

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23246090

研究課題名(和文) 気候変動に伴う沿岸外力環境の将来変化予測，影響評価および適応策に関する研究

研究課題名(英文) Projection, impact assessment and adaptation of future coastal environment due to climate change

研究代表者

間瀬 肇 (Mase, Hajime)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：30127138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,700,000円

研究成果の概要(和文)：沿岸環境の将来予測のために台風，高潮，波浪および海面上昇の将来予測とその応用を行った。

海面上昇について，日本周辺の過去の変化を衛星観測データをとに解析し，概ね全球平均の3mm/年とほぼ傾向であることを確認した。台風については，台風の将来変化は発生個数だけでなく，発生・消滅位置にもあらわれることを明らかにした。高潮リスク評価については，伊勢湾台風をターゲットに，最大クラスの高潮偏差に及ぼすモデル，台風特性および将来変化の不確実性の影響について評価を行った。海浜変形については，海面上昇に伴う汀線後退の長期予測は不十分であり，海面上昇による地形変化を検討する必要があることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Projection of typhoons, storm surges and waves were conducted for impact assessment of coastal environment in the future.

The observed sea level rise was analyzed based on the satellite observation and is 3 mm/year around Japan. Future changes of tropical cyclone activity was analyzed based on CMIP3 and CMIP5 results. The cyclogenesis number will be decreased and the tracks will be shifted to Eastward at the Northwest Pacific Ocean in the future. Risk of storm surge is estimated targeting Ise-wan (Vera) typhoon. The maximum level of storm surge and related uncertainty is discussed. The impact of coastal morphology was examined and shore line change based on standard sea level rise analysis is not sufficient for dynamic behavior of beach morphology.

研究分野：海岸工学

キーワード：気候変動 国土保全 海岸工学 海洋化学 自然現象観測・予測

1. 研究開始当初の背景

(1) 気候変動予測

アジア・西太平洋域では、沿岸災害に脆弱な地域が広く分布し、気候変動による災害特性へのインパクトは大きい。特に我が国では、夏季に台風、冬季に季節風の影響を強く受けるため、沿岸外力の長期変化を予測することは重要である。総合的な将来予測のためには、静的な海面上昇に対して、動的な変化である海上風、気圧やこれらに伴う波浪や高潮等の沿岸外力の予測が重要となる。IPCCの第4次報告書(IPCC-AR4, 2007)では、将来における全球スケールの予測結果が示されたが、地域スケールの将来の影響評価は行われていない。またこれまでのIPCCの報告書では、自然科学系の研究者が主眼とする気温、降水量、台風特性等の気候学的な観点からの将来変化予測が主であり、海岸工学の研究者が必要とする海面近傍の沿岸外力の定量的な将来変化については、ほとんど検討が行われていない。

(2) 気候変動予測結果の翻訳

沿岸外力の将来変化を予測する場合、全球の平均値を用いた外力評価や、単に将来変化の割合を仮定した感覚的・経験的な取り扱いが行われてきた。気候変動の沿岸域への影響評価とこれに対応した長期的なアダプテーションには、気候変動予測に基づき、かつ地域スケールに対応した確度の高い外力の将来変化予測とその不確定性の評価が必須である。

沿岸外力の将来変化予測では、海面気圧や海上風はモデルから直接情報を得ることができるが、これ以外はモデルに考慮されていないため、独自に計算・推定(翻訳)する必要がある。また、台風については、長期積分を行うために粗視化された気候モデルでは不十分であり、観測データを元に推定(翻訳)する必要がある。

翻訳には、1) 力学的方程式を用いて気候変動予測モデルから必要な情報を計算する力学的翻訳と、2) 現在気候でわかっている統計的な関係を用いて、気候変動予測モデルから将来に必要な情報を推定する統計的翻訳が考えられる。十分な推定精度を確保するためには、目標とする沿岸外力と特性毎(平均量なのか極値なのか)に翻訳方法を使い分け、最適化する必要がある。さらに、気候変動の予測精度は、予測モデル自身とシナリオに依存する2種類の誤差が存在し、これらの不確定性を評価するため、アンサンブル予測が必要である。

(3) 沿岸環境の変化

観測結果によると、過去の平均波高は、北大西洋西岸で増加、東岸でやや減少の傾向を示している。将来の波高変化はさらに評価が難しいが、気圧分布から統計的に将来の平均波高変化を推定した結果(Wang, 2006)や高解像度GCMの結果から直接波浪を計算した結果によると、今世紀末の平均波高は、緯度に

