

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：33401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2016

課題番号：25560176

研究課題名(和文) 太平洋を漂流する津波瓦礫の監視手法の開発と日本海不法投棄ゴミ監視への応用

研究課題名(英文) Development of a monitoring method of tsunami debris floating in the Pacific Ocean and its application to the monitoring of illegally dumped marine debris in the Sea of Japan

研究代表者

青山 隆司 (Aoyama, Takashi)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：60350807

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災により太平洋に流出した津波瓦礫を監視するため、中・低解像度衛星画像を用いて津波瓦礫を抽出する新たな手法を開発し、その有効性を検証した。これらの手法を用いれば、薄い雲がかかった汚れた海域に浮かぶ津波瓦礫であっても抽出可能である。次に、日本海を漂流する海ゴミを、沿岸域に漂着する前に確認する手法の開発を行った。小規模な海ゴミは、高解像度衛星画像を用いても直接確認できないため、海ゴミを含む画素と含まない画素のスペクトルの違いに着目し、海ゴミを含む画素の候補を抽出する手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In order to monitor the tsunami debris that flowed into the Pacific Ocean due to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, we developed new methods to extract tsunami debris using medium- and low-resolution satellite images and verified its effectiveness. Using these methods, even tsunami debris floating on turbid sea areas through thin clouds can be extracted. Next, we developed new methods for extracting marine debris drifting in the Sea of Japan. The small size of most marine debris means that marine debris cannot be confirmed directly, even when using high-spatial-resolution satellite imagery. Thus, in order to extract candidate pixels containing possible marine debris, pixels with spectra that differ from those of the surrounding ocean and the wave crests were identified.

研究分野：衛星リモートセンシング

キーワード：津波瓦礫 日本海漂流ゴミ(海ゴミ) スペクトル異常 Spectral Angle Mapper 白波 衛星リモートセンシング

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震に伴い発生した巨大津波により太平洋に流出した津波瓦礫は、現在も太平洋上を漂流しており、海洋環境問題のみならず国際問題に発展する可能性も内在していた。この対応として当時行われていたのは津波瓦礫の数値シミュレーションに限られており、その実態を確認する手段は船舶などによる偶然の発見報告が主なものであった。そこで、本研究では、人工衛星に搭載された各種センサーを用いて漂流瓦礫を抽出・監視する手法の確立が不可欠であると考えた。

また、日本海においても不法に海上投棄されるゴミや河川から流出したゴミが日本海沿岸域に漂着し、海岸の環境悪化が深刻な問題となっていた。我々はこの問題の解決を目指し、震災瓦礫に比べて小規模な日本海の高解像度衛星画像を検出する手法の開発を目指した。さらに日本海の海流を考慮し、不法投棄ゴミの漂流ルートおよび漂着場所を予測するシステムの構築を目指す研究の必要性を痛感していた。

2. 研究の目的

(1) 太平洋津波瓦礫

津波瓦礫を、人工衛星に搭載された光学センサーの画像データを用いて、分離抽出する手法の開発研究を既に始めており、近赤外線バンドの利用が有効であることを明らかにしていた。そこで、本研究において最初に取り組む課題は、この研究を進展させ、時間とともに規模が小さくなる津波瓦礫を、中解像度衛星画像を用いて抽出する手法を開発することであった。

(2) 日本海不法投棄ゴミ

太平洋の津波瓦礫に比べてさらに小規模な日本海の高解像度衛星画像の抽出は、中解像度衛星画像では困難であることが予想されるが、日本海沿岸海域では、高解像度衛星による観測が行われており、その画像データが利用可能である。そこで、日本海を漂流する不法投棄ゴミを人工衛星の分光画像データ、特に高解像度画像データを用いて分離抽出する手法を新たに開発するとともに、海流情報を加味し、漂流ゴミの漂流コースおよび漂着場所を予測するシステムを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 太平洋津波瓦礫

東日本大震災により流出した津波瓦礫を中解像度の衛星分光画像を用いて抽出する手法の開発研究を行ってきており、トゥルーカラー画像では抽出できない瓦礫も、近赤外バンドを活用した画像を使用することで抽出可能であることを明らかにしている。可視赤バンドと近赤外バンドの2次元散布図での特性を利用したこの検出手法をさらに改良し、時間とともにさらに低密度になる瓦礫を中解像度の衛星画像を用いて検出するための新たな技術を開発する。具体的には、海水中に瓦礫が混じることによる水質変化を反映する水質関連指標、海水温の情報等を融合した抽出法を考案する。

