

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24612001

研究課題名(和文) 土壌特性の解析による地雷検知センサ性能評価とその応用

研究課題名(英文) Evaluation of landmine detection sensors by analysing soil properties and its application

研究代表者

高橋 一徳 (TAKAHASHI, Kazunori)

東北大学・東北アジア研究センター・助教

研究者番号：60431475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は地雷除去活動で最も広く使われている金属探知機と、これから広く使われることが期待される地中レーダについて、その性能評価の手法を開発することを目的とした。地中レーダのデータが土壌誘電率の不均質分布によって劣化する影響についてモデル計算を行い、ある特定の周波数において空間分布のパターンが大きな影響を持つことを明らかにした。また、金属探知機に関して、土壌帯磁率より土壌に対する応答を計算する手法を開発し、金属探知機の埋設物検知性能に対する土壌の評価を行えるようになった。さらに、これら土壌の電気・磁気的特性を精度よく測定できる手法の開発を行った。

研究成果の概要(英文)：The research projects aimed at developing evaluation methods of metal detectors and GPR used and being used for landmine clearance operations. The quality of GPR data degrades when soil permittivity exhibits spatial variation. In order to investigate the influence GPR responses are modelled with various soil heterogeneities. It was found and demonstrated that at specific frequencies the influence of spatial pattern becomes greater. Furthermore, an analytical method to calculate metal detector response for soils from magnetic susceptibility. Using the method soils can be characterised based on the expected metal detector performance for the detection of buried objects. In addition a method for measuring dielectric and magnetic properties of soils was developed.

研究分野：地球物理学

キーワード：人道的地雷検知 地中レーダ 金属探知機 土壌物理

1. 研究開始当初の背景

現在地雷被災国で行われている地雷除去活動では、金属探知機が広く用いられている。最近では地中レーダと金属探知機を組み合わせたシステムが各国で開発され、実地試験段階にある。これらセンサは電磁気学的手法を利用しており、埋設された地雷の検知に使用する際には、土壌の電気・磁気特性がその挙動に影響を及ぼす。これらのセンサは地雷除去活動のような危険な作業で用いられるため、その特性や性能の限界などを正しく理解することで信頼性や効率を向上することができる。

2. 研究の目的

本研究では、地雷除去活動において用いられる地中レーダおよび金属探知機が土壌によって受ける影響について理解することを第一の目的とした。また、そのために必要な土壌特性の計測手法の開発や実際の土壌の計測を実施するとともに、それら手法を地雷検知以外の分野への応用を目的とした。

3. 研究の方法

(1) 不均質土壌が地中レーダに及ぼす影響について、すでに土壌誘電率の空間分布特性より観測されるクラッタ(不要反射)量を計算するモデルを提案しているが、そのモデルのさらなる実証を行った。実証の方法としてはある特定の土壌に対しレーダ観測を長期間行い、観測されたクラッタ量と季節変動による土壌誘電率空間分布特性の変化から計算されたクラッタ量を比較した。また、限られた条件のみではあるが数値計算(電磁波シミュレーション)により得られたデータに対してもモデルの実証を行った。

(2) 金属探知機に関しては、土壌帯磁率の周波数依存性とその応答に影響を与えることが理論的に知られている。そこで、実験により得られた金属探知機の性能と土壌帯磁率との関係について考察を行った。また、現場で簡単に用いることができる帯磁率計を用いて、金属探知機の応答を計算できる手法の開発を行った。

(3) 上記の研究では、精度は低くとも現場で簡便に用いることのできる土壌誘電特性測定法が実務的には求められるが、その評価を行うためには、研究室内で高い精度で土壌特性を測定する手法が必要となる。そこで、既存の材料測定法を改良し、土壌に適した測定法の開発に取り組んだ。

4. 研究成果

(1) 土壌の誘電率空間分布特性より地中レーダで観測されるクラッタ量を計算するモデルを実証するために、屋外に設置したテストサイトにおいて2010年4月から6月まで長期間の地中レーダ計測のデータを再解析し

た。本計測では同時に土壌誘電率の空間分布を計測するため、TDR計測を実施している。地中レーダにより観測されたクラッタ量と誘電率分布からのモデル計算を比較したものが図1青線であり、計算値が観測値とよく合致していることが確認された。さらに図2に示す地球統計学シミュレーションによって生成した不均質土壌モデルを用いて時間領域差分(FDTD)法を計算することにより、同様にクラッタ量のモデル計算と観測値がよく合致することを確認した。