応じて5~10%程度の増加と減少が見込まれる海域に分かれることが示唆されている。一方、高潮外力となる熱帯低気圧の将来変化は、数が減少し、強さが増すことが示唆されているが(Emanuel, 2009)、IPCC-AR4, AR5用の気候変動予測モデル群(CMIP3および5)では、台風の将来変化を行うだけの解像度が確保されておらず、定量的な評価を行うレベルに至っていない。現在のところ、沿岸外力の定量的な将来変化はほとんど成果を上げておらず、それゆえ影響評価の議論や方向性は曖昧なままである。

2. 研究の目的

最新の予測モデル群(CMIP5)をもとに、モデル・シナリオ誤差を考慮しつつ今世紀末までの海面上昇、台風、波浪、高潮、潮汐流の沿岸外力の将来変化について、常時と極値の両者を対象に、力学的翻訳と統計的翻訳を開発・実施し、両結果を最適化する方法を考案する。ついで、海域毎に沿岸外力の定量的な将来変化予測を行う。推定された沿岸外力の将来変化をもとに、沿岸構造物の安定性、越波特性や海浜・干潟等の浅場地形の長期変化など沿岸環境の将来変化を予測するモデルの開発を行う。最後に、将来の沿岸外力の変化をもとに沿岸環境の将来変化とその不確定性について定量的に把握する。

3. 研究の方法

本研究では、沿岸環境の将来予測のために重要な、台風(熱帯低気圧)、高潮、波浪および海面上昇の将来予測およびその不確定性の推定を行う。このため、以下の3つの要素について研究を行った。

- 1) 気候値から将来の変化を推定する力学的および統計的翻訳方法を開発・検証
- 2) 沿岸外力の将来変化予測
- 3) 海岸構造物の安定性、越波特性、海浜変形の地形変化等の沿岸災害外力要素について長期積分可能なモデルの開発

これらをもとに、日本周辺における沿岸防災の将来変化について予測を行う計画である。

最後に、得られた予測結果をもとに、今世紀末までに順次変化していく沿岸防災に対する適応策について議論を行った。具体的には以下のグループに分かれ、研究を実施した。

- 1) 気候変動モデルの翻訳グループ
 - a) 気候変動モデルの力学的翻訳(台風ダウンスケール)
 - b) 気候変動モデルの統計的翻訳(確率台風、極値統計)
- 2) 沿岸外力評価グループ(海面上昇、波浪、高潮他)
- 3) 沿岸環境影響評価グループ(碎波帯、構造物、浅場の地形、高潮)

4. 研究成果

(1) 海面上昇

海面高さの変化は、海岸構造物の性能、砂

浜の侵食、河川の水位、塩水の土壌侵入、サンゴ・有孔虫の生息域等の様々な分野に影響を及ぼす重要な現象である。海面上昇による災害リスクを考える際には現状を正しく把握し、当面の間はその変化が短期的な将来で継続することとなる。また、平均海面高さの変化のモニタリングを継続することで変化の兆候から沿岸において生じつつある災害モードの変化や沿岸特性の違いによる影響発現の差を明らかにする。そして、これらは施策の優先順位設定の手がかりとなる。

本研究では、衛星海面高度計による沿岸部の観測期間（野口ら、2010）に近年のデータを追加するとともに離島部に関する解析を行った。日本周辺の海域を5つに区分し、解析を行った。黒潮の蛇行の範囲を網羅できるように、沿岸測定点の海域毎に平均した場合の衛星1公転周期（約10日）毎とそれから得られた年平均の海面高さの変化を求めた。太平洋西側の海域では、水位が大きく変動し、黒潮の最南下緯度の変動と連動していることを確認した。水位は、黒潮接岸時に高くなるが、蛇行時に生じる冷水渦は沖に生じることから影響が小さいことが現れている。沿岸と海域では、全体として沿岸部の方が大きな値となっており、日本周辺の海面水位の変化は、全球平均の3mm/年とほぼ同じになっていた。

(1) 台風リスク評価

将来台風の解析

台風の将来変化については、多くの研究が行われており、例えば海面水温（SST）との関係が明らかにされている。全球で見ると温暖化により台風の強度が増加し、数が減る傾向が見られるとの報告が多くあるが、現在のところ観測結果からこれを見出すことは難しい。高潮等の沿岸域への影響評価に対して用いるためには、上記の議論より詳細な湾スケールの変化予測に踏み込む必要がある。

