

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15097

研究課題名(和文) 新たな経験的モデル開発による爆弾低気圧に起因する高潮・高波予測手法の構築

研究課題名(英文) Future change of storm surge and high wave due to explosive cyclones and development of numerical model

研究代表者

二宮 順一 (Ninomiya, Junichi)

金沢大学・地球社会基盤学系・准教授

研究者番号：20748892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：極端気象現象の予測において不確実性の残る大気海洋相互作用のうち、運動量と乱流に注目して現地観測を実施し、物理モデルを構築した。新たな物理モデルは大気海洋波浪結合モデルに組み込み、その効果検証を実施した。また、爆弾低気圧による沿岸災害を予測するため、ニューラルネットワークなどを用いた高速かつ高精度な予測が可能な新たなモデルを構築した。新たなモデルを駆使し、爆弾低気圧自身と爆弾低気圧による沿岸災害の気候変動影響評価を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は研究で実施した現地観測、そしてその結果得た新しい物理モデルは約20年来発展していなかった大気海洋相互作用の分野において大きな進展が得られたことにある。その相互作用の効果は台風や爆弾低気圧の予測精度に影響を及ぼすため、日々の気象予報にも貢献する成果と言える。また爆弾低気圧の気候変動影響評価は主に北日本域における防災・減災計画に直結する重要な知見である。これらの成果は本研究が大きな社会的な意義を持つと言える。

研究成果の概要(英文)：Among the atmosphere-ocean interactions remaining uncertainties in the prediction of extreme weather events, momentum and turbulent flux are observed, and we developed physical models based on field observation. The new physical models were embedded in a coupled atmosphere-ocean-wave model, and their effects were verified. In addition, to predict coastal disasters caused by explosive extratropical cyclones, new prediction models for storm surge and high waves were developed. New models were capable of fast and accurate prediction. Their models were used to evaluate the climate change impact of the extratropical cyclone and the coastal disasters.

研究分野：海岸工学

キーワード：爆弾低気圧 大気海洋波浪結合モデル 大気海洋相互作用 運動量フラックス 乱流フラックス ニューラルネットワーク 気候変動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

冬季、急速に発達する温帯低気圧（爆弾低気圧）による日本の沿岸災害が報告されている。2008年2月には北海道付近で発達した爆弾低気圧が北海道および東北の西沖で強い北風を継続させ、高波を発生させた。高波は富山湾に侵入し、富山県の沿岸の複数地点において住宅や海岸施設の被害をもたらした。2014年12月には北海道東沖を急速に発達しながら北上した爆弾低気圧によって根室沿岸域に経験のない高潮被害をもたらした。森ら(2017)によると、過去データの解析から強い爆弾低気圧は年々増加傾向にあることがわかっている。爆弾低気圧は台風被害の少ない北日本地域に災害をもたらす要因として、台風同様に最悪クラスの沿岸災害に関する検討が進められるべきである。また、気候変動の影響による爆弾低気圧自身の変化やそれともなう沿岸災害の変化の予測が必要であり、数値積分型モデルの精度向上および大容量の気候予測データセットから必要なデータを抽出する高速かつ高精度な手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

大気海洋間の物理過程解明のため、主に高風速を対象にした現地観測を実施する。そして、数値積分型モデルである大気海洋波浪結合モデルの精度向上を目指して、現地観測に基づいた物理モデルの開発と結合モデルへの組み込み。さらには、爆弾低気圧の気候変動影響評価のための高速かつ高精度なツールの開発とその結果の解析を実施する。これらにより、大気海洋間物理過程に関する学術的な知見獲得、数値予測モデルの高度化、爆弾低気圧の気候変動影響評価に至る基礎から応用研究を実施することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 現地観測

京都大学田辺中島高潮観測塔を用いて大気海洋の同時観測を実施した。観測は研究期間のうち高風速条件が期待できる台風期を対象に実施した。図に示すように、台地上に設置された観測塔に取り付ける形で気温・水温、風速、流速などの鉛直プロファイルが得られるように観測機器を配置した。ここで得た観測結果を数値モデルの高度化に応用した。

