

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 1日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2011

課題番号：20246068

研究課題名（和文）

ELF帯電磁波観測網整備と地殻変動検知システム開発に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Crustal Activity Detecting System
and Construction of EM Field Measuring Network

研究代表者

内匠 逸（TAKUMI, Ichi）

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30188130

研究成果の概要（和文）： 高感度・高耐雷のELF帯磁界センサを開発し、高精度化と性能検証を行った。地震由来の電磁界によって変調されたELF帯空電が地表で観測されるモデルが実証された。隠れマルコフモデル(HMM)を用いてモデル化された日変動パターンから異常を検出する方法を提案し、有効性を示した。近似的な絶対値ノルムに基づいた信号分離手法を提案し、有効性を示した。磁界方位角の標準偏差に着目することで、微弱な異常放射の検出ができることを示した。

研究成果の概要（英文）： We developed and verified the high-sensitive and high-thunder-proof sensor measuring the ELF band magnetic field. We showed that the sferics measured by us were modulated by the earthquake. We proposed the method of detecting anomaly from the daily variation pattern using Hidden Markov Model (HMM), and showed validity. We proposed the signal separation method based on quasi-L1 norm, and showed validity. We showed that weak but anomalous electromagnetic radiations were able to detect by focusing on the azimuthal standard deviation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2009年度	9,400,000	2,820,000	12,220,000
2010年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
総計	34,700,000	10,410,000	45,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：システム情報（知識）処理，地殻活動予知

1. 研究開始当初の背景

2度の新潟中越地震、東海道沖および紀伊半島沖地震、福岡西方沖地震、能登半島沖地震など、近年も大きな地震が続いており、甚大な被害が発生している。また、M8クラスの東海、東南海地震などが近く発生する可能性が高いと認識されている。被害想定地域では、防災対策の努力が続けられている。

2007年より緊急地震速報が本格的サービ

スを始めたが、揺れの到達までの時間が短い。地震予知の研究も行われているが、現状の地質学的見地からでは困難とみられている。しかし、地震の前兆現象として電磁波の異常放射や伝播異常が報告されており、最近では欧米の関連学会が認めるところとなっている。中でも、ELF帯電磁波観測が学術的な注目を集めつつあり、人工衛星を使ったELF帯観測プロジェクトが開始されるほどである。

我々の研究グループでは、約20年に渡り、日本各地における ELF 帯磁界の観測を継続してきた。最近9年間の研究において、大気環境で計測される電磁波の一部は地殻からの放射である事が明らかになっている。また、異常放射を自動的に検知することが可能になりつつある。人間の時間感覚より遥かに緩やかな速度で進行する地球の変動を研究するためには、継続的な長期観測が不可欠である。

2. 研究の目的

地殻放射電磁波の発生メカニズムの解明は、地球科学、特に地震・火山噴火災害の緩和のために重要である。本研究は、地球科学的に未解な課題に挑戦し、科学技術と社会へ貢献することを目的とする。また、研究成果は地球物理学領域との相互評価によって、更なる深化と展開を図ることを目的とする。

本提案研究の観測による地殻活動と電磁放射の対応は極めて特徴的であり、地殻活動の研究に新たな手段を提供するものである。これにより、関東南部、東海、東南海地震に備える。

3. 研究の方法

本研究では、(1) 観測システム網の整備充実とフェイズドアレイの精度向上、(2) 地球規模、太陽系規模の電磁環境モデルの構築と雑音除去方式の確立、(3) 音響学的信号処理、統計的信号処理による地殻放射電磁波データの解析システムの確立、(4) SOM 等のニューラルネットワーク信号処理による異常信号分類手法の確立、(5) 地殻放射電磁波のデータベース化推進、(6) 地殻放射電磁波による地殻活動検知の統計的評価を行う。