本研究では、次節に述べるように確率台風モデルに、台風の発生位置や中心気圧の変化のマクロ的将来特性の変化を埋め込み、台風の将来変化をモンテカルロ法で確率的に評価することを実施した。このようなアプローチでは、再現期間等、工学的に必要な確率評価が可能であるが、将来の台風特性の設定を正確にする必要がある。そこで、気候変動に伴う熱帯低気圧（以下TC）のマクロ変化をターゲットに、GCMモデルの偏差を考慮しつつ発生個数、発生・消滅位置等のTC特性の将来変化とその不確実性について検討を行った。気象研のAR5用の60km解像度大気GCM（Mizutaら、2012；以下60km AGCMと略記）を用いて、将来SSTをそれぞれ変化させ、台風の個数、発生位置、消滅位置、中心気圧、経路および移動速度の将来変化について検討を行った。

台風マクロ量の将来変化は、発生個数、発生・移動・消滅位置、中心気圧、移動速度および方位の平均と分散を解析対象とした。個

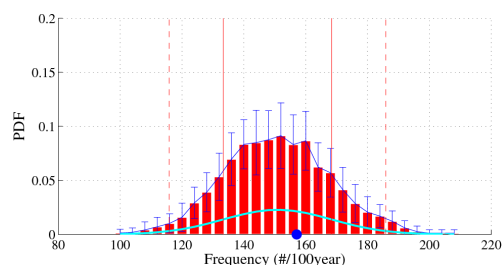


図3 確率台風モデルより算定した台風襲来数と観測値の比較

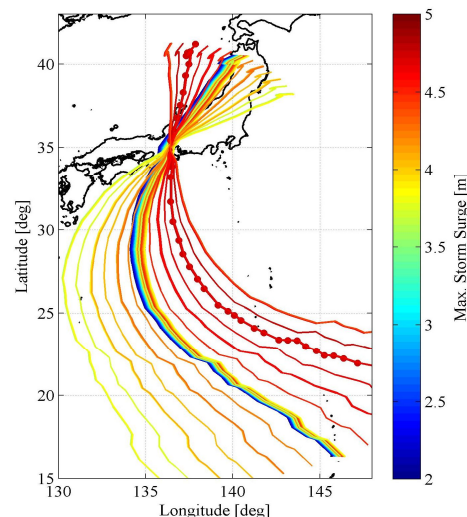


図4 最大潮位偏差と台風経路の関係（色は名古屋港最大潮位偏差、丸付きの線：危険経路）

数、位置については全球・海域別に評価し、その他の統計量については緯度方向の平均値を対象に評価を行った。

台風の発生個数は、全球では $20.4\% \pm 34.8\%$ で減少し、北半球のばらつきと比較して、南半球では全モデルでほぼ同傾向を示した。海域毎では図1に示すように北半球では平均的には同様の傾向であるが、SSTによる影響は大きく、モデル間の変動が大きい。また、単にSSTの変化度合いだけではなく、その空間パターンが台風の発生個数に大きな影響をあたえることを示している。

ついで、台風の発生・消滅位置の将来変化について調べた。ここではこれらの位置を海域毎に重心を取り、その位置変化で評価した。TCの発生・消滅位置は、多くのケースで経度方向に大洋の中心（北西太平洋の場合は東）へ移動し、緯度方向には経度方向の数割極方向にシフトする変化が見られた。図2に示すのは、海域毎の台風発生位置の将来変化である（北・東向きが正）。まず、経度方向の将来変化は緯度方向に比べて数倍大きい。TCの発生・消滅位置は、多くのケースで経度方向に大洋の中心へ移動し、緯度方向には経度方向の数割極方向にシフトする変化が見られた。経度方向の発生位置の将来変化は、北西太平洋(WP)で1.58度、北東太平洋(EP)で

3.2 度であり、海域により 2 倍の開きが見られた。一方、緯度方向はこれよりかなり小さく、モデルの解像度が 60km であることを考えると、誤差の範囲に入る将来変化量であった将来移動量については、発生、移動および消滅位置の順で変化が大きく、消滅位置の移動量は発生位置と比べて約 2 倍である。つまり、中緯度に位置する日本周辺では、台風経路の将来変化が顕著に出やすいことがわかった。

