

# 研究成果概要書

助成対象事業名	地上及び衛星センシングによる地殻変動のリアルタイム監視とその予測技術の開発
助成対象事業者 (研究代表者名)	服部 克巳
<p><b>1 事業の概要</b></p> <p>本事業は、インドネシア・台湾・中国・イタリア・仏国・米国の研究者と共同して、ULF帯の地球電磁場や電離層の異常変動をネットワーク観測し、電磁気学的な地殻活動の監視並びに予測技術の創生を行う。地震・火山活動・地滑り等の地殻変動が活発な地域にテストサイトを構築し、地殻変動に起因する自然災害の軽減に貢献する技術開発を目指すことが目的である。</p> <p>2004年の中越地震、スマトラ沖地震、2007年中越沖地震、2008年の中国四川地震、岩手・宮城内陸地震など大きな被害をもたらす地震が続けて発生している。2011年3月には東日本大震災が発生した。地震・火山活動等の地殻活動の短期予測はその重要性・長年の努力にもかかわらず達成されていない。阪神大震災以降、短期（直前）予測は困難と言われているが、近年、地殻活動に先行する電磁気信号について信頼できるデータが報告されつつあり、短期予測の指標として注目されている。特に1989年のアメリカ・ロマプリータ地震に関連する明瞭なULF帯の磁場変動が観測されている。また、VLF帯電波の自然放射や局電波の異常伝播も報告されている。本事業では、地殻活動の準備過程において出現する微弱な電磁気現象を捉えて、地殻変動の監視と短期予測の研究開発に取り組む。具体的には、地上や衛星を用いた精密な計測と高度な信号弁別の技術を駆使して、地殻活動と関連する信号の時空間的分布の有様を正確に把握し、地殻の状態をモニタリングし、ユビタキスに情報を発信する技術を研究開発する。</p> <p><b>2 共同研究体制と分担内容</b></p> <p>本事業は①ユビタキスデータベースシステムの構築、②地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発、③地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発、④衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測、の4つのサブテーマから構成される。以下に12名の共同研究者とその主たる分担内容を記す。</p> <p>服部克巳（千葉大・教授）サブテーマ1, 2, 3：研究の総括、データサーバ設計・構築、データ解析（ULF電磁場、VHF見通し外電波干渉計、GPSデータ）、地殻変動電磁気現象の解明          Josaphat Tetuko Sri Sumatyo（千葉大・准教授）サブテーマ4：衛星リモートセンシングによる地殻変動監視（SAR, In-SAR）、災害監視用マイクロSAR衛星の設計          高野忠（日大・教授）サブテーマ2, 4：衛星リモートセンシングによるマイクロ波放射と地殻変動との関連の調査研究          湯元清文（九大・教授）サブテーマ1, 2：ULF帯の電磁気現象の観測とデータ解析          劉正彦（台湾国立中央大学・教授）サブテーマ1, 2, 3：台湾での電離層擾乱観測とデータ解析、地圏—大気圏—電離圏結合の解明          蔡龍治（台湾国立中央大学・教授）サブテーマ3：台湾でのFORMOSAT3/COSMIC衛星による電離層擾乱観測とデータ解析          Djedi S. Widarto（インドネシア科学院・主任研究員）サブテーマ1, 2, 3：インドネシア側観測研究の総括          黄清華（中国北京大・教授）サブテーマ1, 2, 3：電磁気現象と力学現象の関係（地殻変動電磁気現象）の解明          Michel Parrot（フランス CNRS・主任研究員）サブテーマ3, 4：地震電磁気衛星DEMETER観測と地圏・大気圏・電離圏結合の研究、地上観測と衛星観測の同期観測のコーディネート          Vincenzo Lapenna（イタリアCNR IMAA・主任研究員）サブテーマ1, 2：地滑りと電磁気現象の関係の研究、地下水の挙動を電磁気現象の解明          Dimitar Ouzounov（アメリカ NASA・主任研究員）サブテーマ3, 4：衛星リモートセンシングによる温度異常、赤外線放射の調査・解析と地圏・大気圏・電離圏結合の研究          Ketut Wikantika（インドネシアバンドン工大・教授）サブテーマ4：SAR（合成開口レーダ）衛星画像の解析</p>	