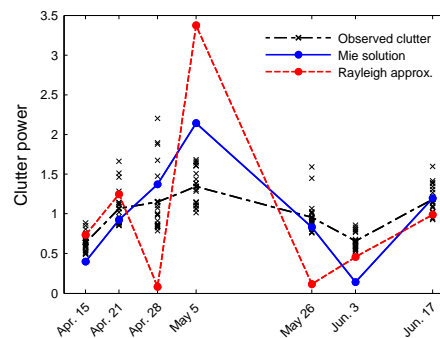


図1 地中レーダ計測で観測されたクラッタ量と計算値の比較

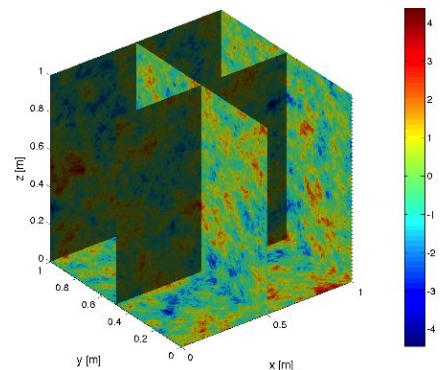


図2 地球統計学シミュレーションで生成した誘電率の空間分布モデル

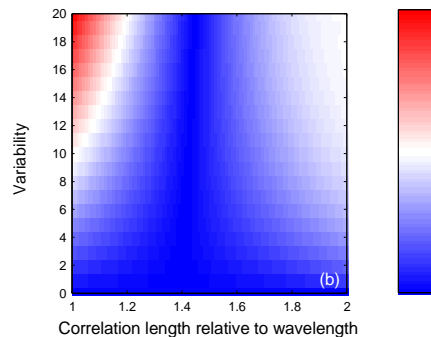


図3 平均比誘電率が15の場合における相関長と変動量がクラッタ量に与える影響。赤が相関長、青が変動量の影響が大きいことを示す。

上記による実証実験によって、クラッタ量を計算するモデルが有効であることを確認し

たため、そのモデルを用いて誘電率の空間分布特性である相関長および変動量それぞれが地中レーダに与える影響についてパラメータスタディを行った。その結果が図3であり、相関長が波長の整数倍の時に相関長が及ぼす影響が変動量に比べて大きくなることがわかった。

本研究成果について、国内外での学会、および学術雑誌にて発表を行った。さらに、(2)における研究成果と合わせて、地雷除去技術開発に貢献するものとして、国内の学術賞を受賞した。

(2) 周波数依存帯磁率を持つ土壌に対する金属探知機の応答は、Das (2006)により計算することができるが、この計算ではRichter型複素帯磁率のパラメータ(第1および第2緩和時間、直流での帯磁率)が必要であった。しかし、簡便に測定可能な帯磁率計による計測では、これら3つのパラメータを決定することができない。そこで、Richter型とは表現方法が異なるが本質的には類似のCole-Coleモデルにおいて、一般的な土壌を仮定することで、簡易な計測からRichter型のパラメータを決定する方法を考案した。この手法を用いてモザンビークの土壌に対する金属探知機の反応を計算したところ、図4に示すように探知機試験のデータとよく合致することを確認した。したがって、簡便な計測器を用いて現場で金属探知機の反応を知ることが可能となった。

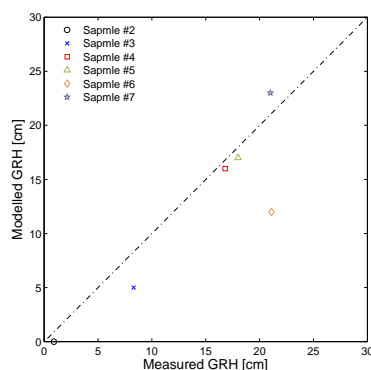


図4 測定によって得られたGRH(金属探知機が土壌に反応する高さ)と計算によって求めたGRH

平成26年9月に噴火した御嶽山では、警察が金属探知機を用いて捜索活動を行ったが、埋設物以外にも金属探知機が反応してしまうという問題を抱えており、我々のグループに協力を求めてきた。そこで、本研究に用いている地雷検知用の金属探知機を貸与し、使用方法の教示を行ったほか、他の研究グループに採取していただいた火山灰のサンプルの帯磁率測定および上記の解析を行った。その結果、通常の土壌に比べ火山灰の帯磁率は高いものの、金属探知機に重大な影響を与えるほどではないことがわかった。しかし、火山灰下の礫層がより大きな反応を示すことがわかり、その対策について今後検討してい

