

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04416

研究課題名(和文) マルチスケールを考慮した気候の長期変動と沿岸災害の複合評価

研究課題名(英文) Multi-scale wave climate variability and related coastal disasters

研究代表者

森 信人 (Mori, Nobuhito)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号：90371476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：近年、過去の気候再解析値の整備が進み、年～数十年周期の変動、さらに地球温暖化による長期的なトレンドが総合的に評価可能となってきた。海岸工学で重要となる平均波浪場、極端波浪場に着眼し、気候システム、波浪の沿岸外力、沿岸災害の変動特性の評価を行った。気候変動指数等を説明変数に、波高等の沿岸外力の季節～十年変動の変化を予測するためのモデルを開発とその精度検証を行った。極限波浪については、日本周辺の台風強度の経年変化や極値分布の関係について解析し、うねりと風波の割合についても評価した。海浜変形および港湾荷役稼働率の長期変動特性と波浪変動特性の関係についても解析を行い、その特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工学的に重要な暴波浪災害の長期評価は極値統計解析、海浜変形は数年単位の観測をもとに行われている。近年、過去の気候再解析値の整備が進み、年～数十年周期の変動、さらに地球温暖化による長期的なトレンドが総合的に評価可能となってきた。そこで本研究は、気候システムが持つ年変動～数十年のマルチスケールの長期変動に着目し、気候と沿岸外力である波浪の時空間的な構造を明らかにした。このような沿岸外力や災害リスクの変動特性を理解することにより、想定(設計条件)の不確実性を軽減することが可能となる。これらの結果は、性能規定型の港湾設計技術に応用することができ、工学的に大きな波及効果を持つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：The development of historical reanalysis of atmospheric climate has been progressed, and it has become possible to evaluate long-term trends due to global-warming changes and annual to decadal natural variabilities. In this study, we focused on the multi-scale variability of the climate system the wave climate as coastal forces. In particular, we focused on the mean waves and the extreme waves, which are important in coastal engineering. We developed a model for predicting the change of the seasonal to decadal fluctuation of the wave height. We also analyzed the relationship of characteristics between the extreme waves and typhoon intensity and tracks around the Japan. It is valued the ratio of the swell and the wind wave in the extreme wave conditions. We also analyzed the relationship between the beach deformation and the long-term characteristics of the port cargo operation rate and examined the relations between the wave variabilities.

研究分野：海岸工学

キーワード：波浪 沿岸災害 自然変動 気候変動

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 地球温暖化の影響評価研究では、海面上昇等の長期トレンドの予測が重要な課題の1つであり、IPCC 第5次報告書(2013)でも広く議論されている。このような気候システムの長期トレンドに対して、年から数十年に渡る長期変動（自然変動）も重要である。これらの自然変動は、大規模スケールから領域スケールにおいて様々な時空間構造を持つ。IPCCのデータにもとづく全球平均の海面水位の将来変化は、明瞭なトレンドを持つが、日本スケールは十年程度の変動成分を示す。このような長期変動は、異なるスケールの振動モードから構成されており、エルニーニョ・南方振動（ENSO）を始め、幾つかの特徴的な変動がある。さらに、沿岸域のローカルな現象と自然変動の関係も議論されつつある。例えば、太平洋における波エネルギーフラックスは、ENSO指標と弱い相関があり、砂浜の汀線変動との関連が指摘されている。