### 3 事業の成果

近年、地震や火山活動などの地殻活動に関連する様々な電磁気学的な現象が報告されており、従来の弾性学的なパラメータに加えて、地殻活動を予測するためのパラメータとして有効である可能性が極めて高い。なかでも、ULF帯の3成分地球磁場の異常変動や電離圏・大気圏擾乱は有望で、地殻変動をモニタする指標になる可能性がある。そこで、電磁気学的な手法による地殻変動の監視・予測技術を創生し、減災・防災に貢献する。具体的には①観測量の変動の検出や同定を高精度に行う技術の開発（信号処理、情報処理）、②変動に関連するプロセスや背後に隠れている物理機構の解明（理論）、③モデルによる評価を行う。地殻活動に関連する電磁気学的なプロセスを理解し、“地象天気”予報に資する防災科学ネットワーク監視システムを構築することが最終目的である。

本事業では、地震・火山噴火・地滑り等の地殻変動の準備・発生過程における電磁気現象の有様を、地上や衛星に搭載されたセンサを用いて国際共同ネットワーク観測することによって精確に把握し、活動を監視・予測に資する研究を実施した。主たる研究対象地域は、地殻活動が活発なアジア地域で、広帯域の複合観測サイトを構築し、電磁気データ、力学的データ、電離層データ、衛星データ、室内実験データ等を解析した。本事業は①ユビキタスデータベースシステムの構築、②地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発、③地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発、④衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測の4つサブテーマとワークショップから構成された。

本事業の成果は学術論文や国内外の学会で発表した。平成20-22年度の3年間で188件（H20年63件、H21年49件、H22年76件）の論文と学会にて338件（H20年57件、H21年109件、H22年172件）の成果を発表した。現在投稿中の論文も9件あり、活発に事業が遂行されたといえる。

本事業の実施概要について、各サブテーマおよび年度ごとにまとめる。

#### 3-1 平成20年度事業

##### 3-1-1 平成20年度の目標

###### サブテーマ1：ユビキタスデータベースシステムの構築

本年度はULF電磁場観測、電離圏・大気圏の観測（イオノゾンデ、GPS、HFドップラー、VHF干渉計など）、力学的観測（地震、歪み）、衛星観測（GPS測地、SAR（合成開口レーダ）、マイクロ波放射、赤外線放射）等のデータのデータベース化を検討し、有機的なデータベースを構築する。また解析結果なども研究者間で共有できるシステムの構築を検討する。また、FORMOSAT3/COSMIC衛星のビーコン電波の受信システムを九州、沖縄地区に新設する。中国・四川省から雲南省の地震活動の活発な地域にULF電磁場観測点を設置するための検討作業を行う。大地震発生後に機動的観測を実施するための機材を整備する。

###### サブテーマ2：地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発

地殻活動に先行する微小信号の検出のための技術開発や信号を放出している現象を可視化する技術開発を行う。具体的には時系列信号の解析（特異スペクトル解析や独立成分解析、方位測定、マルチフラクタル解析などによる信号弁別）や地下の流動物質の可視化（比抵抗トモグラフィ）を検討する。ULF帯の電磁場測定や地滑り観測などがこれにあたる。また、マイクロ波放射についても活動的火山（三宅島）での観測データの解析を行う。また、地下流体（水）の動きと電磁気変動発生との関連を室内実験で検証し、ULF帯電磁気現象発生メカニズム解明のための基礎実験を行う。

###### サブテーマ3：地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発

地殻変動に関連する大気圏および電離圏の電磁気現象の発生物理機構・伝播機構等の解明および有効なモニタリングシステムの開発を行う。そのためにはELF～VHF帯の電磁場変動の時空間的変動や信号の到来方向を推定する必要がある。このため、干渉計システムや独自の周波数を用いたシステムを構築する。また、電離圏の現象とした場合、電磁波の伝搬に重要なのは電離層の電子密度である。既存のGPSネットワークを利用し、その時空間的な変動の推定にも取り組み、異常伝搬の検証を行う。対象は四川地震や岩手・宮城内陸地震など最近の大規模地震を対象とする。