く(図5)。

本研究成果について、国連地雷対策局やその関連機関が開催する、地雷技術に関するワークショップにおいて発表し、各国地雷対策センターの技術担当や金属探知機製造企業から多くの質問や資料提供の問い合わせを受けた。

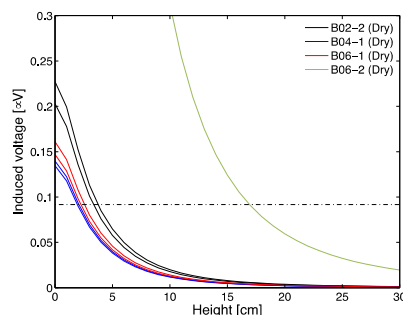


図5 測定した帯磁率から計算した誘導電圧とコイル高さの関係。緑線が礫、その他が火山灰。一点鎖線は金属探知機が反応する誘導電圧値を示す。

(3) 土壌のような比較的損失が小さく、固形ではない媒質にも用いることのできる誘電特性測定法として、同軸管法がある。この手法では同軸管内に測定媒質を充填し、測定した電波の反射および透過量より誘電率・導電率・透磁率を計算する。よくこの方法が用いられる液体等の均質媒質と異なり、土壌の場合は不均質でありその代表値を得るためにはある程度の体積が必要となる。したがって、従来より均質媒質に用いられている小さな測定装置では不適當である。土壌用に大きな測定装置を製作することは可能であるが、その場合、理想的な測定が困難となってしまう。従来用いられてきた解析的に測定データから誘電特性を計算する方法では精度が低下してしまう。そこで、数値解析を用いて測定条件に柔軟に対応できるような解析手法の開発を行った。

この手法では、ネットワークアナライザで測定した同軸管に充填された媒質の反射および透過量と、同様の構成下で数値計算により求めた反射および透過量を比較し、測定値と同様の値を与える媒質の誘電特性を解とする。したがって、反射・透過量より誘電特性を求める逆問題と見なすことができる。

これまで時間領域差分法(FDTD法)による順問題解法が開発ができていた。本数値計算では、マクスウェルの方程式を時間領域で差分することにより、電磁波のふるまいを正確に計算することができる。しかし、時間および空間的な離散点全てに対し電磁界を計算する必要があり、計算時間が大きくなってしまいう問題点があった。この同軸管法における計算では、形状を考慮し電磁界を円筒座標系で計算すること、軸に対し対象であるため3次元空間を2次元として扱うこと、同軸管内の電磁波の伝播モードを考慮し、必要電磁界成分のみの計算や境界条件の設定を工夫することにより、計算量を大幅に低減し、計算

時間を短縮することに成功している。今後、本測定手法を実現するために、数値計算（順計算）結果を測定値に近づけていくためのモデルの更新手法の開発を行う。さらに、本順計算手法を改良することにより、他の誘電特性測定法（開放同軸管反射法等）への応用を試みる。

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 15 件)