(1) 観測システムの充実

観測の障害となる自然や人工のゆらぎ雑音を回避するため、それらの雑音が低減する ELF 帯磁界(223/233Hz)の観測の研究を進める。ELF 帯機器は殆ど市販されていないため、独自に設計を確立し製作する。高感度・高耐雷磁界センサの開発、感度校正機器の開発および環境磁界雑音量の評価を行う。また設置条件などの試験と改良、電話回線による多点観測のネットワーク機器を開発する。観測体制が脆弱となっている四国や紀伊半島などを候補地として現地調査を行い、新しい観測点の設置を検討する。

(2) 電磁環境モデルの構築

電磁波は電離層と地球の間でできる球殻状の導波路空間を伝播する。その導波路空間を固定的に扱えるよう、赤道ではなく地球公転面と太陽を基準とした座標系(図1)において、実際の観測値と摺り合わせながら精度の高い電磁波伝播モデルを構築する。それにより、除去すべき熱帯雷雑音の特徴を明確に

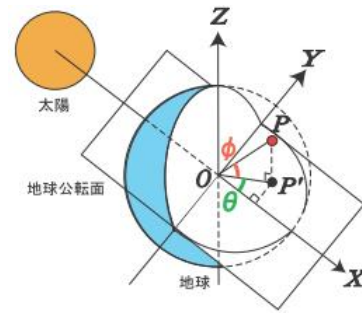


図1 地球公転面と太陽を基準とした座標系

する。電波特性解析には、有限要素法、および有限差分・時間領域法を用いる。この他、近接雷による電磁放射の影響の除去に関して検討する。

(3) 地殻放射電磁波データの解析

観測データに対してケプストラム分析などの音響学的処理を行い、特徴量の抽出、取捨選択を行う。ベクトル量子化やクラスタリングなどを通して、異常信号の自動識別につなげる。

統計量など手掛かりに混合状態の信号を分離する Blind Source Separation (BSS)を用いた環境電磁波データの成分分離の研究を進め、本観測システムの特異性に整合する分離手法を検討する。解析には低次の評価関数を利用した方が良好な結果を与えることが判明しているが、その非線形性から解析的な解が得られないため、これを改善していく。また、多次元非線形システム事象としてモデル化を進める。

電磁波発生源に近くに複数の観測点があるなどの条件が揃えば、精度の高い発生源推定が可能である。また、磁界方向に関する各種統計量に対して情報量基準や統計的検定を適用することにより、異常の自動判別を行う。また、フェイズドアレイによって得られる雑音を含むポインティングベクトルと合わせて処理を行うことで発生源推定の精度向上法を検討する。

(4) 異常信号分類手法の確立

地震前兆を含む場合、突発的な観測パワーの上昇が確認される。対して、環境電磁波は1日を周期に周期性が見られるが、季節によりパワーの変化や天候に応じた雑音の混入といった複雑な変動も伴う。そこで、隠れマルコフモデル(HMM)を用いて定常的な日変動パターンをモデル化し、その尤度変化から異常を検出する。

(5) データベース化

現在のデータベースに磁気嵐(太陽黒点)データ・潮汐と気象データも加え、さらに、異常電磁は放射データおよびその特徴量を加えて総合的データベースを構築する。その上で、異常信号検出フローを自動処理し、適宜人間の介入を許容した学習機構を持つ自動診断システムの構築を検討する。

(6) 地殻活動検知の統計的評価

アルゴリズムやシステムの試作を行い、効率的に知識の獲得・抽出（学習と汎化、データマイニング）ができるよう改良研究を行う。

4. 研究成果

(1) 観測システムの充実

経年変化、温度の影響を受けやすいアナログ回路のQを下げ、大半をデジタル化した。

独自に開発した受信方式により、ELF帯において $0.4\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ の高い検知感度が実現できた。愛知県南知多郡篠島で観測した環境磁界雑音は、 0.1Hz において $6.5\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 1.0Hz において $6.4\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であった。このため、 0.1Hz において $6.5\text{nT}/0.4\text{pT}=84\text{dB}$ の雑音の改善が期待できる。

GPSからの高精度クロックをリアルタイムOSに取り込み、同期クロックを得た。これにより、全国的に同期した高精度サンプリング位相検波装置を構成した。この他、センサーコイルの感度校正方式の確立、データロガーにおける信号処理の性能検証を行った。