###### サブテーマ4：衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測

DEMETER衛星やマイクロ波放射計搭載衛星、赤外線センサ搭載衛星のデータを解析し、地球近傍で観測される電磁波異常や電離層電子密度異常、温度異常等と地殻変動との関係をケーススタディおよび統計的に解析する。また、SAR（InSAR）衛星データやGPS衛星から得られる地上変位量と地殻変動、電磁気変動との関連も調査する。また小型SAR衛星について、航空機搭載実験など実用化にむけた試験を行う。

#### 3-1-2 平成20年度成果

###### サブテーマ1：ユビキタスデータベースシステムの構築

統合データサーバに収録するデータの検討とサーバのプロトタイプの構築およびULF磁場データによる試験運用を行った。また、観測点整備（ULF電磁場観測：インドネシアkotabumi観測点、柿岡臨時観測等）を行った。ULF電磁場、マイクロ波観測データ等の国内外の既存観測点の維持管理およびデータの蓄積を実施した。

## サブテーマ2：地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発：

ULF 電磁場観測について、①2008年岩手・宮城内陸地震に関する ULF 電磁場変動、②南房総観測点の長期電磁場環境の評価、③電場データからの降雨現象の自動認識と除去手法の開発を実施した。

マイクロ波観測について、三宅島マイクロ波異常データと火山壁崩落の関連を調査した。

電磁気学的な斜面崩壊の監視と予測について、①地盤変動と自然電位変動の関連性②水槽実験による地下水動態と自然電位変動の関連を調査した。

## サブテーマ3：地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発

地震に先行する電離圏総電子数(TEC)変動の事例・統計解析を実施し、以下の知見を得た。事例解析については①2007年南インドネシア地震について地震の数日前に有意な減少現象があり、その空間的な広がり2000kmにおよぶこと、②2008年中国四川地震について地震の数日前に有意な減少現象があり、この現象は解析した10年間で最大の減少であること、その空間的な広がり1000kmにおよぶことがわかった。また、数時間同場所に異常領域が停滞すること、③2007年中越沖地震について2か月のデータを調査したところ数日前にTECの減少現象を確認した。インドネシア、中国地域の1998-2008のデータから統計解析を行い、GPS-TECの減少現象が大地震の数日から1週間程度前に有意であることがわかった。

## サブテーマ4：衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測

衛星観測による地殻活動監視手法の開発について次の事項を実施した。①円偏波合成開口レーダ(CP-SAR)搭載小型衛星の基本設計について(1)無人航空機(UAV)搭載用レーダも設計開発およびこの活動を支援するために、電波無響室と測定システムの開発も実施した。②ALOSのPALSARデータを使用して、バンドン市、ジャカルタ市、セマラン市、またバングラデシュ地域における地盤沈下をインタフェロメトリ合成開口レーダ(InSAR)で解析した。③スペクトルノイズの削減法、円偏波合成開口レーダ(CP-SAR)の信号処理法の開発した。④MODISを用いた火山活動監視手法の開発を実施した。

## ワークショップ等の開催

2009年3月26日から28日にかけて千葉大学において”2009 International Workshop on Validation of Earthquake Precursors by Satellite, Terrestrial and other Observations(VESTO): Case studies of the recent Asian events (衛星と地上観測された地震前兆現象の評価に関する国際ワークショップ～アジア地域の最近の自地震について～)”を開催した。2004年スマトラ地震、2007年台湾屏東地震、2007年中越沖地震、2008年中国四川地震を特にセレクトし、口頭、ポスター、インターネットセッション合わせて60件を超える講演があった。関係者において再現性、統計的、普遍性の重要性について再確認した。