- [1] K. Takahashi, J. Igel, H. Preetz, and M. Sato, "Sensitivity analysis of soil heterogeneity for ground-penetrating radar measurements by means of a simple modeling," *Radio Science*, 査読有, vol. 50, no. 2, 79-86, 2015
doi: 10.1002/2014RS005499
- [2] K. Takahashi and M. Sato, "Detection and mapping of UXOs by electromagnetic induction sensor and self-tracking total station," *Fast Times*, 査読有, vol. 19, no. 3, 14-18, 2014
<http://www.eegs.org/past-issues>
- [3] S. Kusano, K. Takahashi, and M. Sato, "A new decomposition of a POLSAR coherency matrix using a generalized scattering model," *IEEE Journal of Selected Topics on Earth Observations and Remote Sensing*, 査読有, accepted
doi: 10.1109/JSTARS.2014.2367540
- [4] H. Liu, X. Xie, J. Cui, K. Takahashi, and M. Sato, "Groundwater-level monitoring for hydraulic characterization of an unconfined aquifer by common midpoint measurements using GPR," *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 査読有, vol. 19, 259-268, 2014
doi: 10.2113/JEEG19.4.259
- [5] K. Takahashi, J. Igel, H. Preetz, and M. Sato, "Influence of heterogeneous soils and clutter on the performance of ground-penetrating radar for landmine detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 査読有, vol. 52, no. 6, 3464-3472, 2014
doi: 10.1109/TGRS.2013.2273082
- [6] 高橋一徳, 岡村菜花, 佐藤源之, 偏波 GB-SAR によるコンクリート壁内部損傷の非破壊センシングのための基礎実験、電気学会論文誌 A、査読有, vol. 134, no. 4, 166-172, 2014
doi: 10.1541/ieejfms.134.166
- [7] H. Liu, K. Takahashi, and M. Sato, "Measurement of dielectric permittivity and thickness of snow and ice on brackish lagoon using GPR," *IEEE Journal of Selected Topics in Earth Observations and Remote Sensing*, 査読有, vol. 7, no. 3, 820-827, 2014
doi: 10.1109/JSTARS.2013.2266792
- [8] S. Kusano, K. Takahashi, and M. Sato, "Volume scattering power constraint based on the principal minors of the coherency matrix," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 査読有, vol. 11, no. 1, 361-365, 2014
doi: 10.1109/LGRS.2013.2258654
- [9] J. Igel, H. Preetz, K. Takahashi, and M. Loewer, "Landmine and UXO detection using EMI and GPR - limitations due to the influence of the soil," *First Break*, 査読有, vol. 31, no. 8, 43-51, 2013
<http://fb.eage.org/publication/content?id=70629>
- [10] K. Takahashi, M. Matsumoto, and M. Sato, "Continuous observation of natural-disaster affected areas using ground-based SAR interferometry," *IEEE Journal of Selected Topics in Earth Observations and Remote Sensing*, 査読有, vol. 6, no. 3, 1286-1294, 2013
doi: 10.1109/JSTARS.2013.2249497
- [11] K. Takahashi, H. Preetz, and J. Igel, "Influence of soil properties on the performance of metal detectors and GPR," *Journal of ERW & Mine Action*, 査読有, vol. 17, no. 1, 52-56, 2013
<http://www.jmu.edu/cisr/journal/17.1/RD/takahashi.shtml>
- [12] M. Pavlovic, K. Takahashi, and C. Müller, "Probability of detection as a function of multiple influencing parameters," *Insight*, 査読有, vol. 54, no. 11, 606-611, 2012
doi: 10.1784/insi.2012.54.11.606
- [13] K. Takahashi, J. Igel, and H. Preetz, "Modeling of GPR clutter caused by soil heterogeneity," *International Journal of Antennas and Propagation*, 査読有, vol. 2012, 1-7, 2012
doi: 10.1155/2012/643430
- [14] K. Takahashi, H. Preetz, and J. Igel, "The influence of soil properties on landmine detection," *SPIE Newsroom*, 査読有, 2012
doi: 10.1117/2.1201206.004265
- [15] M. Sato, Y. Yokota, and K. Takahashi, "ALIS: GPR system for humanitarian demining and its deployment in Cambodia," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 査読有, vol. 12, 55-62, 2012
doi: 10.5515/JKIEES.2012.12.1.55

〔学会発表〕(計 51 件)

- [1] K. Takahashi and M. Sato, "Ground-penetrating radar for landmine detection," *Mine Action Seminar*, 2015 年 2

