感度はほぼ同等

の結果が得られることが分かった。

これらの提案手法の有効性と実用性が確認できた。今後の課題として、なぜ水平配置が高い検出確率を与える結果になるかについて検討を進める。

5章 参考文献

[5-1] 繰返しインパルスにおける部分放電計測調査専門委員会：「繰返しインパルスにおける部分放電計測とインバータサージ絶縁」(2011-4)

[5-2] 中山健一，松竹由佳理，柳澤隆久，尾保手茂樹，鹿子嶋憲一，梅比良正弘，「モータ固定子内部で発生する絶縁不良箇所検出に関する検討」，電学論A，Vol. 134, No. 2, pp65-72, Feb. 2014.

[5-3] 松竹由佳理，中山健一，武田茂樹，鹿子嶋憲一，梅比良正弘，「モータ巻線挿入時に発生する絶縁不良箇所検出に関する検討」，電気学会東京支部茨城支所研究発表会，p18, Nov. 2012.

[5-4] 柳澤隆久，武田茂樹，中山健一，鹿子嶋憲一：「ステータ断面を囲むループアンテナを用いた内部絶縁欠陥箇所特定に関する研究」電気学会東京支部茨城支所研究発表会，p19, Nov. 2012.

第 6 章 結論

本論文では、世界で HEV, EV が普及していくと、使用環境に応じた信頼性を確保することが重要となってきた。自動車部品の信頼性向上は重要な課題であることを述べた。モータのステータを生産する上で短時間で各検査を行い十分な絶縁耐力があるか確認する。ステータは加工精度や組立精度が非常に重要であるが、小型化のために平角エナメル線を用いることでモータ構造が複雑化している。そのため、モータ構造も多様し複雑な作業工程が増えてきている。

その中で、ステータの検査で絶縁欠陥部があった場合、位置を特定できれば不良原因を把握でき、前工程にフィードバックし信頼性の高いステータを生産することができる。さらに、エナメル皮膜や絶縁紙の損傷は、目視にてひと目でわかるような場合もあれば、判断することが困難な場合もある。この問題を解決するため絶縁不良部で部分放電を発生させ、その部分放電にともなう電磁波を検出するための提案した。モータ巻線に絶縁不良があると、不良箇所において放電が発生することに着目し、放電測定により絶縁不良箇所を特定する方法を提案した。モータ巻線における絶縁不良と放電発生との関係はさまざまな環境条件に依存するが、放電現象測定条件を明確化するとともに、取得データを適切に抽出処理することにより、絶縁不良箇所を特定できる可能性を示した。具体的事項は以下のとおりである。

(1) 微小ループアンテナによる放電測定時のオシロスコープのサンプリング周波数は、スペクトラムのピークがある 30MHz の 2 倍以上である 100MS/s のサンプリング周波数で測定可能である。

(2) 微小ループアンテナをステータコア面に対してループ面が向かい合わせになるように水平に設置した場合、絶縁不良部の検出感度が高い。

(3) PDIV 以上の印加電圧下において模擬不良部からの放電は印加電圧をより高くすると検出確率が高くなる。複数回測定するアンテナ出力の最大値を抽出した結果より、不良部において最も高いアンテナ出力が得られない場合があることが明らかとなった。しかし、最大値の検出確率分布を作成することで、不良部を特定することができることを明らかにした。

以上の結果から提案した方法を用いることにより、目視確認しにくい生産ラインにおいて短時間で不良部を特定することが期待できる。なお今回はサンプリング周波数に関してデータ処理時間の削減による生産性向上を図るためにサンプルレートを下げて測定をおこなったが、検出精度を向上させるためにサンプリング周波数の影響の解明については今後の課題とする。ステータの回転やデータ処理を自動で行えば短時間の測定が可能となるため、生産ラインで測定することは十分可能であると考えられる。

謝辞

本研究を纏めるにあたり、ご指導ご鞭撻を賜りました茨城大学 鹿子嶋憲一特任教授、武田茂樹教授には休日や平日の遅い時間にも関わらず、終始懇切なご指導、ご助言をいただきました。また、研究のみならず公私にわたり多くのご指導ご助言を賜り重ねて深く感謝申し上げます。

茨城大学 電気電子工学科の栗原和美教授、メディア通信工学科の小山田弥平特任教授、梅比良正弘教授には、本研究をまとめるにあたり数々の貴重なご教示とご助言を賜りました。深く感謝申し上げます。

本研究を行う機会を与えていただくと共に、ご指導いただきました日立オートモティブシステム株式会社 安嶋耕部長、美留町光明主任技師に厚く御礼申し上げます。

在学期間中、茨城大学工学部 メディア通信工学科 電磁波システム研究室の仲間として研究に取り組んだ皆様に感謝申し上げます。

最後に 4年間研究活動を影ながら支えてくれた家族に感謝します。

略語表

EV: Electric Vehicle

HEV: Hybrid Electric Vehicle

P-HEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle

PMT: Photomultiplier Tube

CT: Current Transformer

IM: Induction Motor

SM: Synchronous motor

RM: Reluctance motor

IPM: Interior Permanent Magnet Motor

SPM: Surface Permanent Magnet Motor

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

VVVF: Variable Voltage Variable Frequency

PWM : Pulse Width Modulation

PDIV: Partial Discharge Inception Voltage

研究業績

[学術論文誌]

- [1] 中山 健一, 鹿子嶋 憲一, 武田 茂樹, 「プリント基板におけるスリット構造の不要放射特性」, 電学論A, Vol.132, No.6, pp404-410, July 2012.
- [2] 中山健一, 松竹由佳理, 柳澤隆久, 尾保手茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘, 「モータ固定子内部で発生する絶縁不良箇所検出に関する検討」, 電学論A, Vol.134, No.2, pp65-72, Feb. 2014.

[国際学会発表]

- [1] Kenichi Nakayama, Yukari Matsutake, Takahisa Yanagisawa, Shigeki Takeda and Kenichi Kagoshima, 「A Study on Locations of Electrical Discharge in a Motor」, The 2012 International Symposium on Antennas and Propagation, Aug. 2012.

[国内学会発表]

- [1] 中山健一, 松竹由佳理, 柳澤隆久, 尾保手茂樹, 鹿子嶋憲一, 「ステータにおける放電箇所検出に関する検討」, 電気学会全国大会, 巻:2011号, p124, March. 2011.
- [2] 松竹由佳理, 中山健一, 武田茂樹, 鹿子嶋憲一, 梅比良正弘, 「モータ巻線挿入時に発生する絶縁不良箇所検出に関する検討」, 電気学会東京支部茨城支所研究発表会, p18, Nov. 2012.
- [3] 柳澤隆久, 武田茂樹, 中山健一, 鹿子嶋憲一, 「ステータ断面を囲むループアンテナを用いた内部絶縁欠陥箇所特定に関する研究」, 電気学会東京支部茨城支所研究発表会, p19, Nov. 2012.