(2) 日本海不法投棄ゴミ

太平洋津波瓦礫に対する研究成果を基に、衛星分光画像を用いて日本海の漂流ゴミを検出する手法を確立することを目指した。主に日本海沿岸に近い海域を撮影した高解像度衛星分光画像を用いるため、小規模な漂流ゴミも検出できる可能性がある。まず、小規模な日本海の漂流ゴミに対しては、どのような手法（アルゴリズム）が漂流ゴミ抽出に有効かを検討することが必要であり、このアルゴリズムを決定することから研究を開始した。詳細は研究成果の項目で記すが、海ゴミ抽出手法として Spectral Angle Mapper (SAM) と呼ばれる分類法を利用することにし、その妥当性を検証した。また、研究期間を1年間延長し、白波の誤抽出の問題を解決する新たな手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 衛星リモートセンシングを用いた漂流瓦礫の監視

高解像度衛星画像を用いれば、小規模な瓦礫も監視可能であるが、その観測対象領域は陸域や島周辺のみであり、海上はほとんど観測していない。従って、漂流瓦礫の監視のためには、地球全表面を観測する低解像度衛星を用いなければならない。そこで我々は、Terra/Aqua 衛星に搭載されている光学セン

サ MODIS の画像データを用いた。MODIS のような低解像度画像を使う場合、細くひも状に漂流する瓦礫を薄い雲や変色海域と区別して抽出することは一般的に難しい。1 例として、2011 年 3 月 14 日の True Color 画像 (R:G:B=band1:band4:Band3; 解像度 500m) を図 1 に示すが、瓦礫を明確に確認することはできない。そこで、近赤外の反射が強い瓦礫の性質を考慮し、G バンドに近赤外 (Band2) を対応させた疑似カラー画像 (R:G:B=Band1:Band2:Band1; 解像度 250m) を作成した (図 2)。その結果、図 1 では確認が困難であった漂流瓦礫が、図 2 では緑色の

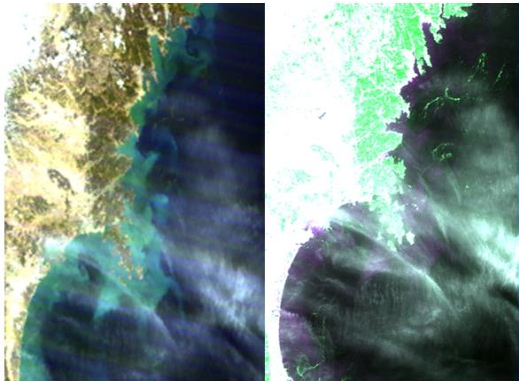


図 1 True Color 画 図 2 疑似カラー画像

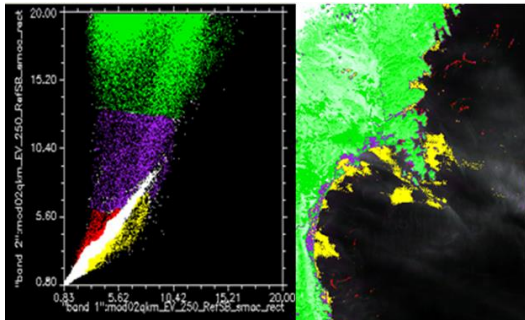


図 3 2次元散布図 (左) を用いて着色した画像 (右)

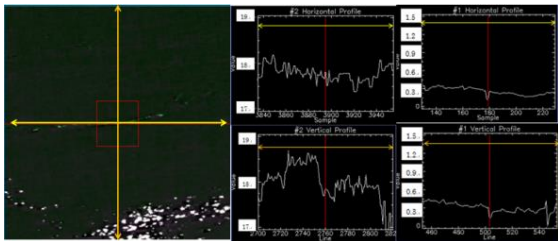


図 4 疑似カラー画像 図 5 SST と Chl-a のプロファイル
(上側：水平方向、下側：垂直方向)