デジタル系からアナログ系へのフィードバックによるSN比改善方式として、適応フィルタリングの手法を検討した。この手法によって良好な特性が得られることを確認した。また、高調波対策のため急峻な楕円フィルタを独自に設計した。これらにより、今後、観測精度のさらなる向上が見込まれる。

(2) 電磁環境モデルの構築

電離層低層（中間圏）のELF帯空電の電子密度と大気粒子との衝突周波数による伝搬特性を解析した。昼夜による伝搬特性の変化、電離層電子密度による反射高度特性から、地震電磁気現象を解析した。本震発生時の「U字型変動」や、電離層擾乱時の「逆U字型変動」などの解明を行った。

ELF帯に変換された地磁気脈動が検知され、柿岡の地磁気脈動データ変化に対応することが確認できた。また、宮城県若柳と長崎県雲仙で同様の放射異常が検知された。地震による電磁気現象の形成過程も、地表からの直流レベルの地震電界が電離層の非線形性により空電を変調して検出されることが判明した。よって、地震や地磁気脈動の電磁界によってELF帯空電が電離層において変調され、地表において検知できるという観測モデルが実証された。

東北地方太平洋沖地震に関連し、電磁波観測データを解析した。2011年3月9日に発生したM7.3の地震の直後から、ELF帯の異常を検知した。また、長期的な変化として、地震発生後の3ヶ月前から地震発生後まで、電磁波放射の平均レベル上昇現象がみられた。これは、過去10年間ではじめてであった。

地球公転面と太陽を基準とした座標系によって、複数年、複数観測点の観測平均値を

統合的に表現する手法を確立した。提案座標系上に観測電磁波強度をマッピングした。このモデルから背景信号の再現を試みたが、十分な結果には至らなかった。季節変化を吸収するため、地軸の回転角を計算に導入したところ、再現精度が向上した。また、電磁波レベルが電離層の電子密度の変動、地球規模の偏在に強く影響されることが確認された。

(3) 地殻放射電磁波データの解析

環境電磁波の月別の定常モデルを作成し、入力環境電磁波の異常度合により異常信号を検出している。まず、月別モデルの統合の最適化により、地震の前兆と考えられる信号の検出率の向上を図った。また、地震の前兆と考えられる信号以外のパルス性の異常放射が見られるため、観測波形と観測波形に対してメディアンスムージングを取った信号の差を対象として尖度の計算を行い、パルス性の異常放射を検出する方法を提案した。

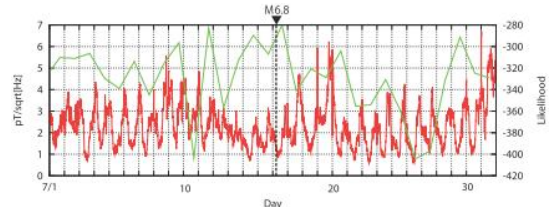


図 2 新潟中越沖地震前後の尤度変化

2007年に発生した新潟県中越沖地震に関して、過去9年分の観測波形から学習したモデルに対する尤度の調査を行った（図2）。他に、マグニチュード5以上の地震を対象として実験を行ったが、すべての地震に対してモデルの尤度の低下を確認することが出来た。地震と無関係と思われる2月や8月末にも尤度の低下が見られたが、尖度の変化から2月や8月末の低下はパルス性信号によるものと考えることができた。18回の異常放射中6回がパルス性信号であり、残り12回の内の5回が地震前兆であったため適合率は41.7%となった。更に、その他の3地点で同様の実験を行った結果、検出された139回の異常放射に対して、平均で33.3%の適合率を得ることができた。

真の状態が不明な環境電磁波に関しては、SN比による雑音の評価ができない。そこで、相互情報量に基づいて分離精度を評価する指標GICを、SN比の代替として提案した。コンピュータシミュレーションにより、SN比が高い場合にGICが小さくなることを示した。続いてBSSを用いた背景信号の分離手法を確立し、研究を進めた。その結果、独立成分解析では物理的背景が適合せず、既存の非負行列因子分解(NMF)アルゴリズムでは外れ値に脆弱であることが判明した。そこで、近似的な絶対値ノルムの最小化に基づいたNMFアルゴリズム(QL1-NMF)を提案し、外れ値への頑強性の向上を図った。

