

平成22年 4月30日現在

研究種目：基盤研究 (B) (海外学術)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19403002  
 研究課題名 (和文) 東南アジアにおける多点複合 ULF 電磁場観測と地震電磁気現象の解明  
 研究課題名 (英文) Seismo-Electromagnetic Study based on multiple ULF-EM stations in South East Asia  
 研究代表者  
 服部 克巳 (HATTORI KATSUMI )  
 千葉大学・大学院理学研究科・教授  
 研究者番号：60244513

研究成果の概要 (和文)：地殻活動が活発で人工雑音の少ないインドネシアや台湾において、電磁気現象と地殻活動との関連を総合的に調査した。地殻活動の監視・予測手法の確立を目指し、基礎データの収集や解析を行った。ULF 電磁場観測を中心に電離圏や大気圏の異常を監視する VLF 局電波や GPS データの解析も行った。本研究の最大の成果は、インドネシアや台湾、中国等の磁気赤道域における M>6 の地震数日～10 日前の電離圏電子数の減少が統計的に有意であり、かつその領域が広範囲にわたることを世界で初めて発見したことである。

研究成果の概要 (英文)：In order to mitigate geohazard of large earthquakes with using electromagnetic phenomena, we have installed some ULF geoelectromagnetic sensors and VLF receivers in Indonesia and Taiwan, where there are less artificial noises. Not only ULF and VLF, but also GPS-TEC data have been analyzed in this project to study the lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling. The most important finding in this project is significant decrease of GPS-TEC around geomagnetic equator 3-10 days before the earthquake with M>6 (Indonesia, Taiwan, and China regions) in statistics and a vast spatial extent of ionospheric anomaly, which is greater than 1000 km.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
20年度	2,500,000	750,000	3,250,000
21年度	2,400,000	720,000	3,120,000
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：地球電磁気学、電波科学

科研費の分科・細目：数物系科学 A・自然災害科学

キーワード：地震電磁気現象、ULF 電磁場観測、VLF 電離層監視、GPSTEC、電離層擾乱、海外学術、インドネシア、台湾

## 1. 研究開始当初の背景

地震や火山噴火等の地殻活動は時に大災害を引きおこす。1995年の神戸地震、1999年の台湾・集集地震、2004年のインドネシ

ア・スマトラ地震や新潟県中越地震、2006年インドネシア・ジャワ島中部地震などが記憶に新しい。減災のためには、地震・火山活動を予測することも重要であり、多角的な監

視手法の確立が必要である。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 ULF 波動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指標的なパラメータとして有効である可能性が極めて高い。震源域で電磁波動が発生しているとする(表皮効果の観点から)最も有望な周波数帯は、ULF 帯であり、いくつかの信頼できる報告がある。Fraser-Smith らは 1989 年の Loma Prieta 地震 (M7.1) の 12 日前から震源直上にある磁場センサの示す磁場強度が上昇し、地震後 3 ヶ月間継続したことを示した。服部らは 1997 年鹿児島県北西部地震に関連して、垂水、父島、ダーウィンの磁場データを解析したところ、垂水のデータ(磁場スペクトルの鉛直成分と水平成分の比)が 2-3 週間前に異常に上昇し、その後地震が発生することを示した。同様な結果は 1999 年岩手県内陸北部地震や台湾集集地震でも得られている。2000 年伊豆諸島群発地震では、伊豆半島でアレー観測した磁場データの主成分解析を行ったところ、M6 を超える地震の数日前にある値が大きくなることが確認され、房総半島と伊豆半島のデータを用いて磁場勾配を用いた方位測定を行ったところ、将来の震源方向に磁場勾配が向くことが確認された。これらの異常現象についてマグニチュードと震源距離の関係を調査したところ、経験則であるが、M6 で検出距離が約 60km、M7 で 100km となった。ULF 帯の場合、太陽と地球の相互作用による地磁気脈動という信号が最も強い雑音となる。代表者らはこの除去方法をすでに開発している。一方、地震活動が大気圏や電離圏までも影響を及ぼしているという報告もある。GPSTEC(電離圏総電子数)の変動は、地震前に異常変動があることを示している。また、地震電磁気観測用の衛星 DEMETER が仏国により打ち上げられ、東アジアではデータを密にとっている。大気圏・電離圏の電磁現象は地上電磁場変動とも密接に関連しており、その物理機構解明のために地上観測との連携が必要不可欠である。