(2) 大気海洋波浪結合モデルの高度化

台風や爆弾低気圧の発達に寄与する大気海洋間の相互作用に着目し、運動量及び海洋乱流のフラックスを推定するバルク式の改良に取り組んだ。運動量フラックスではその推定に重要な海面粗度 (z_0) について、波浪影響を取り込み、従来型の風速によるパラメタリゼーションとの比較、検討を行った。具体的には、波浪影響を波高や波形勾配、波齢の関数として表現するパラメタリゼーションを大気海洋波浪結合モデルに組み込んだ。また、海洋乱流フラックスでは波のエネルギー散逸が海洋乱流に変換される割合の変動要因について解析し、その結果を大気海洋波浪結合モデルに組み込んだ。両パラメタリゼーション導入後、大気海洋間相互作用が特に活発になる台風を対象にテスト計算を実施し、その効果の検討を行った。テスト計算は2013年台風 Haiyan や2014年台風 Neoguri, Hagupit を対象に実施した。9 km から 1 km 解像度までの高解像度計算を行った。

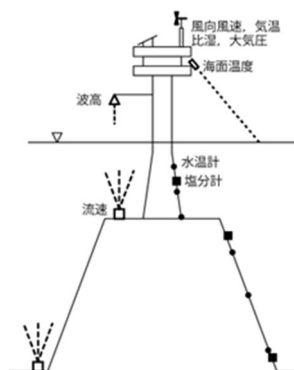


図1 田辺中島高潮観測塔における観測機器の配置概要

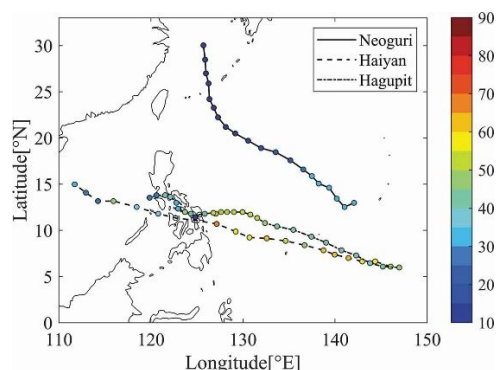


図2 計算対象の台風経路

(3) 爆弾低気圧およびそれによる沿岸災害の解析

過去および将来における爆弾低気圧の変化や、爆弾低気圧による沿岸災害の強度や頻度の解析を実施した。爆弾低気圧の解析では、大規模かつ様々な気象予測データを処理するため、高速かつ安定的に動作する爆弾低気圧抽出アルゴリズムを開発した。抽出アルゴリズムは、海面更正気圧のスナップショットから低気圧中心を抽出し、抽出された低気圧中心をトラッキングする。その後、全ての低気圧から爆弾低気圧を判定するものである。過去気候の解析として、JRA-55や

d4PDF 過去実験などのデータセットの解析を行った。また、将来気候の解析として d4PDF +4K 実験や MRI-AGCM による 150 年予測実験などを解析した。

爆弾低気圧による沿岸災害の予測手法として、経験的高潮予測モデルおよびニューラルネットワーク (NN) を用いた波浪予測モデル、先に述べた高潮・波浪を予測する大気海洋波浪結合モデルの開発、改良を行った。経験的高潮予測モデルでは、過去観測データと数値予測データを組み合わせることで資料不足を補い、精度の高い予測モデルを構築した。NN を用いた波浪予測モデルでは超低頻度高波浪の予測を可能とする波浪発達理論にもとづく学習データ、モデルの最適化を実施した。大気海洋波浪結合モデルでは、高度化の検証およびイベント再現実験を行った。

4. 研究成果

(1) 現地観測

研究期間 3 年のうち、台風来襲期を対象に田辺中島高潮観測塔を利用して現地観測を行った。現地観測では海面近傍を中心に、大気側は風速 (2 点)、気圧、気温、比湿を、海面は海面温度、波高を、海洋側は流速および散乱強度の鉛直プロファイル、水温 (6 点)、塩分 (3 点) を観測した。顕著な高風速イベントはなかったものの、多項目大気海洋同時観測結果を得た。