(2) 一般に地域スケールで起こる沿岸災害は、気候システムとの間に単純な相関や構造を見出すことは難しい。これは、気候システムの変動が年～数十年のマルチスケールの長期変動を複合的に含むだけでなく、ランダムな要素も含むためであり、様々な時空間スケールの気候変動特性を考慮して沿岸外力や沿岸災害等との関係を分析する必要がある。特に自然変動の影響は全球から領域スケールとなると顕著になり、過去事象や将来変化を評価する上で大きなウェイトを占める。しかしこれらの影響は、波浪や海浜変形の長期変化に対して重要であるものの、観測値のみでは自然変動の時空間的なスケールを把握できないために定性的な傾向を得ることも難しい。さらに、海岸構造物の設計条件は、高波（極限波）を対象に極値統計により決定されるが、極値分布を外れる極限波により被災する例も多い（例えば2012年4月日本海爆弾低気圧）。このような設計を上回る極限波は偶発波浪と呼ばれるが、これが統計的な変動の範囲（偶然）なのか、それとも気候システムの自然変動の範囲内なのかを評価することは工学的に重要である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、沿岸外力や沿岸災害リスクに対して、長期トレンドや振れ幅を支配する気候因子を明らかにするとともにその変動幅についての評価を行うことを目的とする。このため、以下の4項目を研究する。

- (A) 気候要因
- (B) 沿岸外力
- (C) 沿岸災害のマルチスケールの自然変動特性の把握
- (D) 気候・沿岸災害間のマルチスケールの変動特性の評価

対象とする沿岸外力は、平均波浪場、極限波浪場、高潮偏差の3項目、沿岸災害は高波被害および海浜変形等とする。気候→沿岸外力→沿岸災害とランダム性の影響が増加するため、各項目間の相関と不規則性を考慮しつつ、気候システムのマルチスケールの自然変動を把握し、長期トレンドと自然変動成分の量的評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 本計画は、A) 気候、B) 沿岸外力およびC) 沿岸災害のマルチスケールの自然変動特性の把握とD) 気候・沿岸外力・沿岸災害間のマルチスケール変動特性の相互関係の評価の4項目で構成される。項目A～Cでは、気候、波浪等について、長期間の観測・再解析値等を用いて、個々のマルチスケールの自然変動の特徴を明らかにする。項目Dでは、項目A～Cで得られた個々の変動や長期トレンドの相互関係について解析し、気候システムの自然変動とリンクした沿岸災害リスクの海域・スケール依存性について明らかにする。全体を通して、これまで定量的に評価されなかった気候自然変動と沿岸災害リスクの関係を、気候の変動指数と沿岸外力や沿岸災害リスクを関連付ける変動因子の推定と変動幅の評価手法を構築する。

4. 研究成果

(1) 日本周辺の波高の長期変動特性

月平均波高の変動は、港湾の稼働率や海浜の長期的な変形などに多くの影響を与える。波浪の長期変動要因は、季節変動の他にエルニーニョ等の大気海洋の大規模な年々変動の影響も考えられるが（Barnard et al., 2015）、観測データの少なさから定量的な評価が難しい。本研究では日本周辺を対象に、高解像度波浪推算結果、大気再解析値および観測データを系統的に解析し、我が国沿岸の波高の変動特性について定量的に評価する。

風波等の局所な波浪と遠方からのうねりを分離評価する統計的波浪モデルを用いて解析した。風波は評価点上の海上風速 U_{10} と海面気圧 SLP、うねりは北太平洋上の SLP の時空間分布を主成分分析した時係数を説明変数に用いて、月平均波高 H_s を多重線形回帰モデルで評価した。説明変数、格子点上の U_{10} 、SLP 及び ΔSLP と、主成分分析から得られる SLP の主要 50 成分（SLP モード）の時係を用いた。 H_s の推定値と教師データの相関係数は高く、日本海側で 0.98 以上、太平洋側でも概ね 0.9 以上の高い相関を持つ。NOWPHAS による長期観測値についても同様に統計解析し検証した。

局所要素（ U_{10} 、SLP）とリモート要素から推定される波高から、風波とうねりの寄与率が求められる。波高の変動成分に対する風波の寄与率は、日本海側は 60%以上、太平洋側は 40%以