電磁気学的な地殻活動予測に関する研究は、地震総合フロンティア研究の枠組みで理化学研究所、宇宙開発事業団を中心に日本で平成 13 年度まで 5 年間実施された。現在では、仏国、中国、ロシア、インド、台湾、メキシコ等でも同様な研究を開始した。仏国は Demeter という小型衛星を 2004 年に打ち上げ、地震と電磁波環境の関係を詳細に調査している。ロシア、中国にも

同様な衛星計画がある。日本では、我々を含むいくつかの機関が本課題に取り組んでいる。近年では国際電波科学連合、欧州地球科学連合、米国地球物理連合や IUGG の総会にて地震電磁気のセッションが設けられ多数の論文発表があり、地殻活動に伴う電磁気現象は、未解明の物理現象として、また、地殻活動の予測の手法としての重要性が認識されている。本研究では、海外のグループのうち、インドネシア・台湾・仏国のアクティブな研究グループと協力し、人工雑音小さく規模の大きな地震が高い頻度で発生するインドネシアおよび台湾にて、地震電磁気現象解明のための観測的研究を実施する。

## 2. 研究の目的

本研究では、地震に伴う電磁気現象の(1)正確な把握およびそれらの物理機構の解明、(2)地圏—大気圏—電離圏結合過程の解明、さらに、(3)地震学や衛星データとの比較をするために、電磁気環境が良好でかつ大きな地震が繰り返し発生している台湾とインドネシアにおいて、多点複合 ULF 電磁場観測を行うことが目的である。本研究では、地震に伴う ULF 電磁場現象モデルとして提案されている、①electrokinetic による電磁放射、②micro-fracturing による電磁放射、③比抵抗構造の変化によるモデルの可能性を調査するとともに、地圏—大気圏—電離圏結合過程を観測学的に検証し、物理機構に迫る。

## 3. 研究の方法

本研究は (1)観測点整備(服部、湯元、海外協力研究者)、(2) ULF 電磁場観測にもとづく地震電磁気現象の正確な把握とその物理機構の解明(服部、湯元、海外協力研究者)、(3)地圏—大気圏—電離圏結合機構の解明(主に早川、服部、海外協力研究者)、(4)地震学や衛星データと電磁気データの比較検討(主に服部、連携研究者、海外協力研究者)の 4 つのサブテーマと(5)ワークショップ/セミナー(全員)からなるが、これまでは複数の現象が同一地点で観測された例はほとんどない。そこで規模の大きな地震が繰り返し発生する台湾とインドネシアにてテストフィールドを構築し、基礎データを収集する。主として日本、台湾およびインドネシア付近の地震活動を考慮して、研究代表者や研究分担者、海外協力研究者と協働で、既存の各種観測点や新しく設置する観測点のデータの収集や解析を実施した。本研究プロジェクトは精度良い観測を基本に、高度な信号処理にて現象を正確に把握しモデルの検討を行った。

## 4. 研究成果

2010 年 4 月 30 日までに、研究成果を学会誌に 136 件(うち査読あり 78 件)投稿し、掲載または掲載が決定している。また、国内

外の学会等で 239 件（うち招待講演 43 件）の成果報告を行った。主たる成果を前述のサブテーマ毎に簡潔にまとめる。

(1) 観測点整備

従来の観測体制を維持・強化した。

- (a) インドネシア: ULF 電磁場観測点 4 箇所、VLF 電波観測点 1 箇所 (図 1 参照)
- (b) 台湾: ULF 電磁場観測点 3 箇所、VLF 電波観測点 1 箇所 (図 2 参照)
- (c) 日本: 衛星ビーコン電波観測点 2 箇所 (阿蘇、沖縄)、大気イオン観測点 2 箇所 (清澄、内浦)、三宅島臨時観測、既存 ULF 電磁場観測点 8 箇所、維持した (図 3 参照)。また、九州大の MAGDAS/CPMN ネットワークとの協力体制も確立した。