ひも状の領域として確認できる。その理由を明確にするため、2次元散布図 (図 3 左図) を用いて画像内に存在する特徴領域を色の違いとして表した画像を図 3 右図に示す。図 3 左図において、赤色に着色した部分が、図 2 の緑色に表示された瓦礫領域と一致している。これは、瓦礫領域では、Band1 (赤) の反射強度に比べ、Band2 (近赤外) の反射度の方が強いことに対応している。つまり、図 2 では、Band2 (近赤外) の部分が緑色のチャンネル (G) に対応しているため、緑色のひも状の領域として漂流瓦礫が抽出できることが確認された。

海域の衛星画像から上記のようなひも状の変色域がしばしば検出されるが、この変色域が瓦礫によるものかどうかを確認する必要がある。そこで、SST (Sea Surface Temperature: 表面海水温)画像と Chl-a 濃度 (葉緑素濃度) 画像を用いた漂流瓦礫の確認手法を提案した。Chl-a 濃度は、海水中の植物プランクトンの量を計測する際に用いられる指標である。

図 4 は 2011 年 3 月 29 日に観測された千葉県東方沖 600 km の海上で発見された漂流瓦礫 (R:G:B=Band1:Band2:Band1) の疑似カラー画像である。図 5 は漂流瓦礫が存在する地点 (図 4 中央部) での黄色の直線に沿った表面海水温 (SST) と Chl-a 濃度を表しており、上段が水平方向、下段が垂直方向のプロファイルである。図 5 左図では表面海水温がわずかに上昇していることが確認でき、図 5 右図においては Chl-a 濃度が下がっていることが確認できた。その理由は、太陽光を受け、瓦礫の温度が海水温より上昇するものによるものと考えられ、Chl-a 濃度の場合、海面上に木材や漁具などが存在している場合、海水中の植物プランクトンの量が計測できないためであると考えられる。従って、海水温、Chl-a 濃度ともに変化が見られない変色域は油の流出域あるいは海水の汚れによるものであり、漂流瓦礫ではないと考えられ、漂流瓦礫の同定がより確度の高いものとなった。

(2) 日本海を漂流する海ゴミ抽出手法の開発

日本海を衛星漂流する小規模な漂流ゴミは高解像度衛星画像を用いても直接目視で確認できない。しかし、漂流ゴミが含まれる画素のスペクトルと漂流ゴミが含まれていない画素のスペクトルは異なるはずである。そこで海ゴミ抽出手法として、Spectral Angle Mapper (SAM) と呼ばれる分類法を利用することにした。つまり、図 6 に示すように (この図では 2 次元で表示)、n 次元空間 (ここで使用した衛星画像は 4 バンドであるので 4 次元空間) での SAM を用いた分類法を利用し、ある海域の平均的なスペクトルを教師スペクトル (ベクトル t) とし、そのベクトルと対象海域内にある各画素を表す 4 次元ベクトル r とのなす角 (α) をパラメータとして、教師スペクトルと大きく異なるスペクトルを持つ画素を、海ゴミを含む可能性の高い画素として抽出する手法である (詳細は参考文献 (1), (2) 参照)。

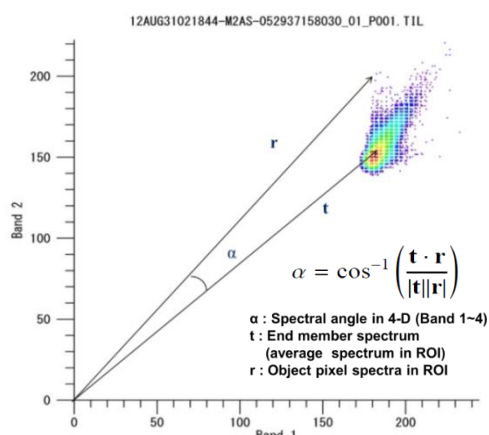


図 6 Band 1 (blue) - Band 2 (green) 空間における散布図とスペクトル角 α の例

解析結果の一例 (敦賀半島沖: WorldView-2, 2012/08/31) を図 7 に示す。スペクトル角 α を大きく設定する程、海の平均的スペクトルからより離れた画素、つまり異常スペクトルを示す画素が選択的に抽出されることが分かる。例えば図 7 (c) で選択された画素 (緑色の円で囲んで示している) は海ゴミを含む画素の候補となる。衛星センサーの空間解像度以下の小さな漂流ゴミを抽出するこのような手法はこれまで提案されておらず、全く新規の研究成果であると言える。