表 1 GIC による分離精度の評価

評価対象	2005/3/17	2001/1/1
観測信号	0.2447	0.4778
従来の NMF	0.0927	0.1389
QL1-NMF	0.0763	0.1234

福岡西方沖地震の3日前の観測信号に対し、背景信号の分離を試みた。主観および GIC による精度評価を行ったところ、QL1-NMF による結果がともに最良となった(表 1)。加えて、同日に長崎県雲仙において観測された外れ値の源信号らしき成分が、背景信号とは別に推定された。これにより、QL1-NMF は地殻活動に関連する源信号を直接推定できる可能性が示された。なお、別日の結果についても、QL1-NMF による結果は従来と同等以上となった。

異常発生源から 100km 以内に複数の観測点が有れば、磁界方向の変動解析で位置推定が可能であることを明確にした。また、20

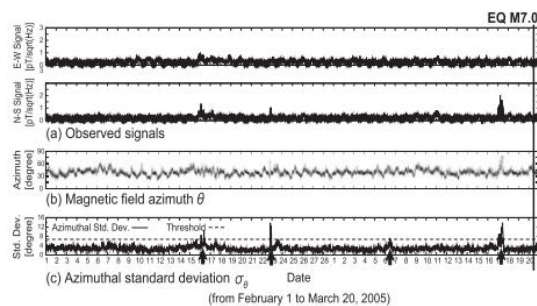


図 4 磁界方位角による異常検知結果

分ごとに磁界方位角の標準偏差を評価したところ、受信強度が低い異常電磁波放射においても評価値が上昇し、高感度に検知できることを示した(図 3)。震央から見た観測点の角度差と磁界方位角の相互相関についても調査した。異常放射が無い場合は全体的に相関が高く、異常放射がある場合は角度差が直角に近い観測点同士が無相関となることが判明した。これに基づき、検知された異常と地震前兆との関係を示した。

地震の発生間隔や規模にはフラクタル的な性質がみられるため、地震前兆電磁波にもフラクタル的な性質が現れると考えた。時系列信号のフラクタル次元を Higuchi 法により測定したところ、地震に先駆けて時限の低下がみられた。近接雷が原因と考えられる変動に対しては変化が見られない場合が多いことから、近接雷の影響を受けにくい異常検知手法として期待できる。

地震の前兆電磁波の放射エネルギーの総量を推定し、仮定はあるが地震エネルギーの 0.01% の値となることが分かった。

(4) 異常信号分類手法の確立

環境電磁波観測信号の波形データから得られた振幅密度分布を入力シンボルとする HMM による異常信号検出法を提案した。40

個の平常パターンから得られた入力シンボル系列を学習させ、10 個の平常パターンの内もっとも低い受理確率を閾値として、その閾値以上の受理確率を出力する異常パターンの数から誤検出率を求めた。このとき、誤検出率は Cross-Validation により学習データを入れ替えることにより求めた。その結果、波形画像の表示スケールを横軸 14 日、縦軸の最大値を 5pT とすることにより誤検出が 0 となることを示した。

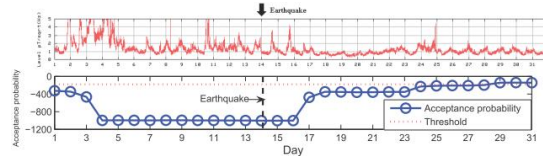


図 3 地震直前における受理確率の低下

上記の手法により波形画像内の異常信号検出が可能となったが、画像表示スケールである 14 日のうち、いつ異常信号が発生したか特定することは困難である。そこで、波形画像の切り出し日時を一日ずつずらし、それらの波形から得られた入力シンボル系列を、平常パターンを学習した HMM に入力した結果、異常信号の発生に伴う受理確率の低下を検知することに成功した(図 4)。