中心気圧、速度、進行方向については、大陸の影響を無視すると緯度方向に明確な構造を持つため、その将来変化については、経度方向に平均し、緯度方向の分布形状と標準偏差について評価した。速度および進行方向は、平均値および標準偏差共に統計的に有意な将来変化は見られなかった。一方、中心気圧については経度方向に顕著な将来変化傾向が見られ、赤道から極域に向かって中心気圧が低下する傾向が得られた。

確率台風モデルの開発

観測および数値計算により得られた台風資料を適宜組み合わせ、台風特性の時系列相関に対するクラスター分析結果と環境場との統計的関係を明らかにしながら、環境場の非定常性を反映させた新たな確率台風モデルの構築した。

図 3 は九州西部 (N31-33 度, E129-131 度) に襲来する台風について 100 年間の襲来数を観測値 (青丸) と確率台風モデルの結果 (確率密度分布: PDF) を示したものである。図より、開発した確率台風モデルの PDF は観測値が平均値近傍に収まるように分布しており、襲来頻度の再現性は高いと考えられる。

確率台風モデルは、台風の数飛躍的に増すことが可能であり、高潮リスク評価に有効な手法である。

(2) 高潮リスク評価

高潮は単に台風強度の将来変化だけでなく、台風がどのような経路をとるかにより大きく変化する。さらに、高潮推算においても、用いる数値計算モデルやモデルパラメータ、外力となる気象場などによって推算結果に差が生じる。可能最大高潮の推定および将来高潮変化予測を行うには、これらをすべて踏まえる必要がある。そこで、伊勢湾を対象として、高潮計算モデルと台風特性が可能最大高潮予測に係る不確実性について評価した。

台風経路が高潮に及ぼす不確実性について評価するため、経験的台風モデルを用い、伊勢湾台風を人為的に平行・回転移動させた経路を用いて高潮推算を行い、名古屋港に対する危険経路および高潮の可能最大値を求めた。さらに、気候変動による台風強度の将来変化を考慮するために、検討から得られる危険経路に、台風強度の将来変動予測値を加味した高潮計算を行った。台風強度の変化は中心気圧で表わせるものとして、中心気圧のみを変化させた。中心気圧の将来変化は、気象研究所 (Kitoh ら, 2009) の CMIP5 全球大

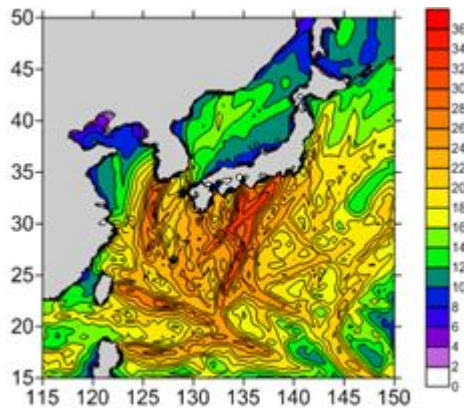
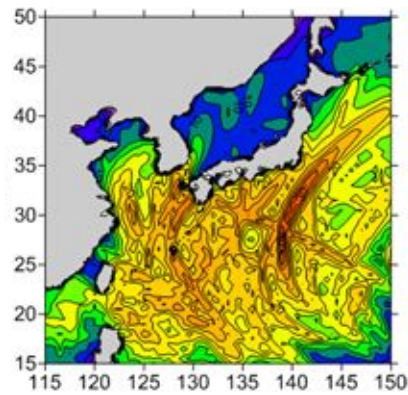


図 5 最大波高分布 (左図: 現在, 右図: 将来, 単位 m)

気モデルの 2 モデルと CMIP3 の中から 6 モデルを用い、緯度依存する中心気圧の将来変化傾向 p [hPa] (Mori, 2012) とその不確実性を上乗せして評価した。

図 4 に、東に最大風速半径の +18.5 km 平行移動し、回転角度を変化させた場合の最大潮位偏差と経路の関係を示す。東に +18.5 km 移動し、反時計回りに +20 度回転した場合が、伊勢湾にとって最も危険な経路となり、最大高潮偏差は 4.76 m となった。伊勢湾台風が元の経路を辿ったときと比べると 1.34 m、伊勢湾台風経路を単に +18.5 km 平行移動した場合よりも 0.40 m 増加した。回転角度が正方向 (反時計回り) に大きくなれば、潮位偏差のピーク値は大きくなる。これは吹きこみ角度の変化による吹送距離の変化によるものである。可能最大高潮を考える際、経路を平行移動させるだけでなく、経路を回転させて湾軸に対する進行方向を変えることも、考慮すべき重要な要因であることがわかった。