(2) 大気海洋波浪結合モデルの高度化

台風 Haiyan を対象に、波浪影響を加味した海面粗度推定式の影響評価を実施した。図 3 に海面粗度推定式を変えたことによる台風中心気圧と最大風速の変化を示す。赤実線は従来式での推定結果を示しており、初期や台風が上陸する 11/8 0:00 以降は観測と良く一致している。青および緑実線は波浪を考慮した推定結果を示しており、青はさらに上限値を設定した結果を示している。上限値を設定した条件では従来式での推定結果との差は小さかった一方で、上限値のない条件では、数値モデルでの再現が困難とされる 11/5 から 11/7 にかけての急発達を良く再現する結果を得た。推定式を変更した影響は、台風中心近傍における海面抵抗係数の分布によく表れており (図 4)、従来式では気圧分布と同様の同心円状であったのに対して、波浪を考慮した式では台風の右側後方にピークが表れる分布となった。台風の発達との関係では分布の形状ではなく、ピーク値の影響が強く評価された。

強風による海洋混合そして海水温の変化に影響する海洋乱流フラックスについて、観測結果をもとに評価した。風向と波向きとの差に対する依存性が見られ、その関係を定式化した。比較対象として、従来型の風速依存式および波エネルギー散逸から一定割合が流入する簡易な波浪依存式を用いた。前述の 3 台風への影響評価を実施した結果、海面水温に対して最大 0.5℃、その影響を受ける台風中心気圧に対して最大 10hPa の差が表れた。

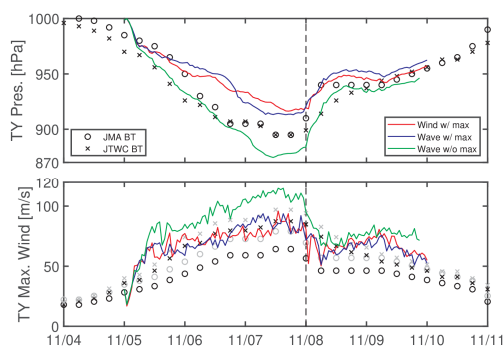


図 3 波浪影響を加味した海面粗度推定式による台風強度への影響(上段: 中心気圧, 下段: 最大風速, 黒○×: 気象庁・JTWC 観測, 赤: 従来式推定結果, 青・緑: 波浪を考慮した推定結果)

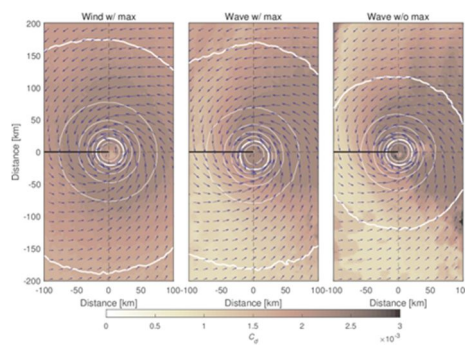


図 4 左向きに進行する台風中心近傍の気圧 (コンター), 風速 (ベクトル), 海面抵抗係数 (シェード) の分布 (左: 従来式推定結果, 中・右: 波浪を考慮した推定結果)

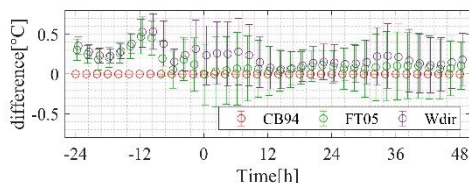


図 5 台風 Neoguri 通過時の海面水温の変化 (赤: 風速依存式, 緑: 従来波浪依存式, 紫: 提案式での結果)

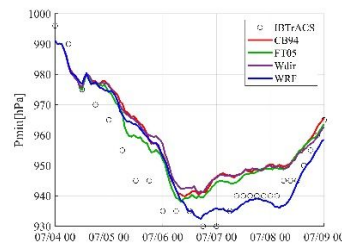


図 6 最低中心気圧の時間変化 (黒: 観測, 実線: 図 5 と同じ)