## 3-2 平成21年度事業

### 3-2-1 平成21年度目標

#### サブテーマ1：ユビキタスデータベースシステムの構築

大地震発生後に機動的観測を実施するための機材を増強する。データベースシステムに登録するデータ(種類と期間)を増加させる。

#### サブテーマ2：地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発

地殻活動に先行する微小信号の検出のための技術開発や信号を放出している現象を可視化する技術開発を行う。具体的には時系列信号の解析(特異スペクトル解析や独立成分解析、方位測定、マルチフラクタル解析などによる信号弁別)や地下の流動物質の可視化(比抵抗トモグラフィ)を検討する。ULF帯の電磁場測定や地滑り観測などがこれにあたる。また、マイクロ波放射についても活動的火山(三宅島)での観測データの解析を行う。また、地下流動物(水)の動態をトモグラフィックな手法で可視化することを試みる。

#### サブテーマ3：地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発

地殻変動に関連する大気圏および電離圏の電磁気現象の発生物理機構・伝播機構等の解明および有効なモニタリングシステムの開発を行う。そのためにはELF～VHF帯の電磁場変動の時空間的変動や信号の到来方向を推定する必要がある。このため、干渉計システムや独自の周波数を用いたシステムを構築する。また、電離圏の現象とした場合、電磁波の伝搬に重要なのは電離層の電子密度である。既存のGPSネットワークを利用し、その時空間的な変動の推定にも取り組み、異常伝搬の検証を行う。対象は四川地震や岩手・宮城内陸地震など最近の大規模地震を対象とする。

#### サブテーマ4：衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測

DEMETER衛星やマイクロ波放射計搭載衛星、赤外線センサ搭載衛星のデータを解析し、地球近傍で観測される電磁波異常や電離層電子密度異常、温度異常等と地殻変動との関係をケーススタディおよび統計的に解析する。また、SAR(InSAR)衛星データやGPS衛星から得られる地上変位量と地殻変動、電磁気変動との関連も調査する。また小型SAR衛星について、衛星搭載へ向けたさまざまな試験を行う。

### 3-2-2 平成21年度成果

#### サブテーマ1：ユビキタスデータベースシステムの構築

データサーバの運用を開始し、2004年スマトラ地震、2006年台湾屏東地震、2007年中越沖地震、2008年四川地震に関連する電磁気データ（地上・衛星）の収集を開始した。ULF電磁場、マイクロ波観測データ等の国内外の既存観測点の維持管理およびデータの蓄積を実施した。

#### サブテーマ2：地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発

インドネシアの斜面崩壊地域と電磁場観測点付近の地下構造探査を行い、斜面崩壊のすべり面を推定した。また、ULF電磁場データの解析について、①2008年岩手宮城内陸地震に関するULF電磁場変動を様々な手法で解析し、地震25日前に異常放射を示唆する結果を得た。②南房総および鹿児島観測点のULF電磁場異常の統計解析を行い、地震2-3週間前の異常に有意な変動があることを示唆する結果を得た。③VHF帯干渉計の試作とテスト観測を実施した。④三宅島マイクロ波観測の撤収とデータ解析実施した。⑤電磁気学的な斜面崩壊の監視と予測について、地下水動態と自然電位変動の定式化/地盤変位と自然電位変動の関連性を調査した。

#### サブテーマ3：地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発

昨年度に引き続きTEC解析を中心に調査研究を行った。地震に先行するGPS-TECの異常変動について事例・統計解析を行った。事例解析では、2009年に発生したインドネシア地域の地震（パダン地震やジャワ島西部沖地震など複数の地震）について地震の数日前に有意な減少現象があり、昨年実施した統計結果を満足する結果を得た。2009-2010年に世界で発生した大規模な地震（台湾地域の地震、ハイチ地震、チリ地震等）について着手した。台湾では数日前に有意な減少現象があり、従来の統計結果を満足した。日本で発生した地震（2008年宮城岩手地震、2009年駿河湾地震など）についてを調査したところ数日前にTECの減少現象や増加現象を確認した。

日本地域での統計解析に着手し、長岡を中心として1998-2008のデータから統計解析を行ったところ、M>6異常の地震についてGPS-TECの増加現象が地震の数日から1週間程度前に有意であることがわかった。