- 月 6 日, Ankara (Turkey)
- [2] 高橋一徳、金属探知機における土壤磁気的特性の影響、電子情報通信学会電磁界理論研究会、2015 年 1 月 30 日、大阪大学(大阪)
- [3] L. Zou, K. Takahashi, and M. Sato, “Displacement estimation and monitoring from ground-based SAR amplitude components,” Asia-Pacific Microwave Conference, 2014 年 11 月 7 日, 仙台国際センター(仙台)
- [4] 高橋一徳、ヤン イーゲル、ホルガー ブレーツ、地雷検知レーダの性能と不均質土壤特性、電子情報通信学会ソサイエティ大会、2014 年 9 月 23 日、徳島大学(徳島)
- [5] 高橋一徳、松本正芳、佐藤源之、データ分割による地表設置型合成開口レーダ大気補正のための CS 検知法、電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会(招待講演)、2014 年 8 月 28 日、新潟大学(新潟)
- [6] M. Sato, K. Takahashi, H. Liu, and C. N. Koyama, “Investigation on near range SAR for inspecting inner structure of buildings,” IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2014 年 7 月 16 日, Quebec (Canada)
- [7] M. Sato, H. Liu, C. N. Koyama, and K. Takahashi, “Fundamental study on NDT of building wall structure by radar,” 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2014 年 7 月 10 日, Nantes (France)
- [8] H. Liu, C. N. Koyama, K. Takahashi, and M. Sato, “High-resolution imaging of damaged wooden structures for building inspection by polarimetric radar,” 15th International Conference on Ground Penetrating Radar 2014, 2014 年 7 月 3 日, Brussels (Belgium)
- [9] L. Yi, M. Sato, and K. Takahashi, “Optimization of data sampling and imaging reconstruction by GPR,” 15th International Conference on Ground Penetrating Radar 2014, 2014 年 7 月 1 日, Brussels (Belgium)
- [10] M. Sato, H. Liu, T. Komagino, and K. Takahashi, “Archaeological survey by GPR for recovery from 3.11 Great Earthquake and tsunami in East Japan,” 15th International Conference on Ground Penetrating Radar 2014, 2014 年 6 月 30 日, Brussels (Belgium)
- [11] K. Takahashi, H. Preetz, J. Igel, “Performance of demining sensors and soil properties,” UNMAS/GICHD Mine Action Technology Workshop, 2014 年 6 月 19 日, Pretoria (South Africa)
- [12] K. Takahashi and M. Sato, “Lessons learned from the deployment of dual sensor ALIS for humanitarian demining in Cambodia,” UNMAS/GICHD Mine Action Technology Workshop, 2014 年 6 月 18 日, Pretoria (South Africa)
- [13] J. Igel and K. Takahashi, “Influence of antenna polarization on GPR signals of linear targets,” 74th Annual Meeting of German Geophysical Society, 2014 年 3 月 12 日, Karlsruhe (Germany)
- [14] 高橋一徳、劉海、佐藤源之、震災復興を促進するアレイ型地中レーダによる遺跡計測、第 12 回地下電磁計測ワークショップ、2013 年 11 月 23 日、東北大学(仙台)
- [15] 高橋一徳、劉海、クリスチャン コヤマ、佐藤源之、20GHz 帯 GB-SAR による構造物内部計測の基礎研究、第 12 回地下電磁計測ワークショップ、2013 年 11 月 22 日、東北大学(仙台)
- [16] K. Takahashi and M. Sato, “Imaging of buried structures by a GPR combined with a self-tracking total station,” The 11th SEGJ International Symposium, 2013 年 11 月 18 日, 新横浜プリンスホテル(横浜)
- [17] L. Yi, H. Liu, K. Takahashi, and M. Sato, “Archaeological survey of Dangoyama Kofun by 3DGPR,” The 11th SEGJ International Symposium, 2013 年 11 月 18 日, 新横浜プリンスホテル(横浜)
- [18] 高橋一徳、ヤン イーゲル、ホルガー ブレーツ、地中レーダ計測における不要反射波モデリングの土壤季節変動に対する実験的実証、電磁界理論シンポジウム、2013 年 11 月 15 日、星野リゾート(青森)
- [19] K. Takahashi, M. Matsumoto, and M. Sato, “Monitoring of displacement on a landslide slope by GB-SAR interferometry,” 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2013 年 9 月 26 日, つくば国際会議場(茨城)
- [20] M. Matsumoto, K. Takahashi, and M. Sato, “Long-term landslide monitoring by GB-SAR interferometry in Kurihara, Japan,” 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2013 年 9 月 26 日, つくば国際会議場(茨城)
- [21] 高橋一徳、岡村菜花、佐藤源之、偏波 GB-SAR によるコンクリート壁内部損傷の非破壊センシングのための基礎実験、電気学会 基礎・材料・共通部門大会、2013 年 9 月 13 日、横浜国立大学(神奈川)
- [22] K. Takahashi, M. Matsumoto, and M. Sato, “Coherent scatterer selection based on coherence of interleaved sub-images for atmospheric correction of ground-based synthetic aperture radar interferometry,” IEEE International Geoscience and Remote