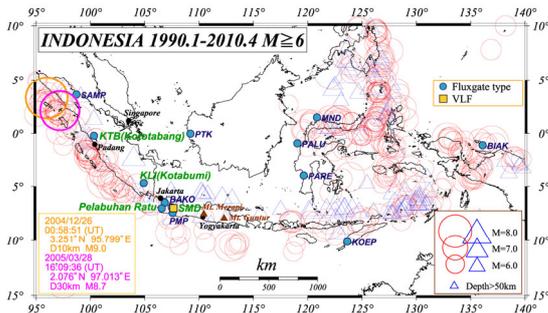


図 1 インドネシア観測点マップ (緑文字が本研究で設置やメンテナンスをした観測点)

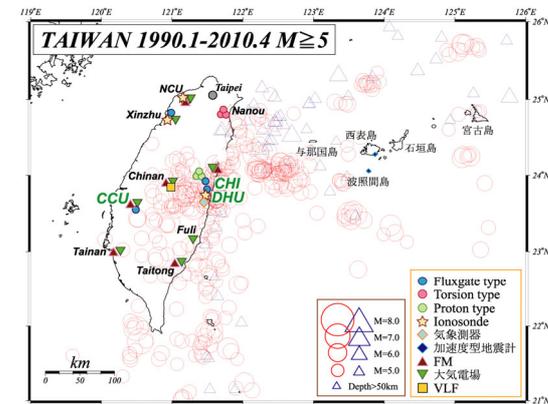


図 2 台湾の観測点マップ (緑文字が本研究で設置やメンテナンスをした観測点)

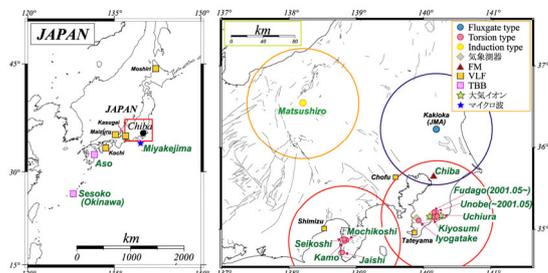


図 3 日本の観測点マップ ((緑文字が本研究で設置やメンテナンスをした観測点))

(2) ULF 電磁場観測にもとづく地震電磁気現象の正確な把握とその物理機構の解明

① 磁場変動の解析では 2004 年スマトラ地震 (M9.1) や 2007 年ペルー地震 (M8.0)、2008 年宮城岩手内陸地震 (M7.2) 等に先行する ULF 電磁場異常を検知した。宮城岩手内陸地震では、ULF 磁場データに対して、スペクトル比解析、地磁気変換関数解析、フラクタル解析と複数の解析を行い、共通して異常を呈する日時 of 調査が重要であることがわかった。図 4-6 はそれぞれ 2008 年宮城岩手内陸地震に関連するスペクトル比解析、地磁気変換関数解析、フラクタル解析の結果を示す。また、図 7 は解析期間の各異常の出現をまとめたもので、3 つの手法で同時に出現したのは 2 回であり、かつその 1 回が地震の約 25 日前である。