気候変動に伴う台風強度の変化を考慮した計算を行った結果、中心気圧が約 20 hPa 低くなると、高潮偏差は 4.76 m から 0.93 m 増加し 5.69 m となった。予測変動幅は 0.43 ~ 0.93 m である。

以上のように、伊勢湾台風をターゲットに、高潮偏差に及ぼす不確実性の要因について評価を行った。その結果、インパクトの大きいものは、入力気象場、海面抵抗係数、台風経路、速度であることがわかった。今後、高

潮に及ぼす気候変動の影響，特に可能最大値を考える上で，台風強度の将来予測と共に，個々の湾における台風経路の不確実性の評価が重要であることを示した．

(3) 波浪予測

台風の再現性が向上したとされるMRI-AGCM3.2Sの予測値(SRES-A1Bシナリオ)に基づき，日本沿岸域，特に温暖化の影響が先行すると予想される九州に着目し，将来(2075-2099)と現在(1979-2003)を比較することにより，波浪の出現特性の変化について調べた．波浪推算に際しては，第三世代波浪モデルWAMを用い，現在及び将来それぞれ25年間について風速データを外力条件とし，計算範囲を東経115~150度，北緯15~50度，計算格子幅を0.5度として推算した．

現在及び将来についてそれぞれ期間中の有義波高の最大値分布を図5に示すが，将来と現在で分布形状が異なっている．これは有義波高の最大値が予測された台風の経路に依存するためと推察されるが，現在と将来を比較すると将来気候では大きくなる傾向があり，台風の強大化による結果を反映しているものと考えられる．

(4) 海浜変形予測

海面上昇に伴う汀線後退の長期予測はBruun則(距離の2/3乗則)の平衡断面をもとに評価されているが，すべての海浜断面に適用可能であるとはいえない．特に，沿岸漂砂の影響，将来の気候変動にもなう波浪変化などは考慮されていない．そこで，沿岸漂砂の卓越する鳥取県の皆生海岸で過去に実際された測量結果より断面地形の特性を調べ，Bruun則の適用を試みた．その結果，皆生海岸では，汀線から移動限界水深までの範囲では，沿岸砂州が存在する範囲とそれより沖側で断面形状の特性が異なることがわかった．このことから新たな海浜断面の関数系を考慮し，海面上昇による地形変化を検討する必要があると考えられる

また，海面上昇の他に短期間に発生する台風による高潮(水位上昇)と高波による地形変化も評価，特に水位変化や，波浪特性の変化に対して既存の海岸保全施設の機能変化の評価は重要である．そこで構造物周辺の汀線変化やサンドリサイクル等の養浜なども考慮した3次元海浜変形モデルの構築を行い，あらゆる条件下における海浜変形を評価する手法を確立することを目的とする．初年度は，その第1段階として，鳥取県浦富海岸に設置されている人工リーフ周辺の地形変化計算を試み(黒岩ら，2012)モデルの妥当性を検討した．次年度は，汀線の取り扱いを再検討しモデルの再構築を行い，現地データとの比較を行いモデルの適用性を再検討する．さらに，波浪特性の変化による地形変化への影響の程度を数値実験的に検討する．

(5) まとめ

本研究では，沿岸環境の将来予測のために重要な，台風(熱帯低気圧)，高潮，波浪お

よび海面上昇の将来予測およびその不確実性の推定，さらにその応用を行った．

海面上昇について日本周辺の海域を5つに区分し，衛星観測データよりこれまで観測された海面上昇の地域依存性について検討した．太平洋側では海面水位黒潮の最南下緯度の変動と連動しているものの，概ね全球平均の3mm/年とほぼ傾向であることを確認した．

台風リスク評価については，GCMの台風特性の将来変化についての解析と確率台風モデルの開発を行った．台風の将来変化は発生個数だけでなく，発生・消滅位置にもあらわれることを明らかにした．TCの発生・消滅位置は，多くのケースで経度方向に大洋の中心へ移動し，緯度方向には経度方向の数割極方向にシフトする変化が見られた．中緯度に位置する日本周辺では，台風経路の将来変化が顕著に出やすいことがわかった．また，観測および数値計算により得られた台風資料を適宜組み合わせ，台風特性の時系列相関に対するクラスター分析結果と環境場との統計的關係を明らかにしながら，環境場の非定常性を反映させた新たな確率台風モデルの構築した．