一方、14 日間の波形画像を入力とする HMM を用いた検出法では、異常信号の放射開始日を特定可能であるが、その減衰した日の特定は困難であり、電磁放射の減衰後に地震が発生しやすいという既知の特性を捉えることが難しい。すなわち、電磁放射の減衰を捉えるため検出結果の時間解像度を向上させる必要がある。そこで、HMM に 14 日間の平常パターンの波形画像を学習させ、テストデータとして 14 日の波形画像から 2 日分を 1 日ずつずらしながら切り出した画像から求めた入力シンボル系列を用いた。人工信号、環境電磁波信号によるシミュレーション結果より、異常パターンに含まれる異常信号の放射期間に伴い、受理確率が低下することを示した。

(5) データベース化

成果の統計的評価手法の確立に向けてのデータベース構築を進展させた。観測データは順調に蓄積され、関連の他の研究者に提供可能なレベルと判断される。

(6) 地殻活動検知の統計的評価

地殻放射電磁波による地殻活動検知の統計的評価を進める全段階として、評価プログラムのプロトタイプを作成した。地殻放射電磁波から地殻活動検知を行うことの可否に関して、統計的評価をおこなった。異常検知に関しては、高い検出率を得た。地震予知の観点では、現時点では、明確な統計的有意性を結論付けられない。継続的な観測と解析が必要である。

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には下線)

[雑誌論文] (計 50 件)

- ① M. Mouri, A. Funase, I. Takumi, A. Cichocki, H. Yasukawa, M. Hata, Global Signal Elimination from Environmental Electromagnetic Signals by Nonnegative Matrix Factorization, Journal of Signal Processing, Vol. 14, No. 6, pp.415-425, 2010、査読有
 - ② 佐藤時康、内匠逸、畑雅恭、安川博、ELF 帯環境電磁波の磁界方位変動に基づく異常電磁波検知、電気学会論文誌 C、130 巻、11 号、pp.1945-1952、2010、査読有
 - ③ 畑雅恭、内匠逸、太田健次、井筒潤、藤井隆司、佐藤時康、矢橋清二、渡辺伸夫、ELF 帯における地震電磁波観測装置の開発、Journal of Atmospheric Electricity, Vol. 30, No. 1, pp. 37-52、2010、査読有
 - ④ 畑雅恭、太田健次、井筒潤、内匠逸、藤井隆司、佐藤時康、矢橋清二、渡辺伸夫、ELF 帯における地震電磁波観測装置の開発、Journal of Atmospheric Electricity, Vol. 30, No. 1, pp.13-36、2010、査読有
 - ⑤ A. Itai, H. Yasukawa, I. Takumi, M. Hata, Anomalous Signal Detection in ELF Band Electromagnetic Wave using Multi-layer Neural Network with Wavelet Decomposition, 電気学会論文誌 A、129 巻 12 号、pp. 875-883、2009、査読有
 - ⑥ 板井陽俊、安川博、内匠逸、畑雅恭、ニューラルネットワークを用いた ELF 帯環境電磁波における異常信号の検出、Journal of Signal Processing 信号処理、Vol.13、No.1、pp.55-65、2009、査読有
 - ⑦ M. Mouri, A. Funase, A. Cichocki, I. Takumi, H. Yasukawa, M. Hata, Global Signal Elimination and Local Signals Enhancement from EM Radiation Waves Using Independent Component Analysis, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E91-A, No. 08, pp.1875-1882、2008、査読有
 - ⑧ 板井陽俊、安川博、内匠逸、畑雅恭、ニューラルネットワークによる ELF 帯環境電磁波の異常信号検出、電子情報通信学会論文誌 A、Vol. J91-A, No. 7, pp.735-738、2008、査読有
- [学会発表] (計 49 件)
- ① Y. Ito, "Performance of Anomalous Signal Detection with HMM Approach in Electromagnetic Wave Observation Using Moving Window", 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Vancouver (Canada), 2011/7/29
 - ② M. Mouri, "ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL ELECTROMAGNETIC SIGNAL USING NONNEGATIVE MATRIX FACTORIZATION MINIMIZING QUASI-L1 NORM", 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Vancouver (Canada), 2011/7/26
 - ③ M. Mouri, "Environmental Electromagnetic Source Signal Estimation using Non-negative Matrix Factorization Minimizing Quasi-l1 Norm", 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, Toyama (Japan), 2010/9/25
 - ④ Y. Ito, "HMM Based Anomalous Signal Detection From ELF Electromagnetic Wave Signals", 2010 European Signal Processing Conference, Aalborg (Denmark), 2010/8/27
 - ⑤ Y. Ito, "A Study on Anomalous Signal Detection Using HMM for ELF Electromagnetic Wave", 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii (USA), 2010/7/28
 - ⑥ Y. Ito, "Anomalous Signal Detection from Electromagnetic Wave Observation Signals Using HMM", 2010 RISP International Workshop on Nonlinear Circuits, Communications and Signal Processing, Hawaii (USA), 2010/3/3
 - ⑦ H. Yasukawa, "Signal Detection Technology on Earth Diastrophism Using Electromagnetic Wave Observation", 2009 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Kanazawa (Japan), 2009/12/9.
 - ⑧ A. Itai, "Background Noise Estimation Using Outer Product Expansion for ELF Electromagnetic Wave", 2009 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Kanazawa (Japan), 2009/12/7.
 - ⑨ Y. Ito, "A Study on Anomalous Signal Detection from ELF Electromagnetic Wave Data Using HMM", 2009 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia, Osaka (Japan), 2009/10/22
 - ⑩ M. Mouri, "Implementation of Matrix Factorization based on Minimizing Quasi-absolute Distance for Electromagnetic Global Signal Elimination", Proceedings of the 17th European Signal Processing Conference, Glasgow (Scotland), 2009/8/25
 - ⑪ T. Sato, "Detection and Radiation