(3) SAM を用いた海ゴミ抽出法の検証

衛星画像からは直接目視で確認できない物体を、SAM を用いた手法によりどの程度抽出できるかを検証した。高解像度衛星画像を用いても海ゴミを確認することが困難である理由は、海ゴミのサイズが衛星画像の解像度より小さいことにある。そこで、高解像度衛星画像ではつきり確認することができる物体を、画像を低解像度化することにより、高解像度衛星画像から海ゴミを直接確認できないのと同じ状況を作り出す。そして、低解像度化した画像に対して SAM を適用し、対象物体を抽出することができるかどうかを確認した。

敦賀半島沖の定置網の衛星画像

(WorldView-3, 2014 年 10 月 19 日) を使用した検証結果を以下に示す。図 8 に若狭湾で使われている定置網の模型を示す。網を支えるために海底に固定されたブイ (2m 程度) が網の周囲を取り巻いているが、このブイを抽出対象とする。

図 9 (a) は本来の解像度 (1.6m) の True Color

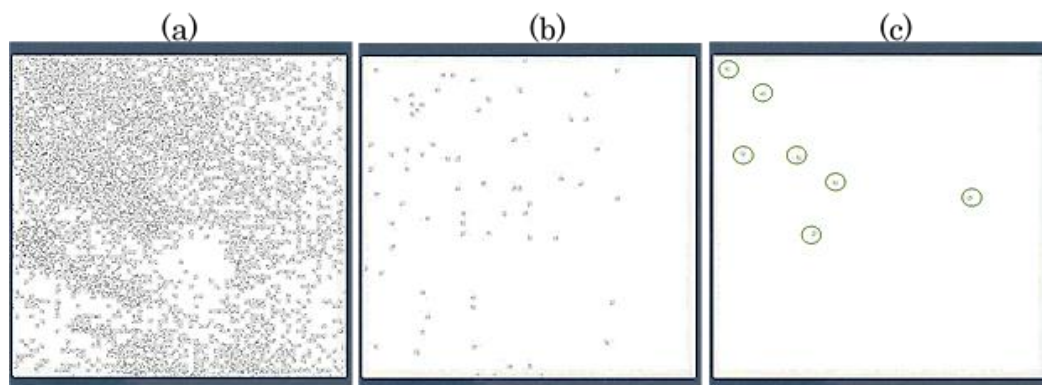


図 7 4 次元空間 (Band 1 ~ Band 4) での SAM を用いた海ゴミを含む画素の候補の抽出結果; (a) $\alpha > 0.05$ rad, (b) $\alpha > 0.15$ rad, (c) $\alpha > 0.20$ rad, 緑色の丸で囲まれた画素が海ゴミ候補の画素。

画像であり、ブイのほぼ全てがこの画像から確認できる。しかし、解像度を 4.0m に落とした図 9 (d)では、数個のブイは確認できるが、その他の周辺のブイは確認困難か全く見えない状況である。そこで、図 9 (a) と図 9 (d)の両画像に対し、SAM を用いたブイの抽出を試みた。



図 8 大規模定置網の様相(3).