(3) 爆弾低気圧およびそれによる沿岸災害の解析

様々な気候予測データセットから新たに開発した爆弾低気圧抽出アルゴリズムを使用して、爆弾低気圧の情報を抽出した。爆弾低気圧の過去変動として JRA-55 からの抽出結果を解析した結果、1960 年代から現在にかけて特に強い勢力を持った爆弾低気圧の強度がより強くなっていることがわかった。また、通過経路は 11 月には日本海経路が多く、1 月には日本海経路に加えて日本南岸経路が増加し、3 月には日本南岸経路が多数を占める季節的な変化が見られた。また、気候変動の影響評価として d4PDF から爆弾低気圧を抽出した結果、将来気候における日本海経路の増加、日本南岸経路の減少が示された（図 7）。強度は年平均強度に変化がないものの、10 年確率値では日本周辺のほぼ全域で数 hPa 強化される結果を示した（図 8）。また、爆弾低気圧は停滞性も重要であるが、北緯 40 度以北では上空の西風の強化によって移動速度が上昇することが示された。また、MRI-AGCM3.2H, MRI-AGCM3.2S による 150 年連続予測実験からも d4PDF と同様の結果を得た。

爆弾低気圧による沿岸災害を予測するため、経験的に高潮を予測する手法と NN を用いて高波を予測する手法を新たに開発した。高潮予測では根室を対象地点として選択し、過去の高潮観測結果および JRA-55 を外力に高潮モデルで予測した結果を組み合わせ、経験的に予測する手法を構築した。観測ではサンプルの少なさから予測精度に課題があったが、サンプル数を高潮モデルでの予測結果で補うことで相関係数 0.9 を超える高精度な予測モデルとなった。高潮の予測結果は、爆弾低気圧による気圧低下は大きくなるものの、風速はやや小さくなることから現在気候での災害規模と差はなかった。次に、富山湾を対象にした高波予測 NN を構築した。経験的高潮予測モデルと同様にサンプルの不足が見られたが、予測データをさらに統合するアンサンブル型の NN を構築することで精度の向上に取り組んだ。新たに開発した NN を JRA-55 に適用することで防災施設的设计基準となる波浪統計量について観測期間の短い統計値の危険性を示し、d4PDF に適用することで気候変動による高波を評価した。

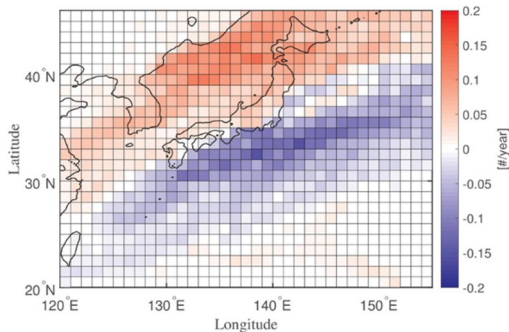


図 7 d4PDF から抽出された将来気候における爆弾低気圧通過個数の変化

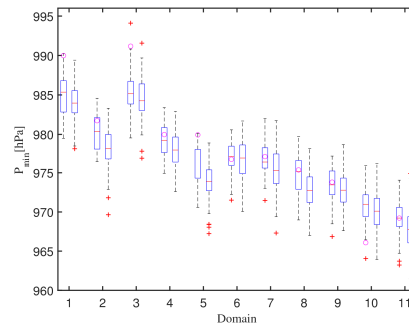


図 8 日本周辺の領域別爆弾低気圧の 10 年確率強度 (Domain: 日本周辺の領域, 左: 現在気候, 右: 将来気候)