- Sensing Symposium, 2013 年 7 月 26 日, Melbourne (Australia)
- [23] M. Sato, K. Doi, and K. Takahashi, “Advanced GPR for archaeological survey,” IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2013 年 7 月 23 日, Melbourne (Australia)
- [24] K. Takahashi and M. Sato, “3D GPR survey of an ancient tomb using a self-tracking total station,” Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, 2013 年 7 月 18 日, Beijing (China)
- [25] J. Chen, H. Liu, K. Takahashi, and M. Sato, “Development of array GPR for archaeological survey and disaster mitigation,” Near Surface Geophysics Asia Pacific Conference, 2013 年 7 月 18 日, Beijing (China)
- [26] K. Takahashi, J. Igel, H. Preetz, and M. Sato, “Evaluation of electromagnetic scattering from heterogeneous soils for ground-penetrating radar measurements through a simple modeling,” 2013 URSI Commission B International Symposium on Electromagnetic Theory, 2013 年 5 月 24 日, 広島国際会議場 (広島)
- [27] K. Takahashi, “Evaluation of metal detector pinpointing accuracy under field conditions,” 11th International Symposium Humanitarian Demining, 2013 年 4 月 24 日, Sibenik (Croatia)
- [28] M. Sato and K. Takahashi, “Lessons learned from the deployment of dual sensor ALIS for humanitarian demining in Cambodia,” 11th International Symposium Humanitarian Demining, 2013 年 4 月 23 日, Sibenik (Croatia)
- [29] 高橋一徳, J. Igel, H. Preetz, 浅層地中レーダ探査における不均質土壌の影響、物理探査学会第 127 回学術講演会、2012 年 11 月 29 日、とりぎん文化会館(鳥取)
- [30] K. Takahashi, M. Matsumoto, M. Sato, “Observation of earthquake-affected areas by ground-based synthetic aperture radar interferometry,” 8th Association of Pacific Rim Universities Research Symp. on Multi-Hazards around the Pacific Rim Towards Disaster-Resilient Societies, 2012 年 9 月 21 日, 東北大学 (仙台)
- [31] J. Igel, H. Preetz, K. Takahashi, S. Altfelder, “The influence of electromagnetic soil properties on EMI and GPR sensors in landmine and UXO detection,” The 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 2012 年 9 月 5 日, Paris (France)
- [32] M. Sato, K. Takahashi, Y. Yokota, “ALIS: GPR 3-D imaging for humanitarian demining,” The 18th European Meeting of Environmental and Engineering

- Geophysics, 2012 年 9 月 3 日, Paris (France)
- [33] K. Takahashi, D. Mecatti, D. Dei, M. Matsumoto, M. Sato, “Landslide observation by ground-based SAR interferometry,” IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012 年 7 月 27 日, Munich (Germany)
- [34] H. Liu, Y. Yokota, K. Takahashi, M. Sato, “Monitoring of dynamic groundwater level change by ground penetrating radar for quantitative estimation of hydraulic parameters,” IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012 年 7 月 25 日, Munich (Germany)
- [35] K. Takahashi, H. Preetz, J. Igel, “Performance of a demining GPR related to soil properties and clutter,” 14th Int. Conf. On Ground Penetrating Radar 2012, 2012 年 6 月 8 日, Shanghai (China)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：合成開口処理を伴うセンサ、そのセンサの処理方法、および、プログラム
 発明者：佐藤源之、高橋一徳、松本正芳
 権利者：東北大学
 種類：特許
 番号：2013-150994
 出願年月日：2013 年 07 月 19 日
 国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等
 東北大学 東北アジア研究センター 佐藤研究室 高橋一徳
<http://magnet.cneas.tohoku.ac.jp/satolab/jpn/member/kazunoritakahashi.html>
 東北大学研究者紹介
<http://db.tohoku.ac.jp/whois/detail/0e5637f5feb4a43cbf272aae581a798d.html>
 東北大学 東北アジア研究センター 高橋一徳
http://www.cneas.tohoku.ac.jp/staff/takahashi_k/takahashi.html

6 . 研究組織

(1)研究代表者

高橋 一徳 (TAKAHASHI, Kazunori)
 東北大学・東北アジア研究センター・助教
 研究者番号：60431475

(2)研究分担者

佐藤 源之 (SATO, Motoyuki)
 東北大学・東北アジア研究センター・教授
 研究者番号：40178778