高潮リスク評価については，伊勢湾台風をターゲットに，最大クラスの高潮偏差に及ぼすモデル，台風特性および将来変化の不確実性の影響について評価を行った．その結果，インパクトの大きいものは，入力気象場，海面抵抗係数，台風経路，速度であることがわかった．

海浜変形予測についてモデルの開発を開始した．鳥取県の海岸における観測データより，沿岸砂州が存在する範囲とそれより沖側で断面形状の特性が異なることがわかった．このことから，これまでの海面上昇に伴う汀線後退の長期予測は不十分であり，新たな海浜断面の関数系を考慮し，海面上昇による地形変化を検討する必要があることがわかった．

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66件)

Yasuda, T., S. Nakajo, S. Kim, H. Mase, N. Mori and K. Horsburgh (2014) Evaluation of Future Storm Surge Risk in East Asia based on State-of-the-art Climate Change Projection, Coastal Engineering, Volume 83, January 2014, Pages 65-71
Mase, H., D. Tsujio, T. Yasuda and N. Mori (2013) Stability analysis of composite breakwater with wave-dissipating blocks considering increase in sea levels, surges and waves due to climate change, Ocean

Engineering
Suh, K.D., S.W. Kim, N. Mori and H. Mase (2012) Performance-based design of caisson breakwaters considering climate change impacts, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineers, Volume 138, Issue 3, pp.215-225.

間瀬 肇・武藤遼太・森 信人・金 洙列・安田誠宏・林 祐太 (2011) : 詳細気象予測値を用いた伊勢湾台風高潮の再現実験,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.1_401-1_405.

〔学会発表〕(計 26 件)

Kim, S.Y., Y., Matsumi, J.H., Oh, K.D., Suh, T. Yasuda and H. Mase (2014) Prediction of Storm surges around Korean coasts using Climate Change Projection Data, ISOPE 2014, 2014/6/17

Shibutani, Y., S.Y., Kim, T. Yasuda, N. Mori and H. Mase (2014) Sensitivity of Future Tropical Cyclone Changes to Storm Surge and Inundation : Case Study in Ise Bay, Japan, ICCE 2014, 2014/6/14

Shimura, T., N. Mori, T. Yasuda and H. Mase, Wave Dynamics and Projection of Future Wave Climate, ICCE 2014, 2014/6/14

〔図書〕(計 1 件) 分担

Mori, N. (2012) Projection of Future Tropical Cyclone Characteristics based on Statistical Model, In Cyclones Formation, Triggers and Control, Eds. K. Oouchi and H. Fudeyasu, Chapter 12, Nova Science Publishers, pp.249-270.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.coast.dpri.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

間瀬 肇 (MASE, Hajime)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号 : 30127138

(2) 研究分担者

橋本 典明 (HASHIMOTO, Noriaki)

九州大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 90371749

山田 文彦 (YAMADA, Fumihiko)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号 : 60264280

横木 裕宗 (YOKOKI, Hiromune)

茨木大学・工学部・教授

研究者番号 : 70240190

黒岩 正光 (KUROIWA, Masamitsu)

鳥取大学・工学研究科・教授

研究者番号 : 10225279

野口 賢二 (NOGUCHI, Kenji)

国土技術政策総合研究所・主任研究官

研究者番号 : 50469863

河合 弘泰 (KAWAI, Hiroyasu)

九州地方整備局・鹿児島港湾・空港整備事務・所長

研究者番号 : 40371752

北野 利一 (KITANO, Toshikazu)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 00284307

森 信人 (MORI, Nobuhito)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号 : 90371476

渡部 靖憲 (WATANABE, Yasunori)

北海道大学・工学研究科・准教授

研究者番号 : 20292055

竹見 哲也 (TAKEMI, Tetsuya)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号 : 10314361

(3) 連携研究者

安田 誠宏 (YASUDA, Tomohiro)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号 : 60378916

奥 勇一郎 (OKU, Yuichiro)

兵庫県立大学・環境人間学部・准教授

研究者番号 : 10456832