また、ニューラルネットを用いたTECトモグラフィーのアルゴリズム開発に着手するとともに、地圏から大気圏、電離圏への輸送過程を解明するために、大気イオン濃度やラドン濃度、大気電場変動と地震の関連の調査に着手した。

#### サブテーマ4：衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測

衛星観測による地殻活動監視手法の開発を実施した。昨年度に引き続いて、①円偏波合成開口レーダ（CP-SAR）搭載小型衛星の基本設計。無人航空機（UAV）搭載用レーダの設計開発、②ALOSのPALSARデータを使用して、バンドン市、ジャカルタ市、セマラン市、またバングラデシュ地域における地盤沈下をインタフェロメトリ合成開口レーダ（InSAR）で解析、③スペクトルノイズの削減法、円偏波合成開口レーダ（CP-SAR）の信号処理法の開発、④MODISを用いた火山活動監視手法の開発と適用、⑤In-SARデータによる三宅島火山口壁崩落の推定を実施した。

#### ワークショップの開催

2009年10月2-3日に千葉大学において”日墨有効400周年記念シンポジウム”を開催した。シンポジウムは地球との共生がテーマで日墨両国に共通する地震もテーマであった。メキシコと日本の被害地震について発生メカニズムや防災について、日墨の4名の講演とパネルディスカッションを行い、短期予測の重要性について一致し、継続的な基礎研究の重要性を再認識した。また、セミナーを5回開催した。

### 3-3 平成22年度事業

#### 3-3-1 平成22年度目標

##### サブテーマ1：ユビキタスデータベースシステムの構築

システムに登録されるデータ（種類と期間）を増加させる。

##### サブテーマ2：地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発

地殻活動に先行する微小信号の検出のための技術開発や信号を放出している現象を可視化する技術開発を行う。具体的には時系列信号の解析（特異スペクトル解析や独立成分解析、方位測定、マルチフラクタル解析などによる信号弁別）や地下の流動物質の可視化（比抵抗トモグラフィー）を検討する。ULF帯の電磁場測定や地滑り観測などがこれにあたる。また、マイクロ波放射についても活動的火山での観測データの解析を行う。

##### サブテーマ3：地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発

地殻変動に関連する大気圏および電離圏の電磁気現象の発生物理機構・伝播機構等の解明および有効なモニタリングシステムの開発を行う。そのためにはELF～VHF帯の電磁場変動の時空間的変動や信号の到来方向を推定する必要がある。このため、干渉計システムや独自の周波数を用いたシステムを構築する。また、電離圏の現象とした場合、電磁波の伝搬に重要なのは電離層の電子密度である。既存のGPSネットワークを利用し、その時空間的な変動の推定にも取り組み、異常伝搬の検証を行う。対象は四川地震や岩手・宮城内陸地震など最近の大規模地震を対象とする。

##### サブテーマ4：衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測

DEMETER衛星やマイクロ波放射計搭載衛星、赤外線センサ搭載衛星のデータを解析し、地球近傍で観測される電磁波異常や電離層電子密度異常、温度異常等と地殻変動との関係をケーススタディおよび

び統計的に解析する。また、SAR (InSAR) 衛星データやGPS衛星から得られる地上変位量と地殻変動、電磁気変動との関連も調査する。

### 3-3-2 平成22年度成果

#### サブテーマ1：ユビキタスデータベースシステムの構築：

構築したデータサーバに昨年に引き続きデータを蓄積した。また、インドネシアに斜面崩壊観測用の観測点を構築するとともに既存観測点のデータ転送や電源障害の対策を行った。ULF 電磁場、VHF 干渉計、大気電場、イオン濃度観測データ等の国内外の既存観測点の維持管理およびデータの蓄積を実施した。インドネシアの斜面崩壊地域の定常観測点の構築とデータ転送システムを構築した。