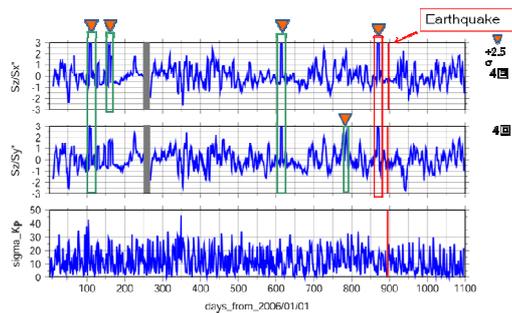


図 4 宮城岩手内陸地震に関連する ULF 帯のスペクトル比変動。赤線が地震の日時。▽が異常 (2.5σ 超) の出現を表す。

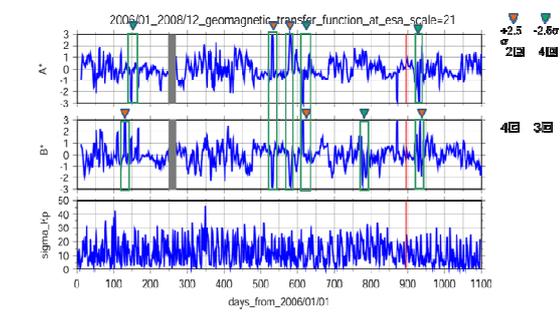


図 5 宮城岩手内陸地震に関連する地磁気変換関数の変動。赤線が地震の日時。▽が異常 (2.5σ 超) の出現を表す。

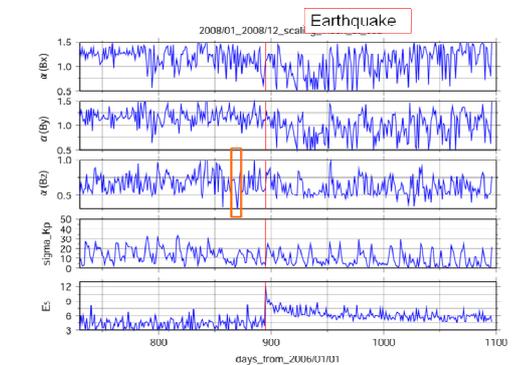


図 6 宮城岩手内陸地震に関連する ULF 帯のフラクタル解析結果。赤線が地震の日時。赤く囲った箇所が異常の出現を表す。

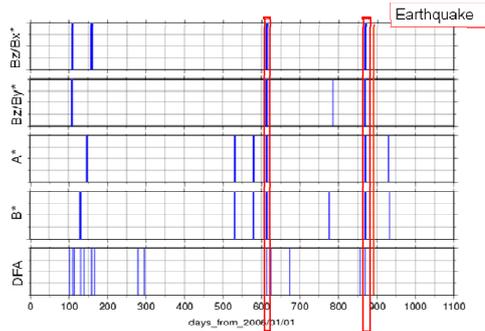
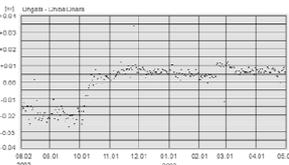


図7 図4-6の異常出現時のプロット。赤で囲った箇所が3つの手法同時で異常が出現した日時を示す。赤線は地震を表す。

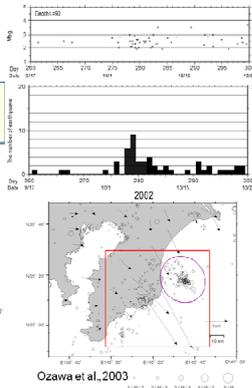
②国内のULF観測点の統計解析(鹿児島)の結果、地震20日程度前に有意なULF異常が出現することがわかった。これらの結果は電磁放射を示唆する。

**The 2002 Boso Slow EQ event**

In early October, 2002, slow slip occurred at Boso area in Japan. The surface displacement is about 1-2 cm in the south-east direction. The underground displacement is estimated about 10 cm at maximum and  $M_w = 6.5$ .



Relative displacement between Chate-Ogata during September 1 and December 2, 2002.



**Possible current estimated from polarity of magnetic fields change**

01:30 - 01:36 on October 6, 2002

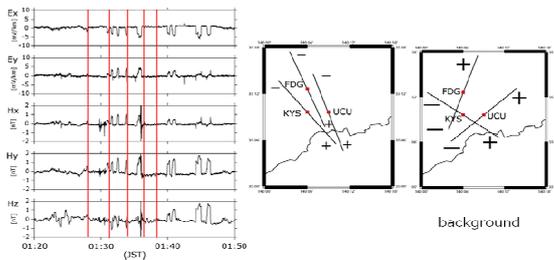
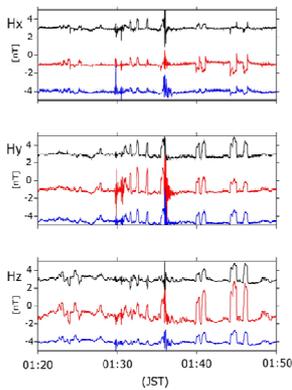