下と大きく異なる。さらに SLP モードと代表的な 20 個の気候変動指数の関係を調べた。例えば、主成分の第 3 成分の時系列と太平洋北米指数 (PNA) の相関係数は 0.72 である。同様な解析を系統的に行い、各成分の同定を行った。多くの SLP モードは、PDO 等の SST 定義の気候変動指数と 0.8 以上の相関があり、気候変動指数との明確な関係を確認した。

主成分の時定数の空間分布特性より、波高の変動特性の海域差が理解できた。第 1 次時定数の変動は季節変動に相当し、これ以外の時定数が年々変動に相当する。図-1 は、波高の変動に対する第 2~50 成分の時定数の積算寄与率である。リモート要素は、日本海側では 5%以下しか変動に寄与していないが、太平洋側では概ね 50~60%と大きな寄与率を示す。年々変動については、太平洋側の東西でもモードと空間分布が異なる。例えば PNA に対応する第 3 成分の寄与率は、西日本を中心に 15%以上あり、北太平洋の気圧の南北振動が波高に明確な影響を与えている。この他、南西諸島太平洋側に 10%程度影響する第 2 成分 (AO に相当)、東日本太平洋側に 7%程度影響する第 6 成分等、日本周辺の波高の変動特性の誘因と海域特性を明らかにした。

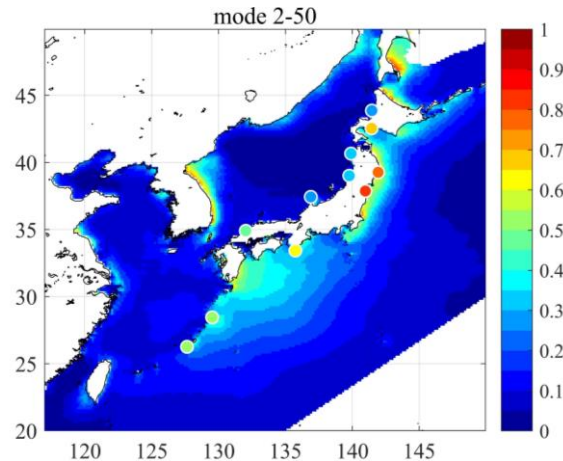


図-1 SLP 第 2-50 モードのトータル分散寄与率 (図中の○は NOWPHAS 観測点の値)

(2) 波浪方向スペクトルの変動

沿岸波浪の常時観測においては、風波と外洋からの複数のうねりが共存する場合に波浪スペクトルが多峰性を示すことが良く見られるが、解析が難しいことから、これまで理解が進んでいなかった。しかし、多峰性の把握・評価は波浪外力評価や波浪モデルの精度検証において重要である。方向スペクトルから多峰性の情報を抽出する手法として、Hanson et al.(2001)による Wave Identification and Tracking System(以下、WITS)が広く使われている。しかし、WITS では、ピークの検出や併合の処理の閾値を経験的に設定する必要があり、想定すべき海象条件が観測地点・季節によって異なる観測データに対して適切な閾値を設定することは困難である。本研究では、経験的な閾値の設定を必要としない、統計的手法による波浪方向スペクトル Partitioning を開発し、風波とうねりの割合の変化を推定した。

クラスタリングに用いられる混合分布モデル(以下、Mixture)を波浪方向スペクトル Partitioning に応用した。Mixture で推定する混合分布として、周波数上は正規分布を、方位角上は円周上の正規分布に対応する von Mises 分布を用いた。べき乗変換の一種である Box-Cox 変換による前処理を行うことで波浪スペクトルを正規分布に変換し、Mixture を適用した。ピーク周波数・波向、各ピークの波高に対応するパラメータは EM アルゴリズムで推定し、ピークの数も赤池情報量基準を評価することにより自動的に決定する自動化を試みた。

波浪モデルで推算されたスペクトルに対して Mixture を適用し、うねりと風波の割合を推定した。SWAN を用いて波浪推算を実施し、2013 年台風 26 号によりナウファス鹿島で生じた高波を検討対象として、ピーク数および各ピークの波高の時系列を比較したものを図-2 に示す。推定され