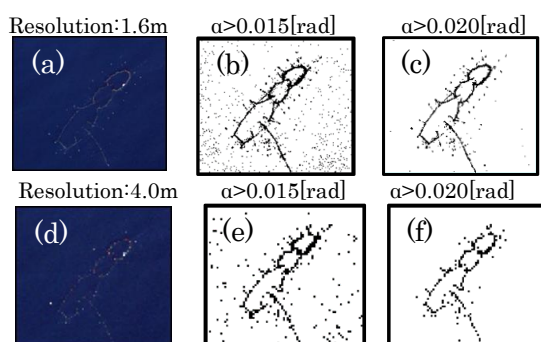


図 9 定置網を支える外周のブイの抽出例。

この WorldView-3 画像は 8 バンド (Coastal ~NIR2) 持っているため、8次元空間での SAM を適用した。抽出結果を図 9 (b), (c), (e), (f)に示す。図 9 (b), (e)はスペクトル角 $\alpha > 0.015[\text{rad}]$ の画素の抽出結果、(c), (f)はスペクトル角 $\alpha > 0.020[\text{rad}]$ の画素の抽出結果である。図 9 (a)の高解像度衛星画像に SAM を適用した結果、 $\alpha > 0.015[\text{rad}]$ (図 9 (b))あるいは $\alpha > 0.020[\text{rad}]$ (図 9 (c))として海水に対応する画素をほとんど取り除いた状態で、定置網周囲のブイが存在する位置全てに黒点 (画素) が残っていることを確認できる。図 9 (d)の低解像度画像に SAM を用いた場合においても、 $\alpha > 0.015[\text{rad}]$ (図 9 (e))の段階で定置網を示す黒点の周囲に多数の黒点が見られ (図 9 (d)の True Color 画像ではほとんど見られない)、より条件を厳しくした $\alpha > 0.020[\text{rad}]$ (図 9 (f))の場合でもブイがあるべき位置にいくつかの黒点が抽出されていることが確認できた。以上の解析結果から、SAM を用いた抽出手法は衛星画像の解像度より小さなブイ (海ゴミ) を抽

出す手法として有効であることが確認された。

(4) 漂流ゴミと白波の判別法

一般的に、波高が低い場合には散布図上の画素はある狭い範囲に集中するが、波高が高く白波がたつような場合では、白波に対応する画素の各バンドの DN (Digital Number) 値は高くなり 2次元散布図上では長い尾を引く形となる。このような領域に SAM を適用すると、本来抽出されるべき海ゴミに加えて白波の一部を誤って抽出する事がある。図 10 に 2012 年 8 月 31 日に WorldView-2 で撮影された敦賀半島沖の画像の沖合の海域における 2次元散布図 (青バンドと緑バンドを使用) を示す。図中の t と α は SAM で使用する教師ベクトル t とスペクトル角 α を示している。この図で示したスペクトル角 α で漂流ゴミを抽出すると、異常なスペクトルを持つ画素と同時に白波の画素を抽出してしまう可能性がある。図 10 の青丸部分は特異なスペクトルを示す漂流ゴミで、赤丸部分は各観測バンドでの DN 値が高い値を示す白波の画素である。そこで漂流ゴミを含む画素と白波の画素を判別するために、その画素の 4つの観測バンドの値に対する 4次元空間での距離 $I (I = \sqrt{R^2 + G^2 + B^2 + NIR^2})$ を利用して判別する手法を検討した。漂流ゴミを含む画素は、海水の平均的なスペクトルに比べ特異なスペクトル (R, G, B, NIR のどれかが特異な値を持つ) を持つが、白波の画素は R, G, B, NIR の DN 値が全て高い値を持つため、I の値も大きな値を持つ。そこで海ゴミを含むと思われる画素の I の最大値を求められれば、それ以上の I をもつ画素は白波であると判別することが可能となる。

図 11 にスペクトル角 $\alpha > 0.14[\text{rad}]$ の場合に、SAM により抽出された画素の I 値に対するヒストグラムを示す。この結果から、抽出された画素は 2つのグループに分かれていることが解る。I < 310 の一群が海ゴミの可能性が高いグループであり、I > 320 の一群は I 値が高く、白波の可能性が高い。従って、I > 320 のグループを除外することにより、白波の誤抽出を避