#### サブテーマ2：地殻活動に関連する電磁放射（電磁気的変化）を利用した地上地殻監視システムとその予測手法の開発

ULF 電磁場観測データについて、①地球磁場変動の日変化変動について周期解析を行い、地震前に日変化パターンが有意に変化することを示唆する結果を得た。②南房総および西伊豆観測点のULF 電磁場異常の統計解析を行った。③地磁気嵐、直流電車、降雨に関連する変動を弁別するアルゴリズムの開発を行った。

VHF 帯干渉計の連続観測とデータ解析を実施した。また三宅島マイクロ波観測のデータ解析を行った。電磁気学的な斜面崩壊の監視と予測について、地下水動態と自然電位変動の定式化/地盤変位と自然電位変動の関連性と実斜面観測データの取得開始した。

#### サブテーマ3：地圏—大気圏—電離圏カップリング機構を利用した地殻活動監視・予測手法の開発

昨年度に引き続きTEC解析を中心に調査研究を行った。GPS-TECの異常変動と地震活動について事例・統計解析を行った。事例解析では、①2011年東北日本太平洋沖地震M9などの地震の数日前に有意な増加現象があった。②2010-2011年に世界で発生した大規模な地震（中国・青海地震、ハイチ、チリ、ニュージーランド地震等）について調査したところ、磁気赤道付近では数日前に有意な減少現象があり、磁気中緯度地域では増加現象が卓越する傾向があった。

統計解析では日本の長岡を中心として1998-2010のデータから統計解析を行い、M>6以上の地震についてGPS-TECの増加現象が地震の数日から1週間程度前に有意であることがわかった。また、距離依存性、マグニチュード依存性も存在することがわかった。また、中緯度地域の地震活動が活発な地域について同様な統計解析を行ったところ、TECの増加現象が有意であることがわかった。

また、ニューラルネットを用いたアルゴリズム開発し、シミュレーションや実データで有効性を検証した。大気イオン濃度・ラドン・大気電場について観測点を構築し地震との関連の調査に着手した。

#### サブテーマ4：衛星観測による地殻活動監視手法の開発とその予測

衛星観測による地殻活動監視手法の開発について、①円偏波合成開口レーダ（CP-SAR）搭載小型衛星の基本設計。試験用の無人航空機（UAV）の実現と搭載用レーダの設計開発実装、②ALOS PALSAR データを使用して、三宅島火山やインドネシア・バンドン市等における地盤沈下をインタフェロメトリ合成開口レーダ（InSAR）と新方法である体積変化抽出法（VolSAR）で解析した。③スペクトルノイズの削減法、円偏波合成開口レーダ（CP-SAR）の信号処理法の開発を引き続いて実施した。④MODISを用いた火山活動監視手法の開発とインドネシアやフィリピンの火山や日本の浅間山へ適用し、雲効果の除去が重要であることがわかった。熱帯地方の火山については雲効果の除去法を確立した。

#### ワークショップ

地震電磁気セミナーを2回開催した。2010年12月のサンフランシスコで開催されたAGUのfall meetingの際に共同研究者が集まり、今後の取り組みについては議論し、国際共同研究体制を維持し、研究を遂行することを確認した。3月後半にアジア圏の研究者が日本に集まり、ワークショップを開催する予定であったが、2011年3月11日発生した地震および原子力災害のため、中止となった。

## 4 総括

本事業を通じて、地殻変動に関連する電磁気データ（ULF 電磁場、VHF 干渉計、マイクロ波地上観測、斜面崩壊観測、大気電場、イオン濃度等地上観測データ等）取得するための観測点新設および維持、データサーバの構築が実現し、観測・解析の基盤を構築することができた。

本事業を通じて、地震に関連するULF帯の電磁場変動や電離圏電子密度変動について再現性、統計的有意性、普遍性について立証することができたといえ、現象の存在を科学的に証明したといえる。今後は電磁気現象の発生機構の解明および検証を行う必要がある。1つのアプローチとしてGPS測地データの異常変動と電磁気データの異常変動について着目してデータ解析を着手している。すなわち、力学的なパラメータと電磁気学的パラメータの関係について詳細に調査し、発生機構を解明する必要がある。将来の方向性といえる。