図8 2002年10月のslow EQの際に房総観測点で観測されたULF電磁場変動。磁場の極性と電場の方向から観測点地下の電流源

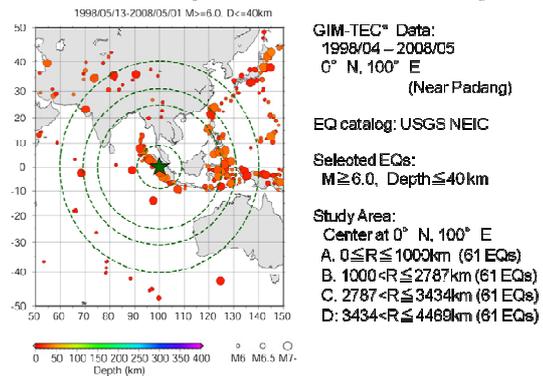
の存在が示唆される。

③房総 Slow 地震イベント (2002年10月と2007年8月)では電磁場のtransient変動が確認された(図8参照)。地下に線電流源を仮定しないと観測された波形を説明できないことがわかった。また、2次元FDTD計算機シミュレーション結果、浅部の電流源の存在を支持した。すなわち、観測点近傍における地下水流動との関連が示唆され、electro-kinetic effectによる電磁気現象の発生が示唆される結果を得ることができた。

**(3) 地圏—大気圏—電離圏結合機構の解明**

①インドネシア、台湾、中国等の磁気赤道付近のM>6の地震では震源付近にて地震数日前に電離圏総電子数(TEC)の統計的に有意な減少があった。図9は1998年から2008年の11年間のインドネシア付近のM>6地震に関する統計解析の結果である。61個という同数のM>6の地震が存在するようにA-Dの4区域に分け、解析を行ったその結果Aの領域についてのみ地震数日-10日前にTECの有意な減少現象が観測された。

**Statistical Analysis of GIM-TEC\* Anomaly**



**SEA for different regions**

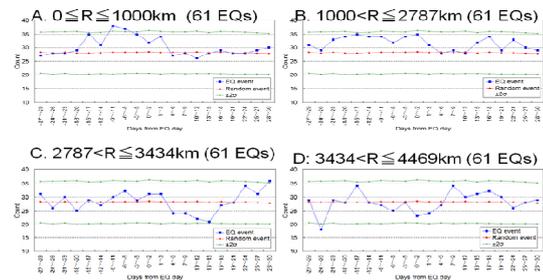


図9 インドネシア M>6 地震に関する TEC 異常。TEC の減少現象の発生頻度が有意であるかを調査しており、A 図のみ明白な異常が地震の前に観測されている。

2004年のスマトラ地震(M9.1)の場合、TECの擾乱域は数千kmにおよび、衛星や地上で観測されたVLF局電波の異常伝搬の結果とも調和的であった(図10参照)。

- ②日本付近のM>6の地震では電離圏総電子数(TEC)は減少したり、増加したり減少したりした。そこで、①と同様な統計解析を行ったところ、地震数日前にTECの増加が有意であることを示した。
- ③電離圏総電子数変動をより明確に捉え、その物理機構を解明するために、ニューラルネットを用いた電離圏トモグラフィの開発に着手した。
- ④地圏—大気圏—電離圏結合の物理機構解明を解明するために、大気イオン濃度・ラドンと地震の関連の調査観測に着手した。

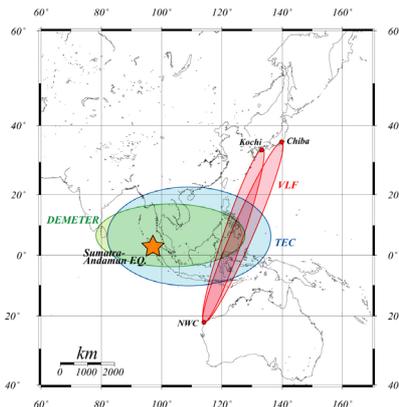


図 10 2004 年スマトラ地震に関連して観測された TEC 擾乱域 (水色) とその他の擾乱域との比較。赤：オーストラリア NWC 送信局と日本の受信局との間の地上 VLF 電波異常観測による擾乱域。緑：オーストラリア NWC 送信局電波の DEMETER 衛星での受信強度から推定された擾乱域。