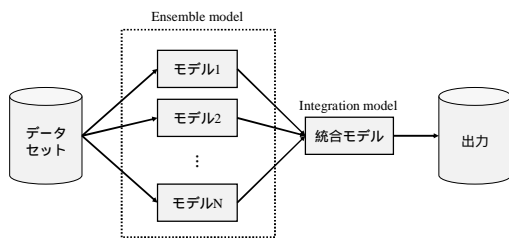


図 9 高波予測 NN の概要図

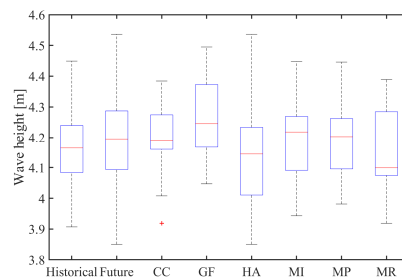


図 10 年最大有義波高 (過去気候, 将来気候と海面水温変動パターン別の 6 種の将来気候)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 MASUDA Kazuki、NINOMIYA Junichi、SAITO Takehisa	4. 巻 76
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF COASTAL WAVE ESTIMATION MODEL FOR TOYAMA BAY USING ENSEMBLE LEARNING NEURAL NETWORK	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_235 ~ I_240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 NINOMIYA Junichi、TAKEMI Tetsuya、MORI Nobuhito	4. 巻 76
2. 論文標題 EFFECTS OF WAVE AND MIXING LAYER DEPTH ON DEVELOPMENT OF TYPHOON HAIYAN USING HIGH RESOLUTION MODELING	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_175 ~ I_180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_175	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 TAKAGI Masashi、MORI Nobuhito、NINOMIYA Junichi	4. 巻 76
2. 論文標題 IMPACT OF WAVE INDUCED OCEAN UPPER LAYER MIXING ON HEAT TRANSPORT IN NUMERICAL TYPHOON SIMULATIONS	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_253 ~ I_258
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/kaigan.76.2_I_253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mori Nobuhito、Ariyoshi Nozomi、Shimura Tomoya、Miyashita Takuya、Ninomiya Junichi	4. 巻 164
2. 論文標題 Future projection of maximum potential storm surge height at three major bays in Japan using the maximum potential intensity of a tropical cyclone	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Climatic Change	6. 最初と最後の頁 1 ~ 18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10584-021-02980-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 高裕也, 二宮順一, 森 信人, 金 洙列	4. 巻 75
2. 論文標題 d4PDFを用いた根室における爆弾低気圧に起因する高潮の将来変化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_1225-I_1230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 馬場康之, 久保輝広, 森 信人, 渡部靖憲, 山田朋人, 猿渡亜由未, 大塚淳一, 内山雄介, 二宮順一	4. 巻 75
2. 論文標題 2018年夏期に観測された台風に伴う高波浪について	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_271-I_276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 増田和輝, 二宮順一, 斎藤武久	4. 巻 75
2. 論文標題 寄り回り波を予測するニューラルネットワークの感度解析による過去事例の分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_127-I_132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 千綿 時, 志村智也, 二宮順一, 森 信人	4. 巻 75
2. 論文標題 日本周辺の極端波浪の統計的特性と気象・地形要因の関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_97-I_102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高木雅史, 森 信人, 二宮順一, 志村智也, 内山雄介, 馬場康之, 水谷英朗, 久保輝広, 渡部靖憲, 大塚淳一, 山田朋人, 猿渡亜由未	4. 巻 75
2. 論文標題 砕波による海洋表層混合のパラメタリゼーションと台風に対する応答	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_61-I_66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 増田和輝, 二宮順一, 斎藤武久	4. 巻 75
2. 論文標題 ニューラルネットワークによる寄り回り波予測に関する精度評価と学習データの感度解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B3 (海洋開発)	6. 最初と最後の頁 I_313-I_318
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takagi Masashi, Ninomiya Junichi, Mori Nobuhito, Shimura Tomoya, Miyashita Takuya	4. 巻 64
2. 論文標題 Impacts of wave-induced ocean surface turbulent kinetic energy flux on typhoon characteristics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Coastal Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 151 ~ 168
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/21664250.2021.2017191	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ninomiya Junichi, Taka Yuya, Mori Nobuhito	4. 巻 237
2. 論文標題 Projecting changes in explosive cyclones and high waves around Japan using a mega-ensemble projection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 109634 ~ 109634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2021.109634	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 二宮順一
2. 発表標題 高解像度台風計算における大気海洋間パラメタリゼーションの影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二宮順一
2. 発表標題 台風Haiyanの高解像度計算における海洋・波浪の感度
3. 学会等名 第67回海岸工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junichi Ninomiya
2. 発表標題 Impact of estimation methods of drag coefficient at sea surface on typhoon Haiyan using high-resolution air-sea-wave coupled model
3. 学会等名 2nd INTERNATIONAL WORKSHOP ON WAVES, STORM SURGES AND COASTAL HAZARDS (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------