けることができる。

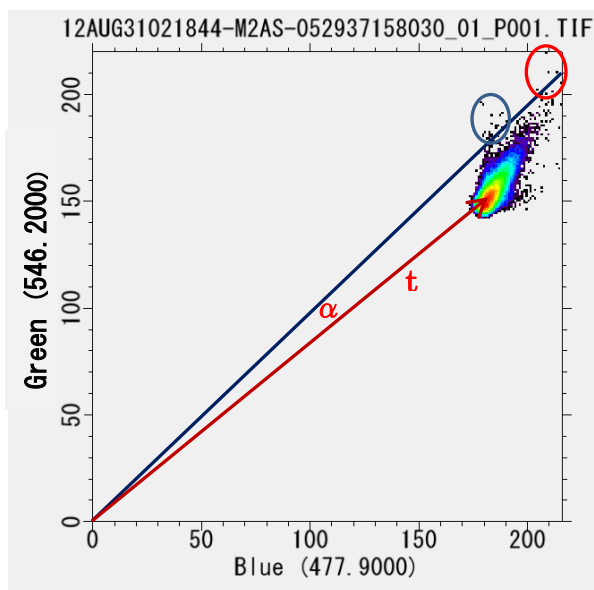


図 10 赤丸で囲われた画素は白波を表し、青丸で囲われた画素は海ゴミ候補の画素を示す。

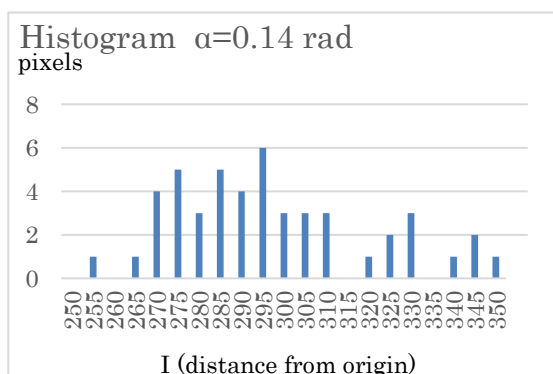


図 11 $\alpha=0.14$ のとき抽出された画素のヒストグラム, I は散布図の原点からの 4 次元距離を示す。

SAM を用いて海ゴミを抽出する場合は、波のない時の衛星画像を使用することが望ましいが、波を含む画像を使用する場合でも、上記のような手法で白波の誤抽出を防ぐことが可能となる。しかし、海ゴミ候補の画素が存在しない場合は白波を海ゴミとして誤抽出する事になるため、海の平均的なスペクトルの持つ I 値 (I_0 とする) に対し、 $k I_0$ (k は定数) なる閾値を設定し、それ以上の距離 I を有する画素は白波を表す画素であるとして除外する手法が有効であると考えている。

<引用文献>

- (1) 青山隆司, 倉田旦, “衛星画像を用いた海ゴミ

ミ抽出手法の検証”, 福井工業大学研究紀要 46 号, (2016-6), pp.1-7.

- (2) T. Aoyama, “Extraction of marine debris in the Sea of Japan using high-spatial-resolution satellite images”, *Proc. of SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, Vol. 9878 (2016), pp. 987817-1 - 987817-7.
- (3) 若狭三方漁業協同組合 ;
http://www.mjnet.ne.jp/wakasa/taiken_toha.htm

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件 : 全て査読有、内 2 件は平成 29 年度掲載)

- ① T. Aoyama, “Extraction of marine debris in the Sea of Japan using high-spatial-resolution satellite images”, *Proc. of SPIE Asia-Pacific Remote Sensing*, Vol. 9878 (2016), pp. 987817-1 - 987817-7.
- ② T. Aoyama, “Validation of Extraction Methods of Marine Debris in the Sea of Japan Using Satellite Images”, *Proc. of International Symposium on Remote Sensing 2017*, (2017), pp. 552-555.
- ③ 青山隆司, 永島隆也, 岩城克幸, “衛星リモートセンシングを用いた海ゴミ検出法の改良”, 福井工業大学研究紀要 47 号, (2017-6), PP. 1-7.

[学会発表] (計 17 件 : 内 1 件は平成 29 年度発表)

- ① 青山隆司, 寺嶋恵, “巨大津波により太平洋へ流出した海洋漂流瓦礫の監視”, 海洋理工学会平成 25 年度春季大会 (2013).
- ② 青山隆司, “衛星画像を用いた日本海漂流ゴミの抽出法”, 平成 27 年度日本リモートセンシング学会秋季大会 (2015).
- ③ 青山隆司, “衛星画像を用いた海ゴミ抽出法の検証”, 平成 28 年度日本リモートセンシング学会秋季大会 (2016).

[その他] ホームページ

http://futredb.fukui-ut.ac.jp/html/100000062_ja.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青山 隆司 (AOYAMA, Takashi)

福井工業大学・工学部・電気電子工学科・教授
研究者番号 : 60350807