#### (4) 地震学や衛星データと電磁気データの比較検討

地震と異常変動を基準として統計解析を行ったところ、(2)(3)の ULF 電磁場変動、電離圏擾乱とも地震に先行する変動が有意であることが確認された。また、地下水流動との関連を示唆するデータもあり、水槽実験にて電磁場変動と地下水動態の関連を調査したところ、実験室レベルでは飽和近似で定式化可能であることを示唆するデータを得た。

#### (5) ワークショップ/セミナー

各種会議を通じて、様々な研究者との連携を強化できた。既報の地震電磁気現象の総合的検証の必要性が共通に認識され、2004 年スマトラ地震、2006 年台湾屏東地震、2007 年中越沖地震、2008 年四川地震について科学的検証を行うことで一致し、サーバを千葉大に整備した

- ①国際ワークショップ企画開催：5 回
- (A)2007 年 11 月 6-7 日にインドネシア・バンドンで Int'l Workshop on Seismo-Electromagnetic Phenomena '07 (IWSEP07) (Bandung, Indonesia)を開催した。参加者は

約 100 名で盛況であった。本ワークショップの講演の一部は Journal of Physics and Chemistry of the Earth の特集号 "Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes and Volcanoes" (Vol.34, Issue. 6-7, pp.341-515, 2009) に掲載されている。本研究の服部と早川、および海外協力研究者の劉が本号のゲストエディターである。

- (B)2009 年 3 月 26-28 日に千葉大学にて 2009 Int'l Workshop on Validation of Earthquake Precursors by Satellite, Terrestrial and other Observations (VESTO).Case studies of the recent Asian events を開催した。約 60 名の参加があり盛況であった。本会議について Journal of Asian Earth Sciences に特集号 "Validation of Earthquake Precursors (by Satellite, Terrestrial and other Observations) VESTO" を企画し、2010 年夏の発行を目指して査読作業等が進行中である。服部と劉がゲストエディターとして編集作業に参加している。

- ・2008 年 3 月 1 日、2008 年 11 月 13-14 日、2009 年 6 月 18 日に Int'l Workshop on Space and Lithosphere Environment Changes in Asia (IWSLEC1-3) を開催した。20 名程度の参加であるが、密度の濃い議論ができた。

- ②国際会議における地震電磁気セッションの企画開催(2009 年 8 月 11-15 日に Singapore で開催された Asia Oceania Geoscience meeting 内にて)

- ③研究交流時のセミナーの開催：インドネシア・気象庁、航空宇宙局や台湾国立中央大学等で機器設置やメンテナンス出張時に開催。

- ④地震電磁気セミナーの開催：千葉大や電通大・東京学芸大で地震電磁気セミナーを計 12 回開催した。本項目の詳細は下記 URL を参照されたい。

<http://www-es.s.chiba-u.ac.jp/geoph/ulf/seminar.html#workshop>

インドネシアの設置した観測点はインドネシア気象庁の全面的な支援を受け、本研究終了後も継続して観測・データの蓄積が可能となった。また、インドネシア科学院の若手研究者が千葉大の修士課程に入学した。また、台湾や気象庁の若手研究者が別のプログラムで短期来日するなどフィールド観測やデータ解析において海外との連携を強化することができた。また、ULF 電磁場観測では統計解析や詳細なイベント解析結果などから地下流動物との関連を示唆している。流動の非定常性による電磁放射や媒質の電気伝導度変化が地震電磁気現象のソースであることを示唆している。逆に電磁氣的のセンサによって地下流動のモニタが可能であることも