Area Estimation of Anomalous Environmental Electromagnetic Wave Related to Earthquake Precursor", 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape town (South Africa), 2009/7/16

⑫ Y. Takase, " Detection of Anomalous Environmental Electromagnetic Waves Based on Daily Average Using Hidden Markov Model ", Sixth International Conference on Networked Sensing Systems, Pittsburgh (USA), 2009/6/19

⑬ M. Mouri, " A Effectiveness of Global Signal Elimination from Environmental Electromagnetic Signals for Earthquake Prediction ", 2008 International Symposium on Information Theory and its Applications, Auckland (New Zealand) , 2008/12/10

⑭ T. Sato, " Anomaly Detection of Environmental Electromagnetic Wave based on Time Fluctuation and Cross-Correlation in Magnetic Field Azimuth", 2008 International Symposium on Information Theory and its Applications, Auckland (New Zealand) , 2008/12/10

⑮ M. Mouri, " Improvement of Earthquake Prediction by Using Global Signal Elimination from Environmental Electromagnetic Signals", 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston (USA), 2008/7/11.

⑯ T. Sato, " Detection of Anomalous Environmental Electromagnetic Wave by Statistical Property in Magnetic Field Azimuth", 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston (USA), 2008/7/9.

6. 研究組織

(1)研究代表者

内匠 逸 (TAKUMI ICHI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：30188130

(2)研究分担者

安川 博 (YASUKAWA HIROSHI)

愛知県立大学・情報科学部・教授

研究者番号：00305517

北村 正 (KITAMURA TADASHI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：60114865

藤原 修 (FUJIWARA OSAMU)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：60135316

王 建青 (OH KENSEI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：70250694

平野 智 (HIRANO SATOSHI)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90238379

後藤 富朗 (GOTO TOMIO)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：20324478

船瀬 新王 (FUNASE ARAO)

名古屋工業大学・工学研究科・助教

研究者番号：60378239

(3)連携研究者

該当なし

(3)連携研究者

畑 雅恭 (HATA MASAYASU)

中部大学・工学部・非常勤研究員

研究者番号：なし