導いている。

グローバルな国際共同研究体制を維持しつつ、観測・実験、データ解析、モデリング等を有機的に実施し、地震電磁気現象の総合的解明を目指す。地下の歪や応力と電磁気現象の関係、すなわち力学と電磁気学の結合させるメカニズムの全貌を解明し、最終的には地象天気予報を実現させたい。そのために、国内外の研究者や研究拠点・機関と融合・同化し、研究を推進させたいと考えている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者(海外協力研究者)には下線)

[雑誌論文](計136件:うち査読あり78件、査読なし58件)

- (1) 服部克巳, 地震電磁気研究最前線—2004年スマトラ-アンダマン地震に関連する電磁気変動—, 電気学会論文誌基礎・材料・共通部門誌, 129-A, 345-351, 2009. (査読あり)
- (2) Nishihashi, M., Hattori, K., Jhuang, H. K., and Liu, J. Y., Spatial distribution of ionospheric GPS-TEC and NmF2 anomalies during the 1999 Chi-Chi and Chia-Yi Earthquakes in Taiwan, Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 20, 779-789, 2009. (査読あり)
- (3) Liu, J. Y., Chen, Y. I., C. H. Chen, Liu, C. Y., Chen, C. Y., Nishihashi, M., Li, J. Z., Xia, Y. Q., Oyama, K. I., Hattori, K., and Lin, C. H., Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake, Journal of Geophysical Research A: Space Physics, 114, A04320, doi:10.1029 /2008JA013698, 2009. (査読あり)
- (4) Saroso, S., Hattori, K., Ishikawa, H., Ida, Y., Shirogane, R., Hayakawa, M., Yumoto, K., Shiokawa, K., and Nishihashi, M., ULF geomagnetic anomalous changes possibly associated with 2004-2005 Sumatra earthquakes, Physics and Chemistry of the Earth, 34, 343-349, 2009. (査読あり)
- (5) Rozhnoi, A., M. Solovieva, O. Molchanov, O. Akentieva, J. J. Berthelier, M. Parrot, P. F. Biagi, and M. Hayakawa, Statistical correlation of spectral broadening in VLF transmitter signal and low-frequency ionospheric turbulence from observation on DEMETER satellite, Natural Hazards and Earth System Science, 8, 1105-1111, 2008. (査読あり)

[学会発表](計239件:うち招待講演43件)

- (1) Hattori, K., Electromagnetic phenomena possibly associated with the 2004

Sumatra-Andaman earthquake, Asia Oceania Geosciences Society 2009, August 11-15, 2009, SUNTEC, Singapore (Invited)

[図書](計5件)

- (1) Hattori, K., and Telesca, L., Editors, Electromagnetics in Seismic and Volcanic Areas (Proceedings of Bilateral Seminar Italy-Japan, July 25-27, 2007), Yuubunsysa Pub., pp. 226, 2008.

[その他]

特になし。

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

服部 克巳 (HATTORI KATSUMI)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 60244513

(2) 研究分担者

湯元 清文 (YUMOTO KIYOHUMI)  
九州大学・宙空環境県境センター・教授  
研究者番号: 20125686  
早川 正士 (HAYAKAWA MASASHI)  
電気通信大学・先端ワイヤレスコミュニケーションセンター・特任教授  
研究者番号: 80023688  
伊勢崎 修弘 (ISEZAKI NOBUHIRO)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 60107943  
(H19,20年、H20年度で定年)  
佐藤 利典 (SATO TOSHINORIM)  
千葉大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号: 70222015  
(H19年、H20年~連携研究者)  
鴨川 仁 (KAMOGAWA MASASHI)  
東京学芸大学・教育学部・助教  
研究者番号: 00329111  
(H19年、H20年~連携研究者)

(3) 連携研究者 (海外の協力研究者)

Djedi Widarto: インドネシア科学院地質工学研究センター・主任研究員  
Sarmoko Saroso: インドネシア航空宇宙局・主任研究員  
Yuri Kopytenko: ロシア IZMIRAN・サンクトペテルブルグ支所長  
Michel Parrot: フランス国立物理化学環境研究所・主任研究員  
劉正彦: 台湾国立中央大学太空研究所・教授  
陳玉英: 台湾国立中央大学統数学院・教授  
蔡義本: 台湾国立中央大学地球物理学院・教授