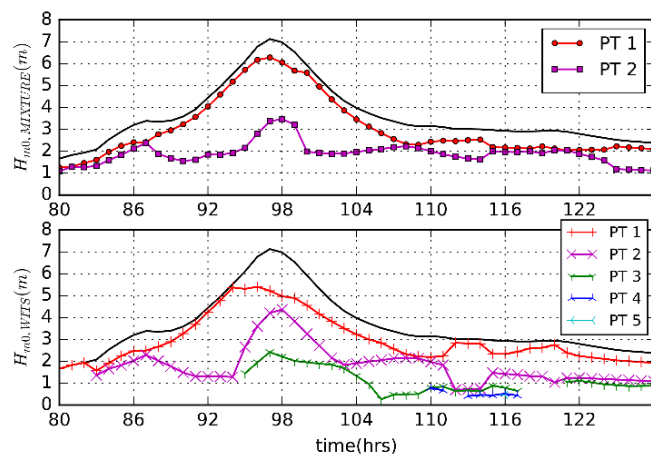


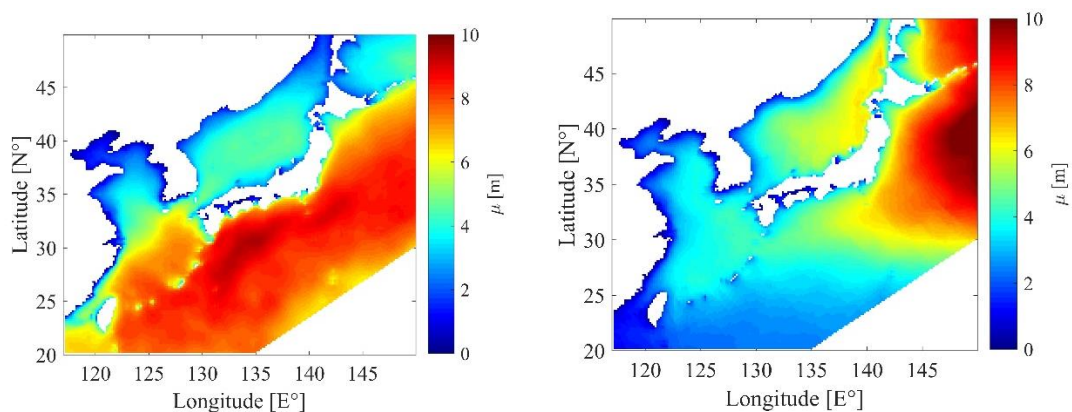
図-2 2013 年台風 26 号を対象とした Partitioning 結果:
鹿島 (上: Mixture モデル, 下: WITS モデル)

たピークの数に注目すると、WITS が 1~5 つと不自然に大きく変動していたのに対して、Mixture は期間を通じて 2 つと変動が見られなかった。以上の結果、風波とうねりの割合の時間変化を推定し、その変動特性を明らかにした。

(3) 極端波浪の統計的特性

日本本沿岸全域を対象に台風と爆弾低気圧の 2 種類の気象擾乱別に極端波高の極値統計解析を行い、極値分布を決定付ける気象要因の影響を解析した。解析に用いた波浪データは、JRA-55 をもとに WAVEWATCHIII(WW3)によって 17km 解像度で行った 34 年間の波浪推算結果である。極端波浪を引き起こし得る気象擾乱として台風及び爆弾低気圧に注目して分類した。気象擾乱データは、台風に IBTrACS, 爆弾低気圧に JRA-55 の海面更正気圧から自動抽出した結果を用いた。それぞれの気象擾乱の中心から一定距離の有義波高 (Hs) を対象に、年最大波高を抽出し、気象擾乱の種類別の極値波高とした。極値分布は位置母数 μ , 尺度母数 σ , 形状母数 k の 3 母数関数である一般化極値分布 (GEV) を仮定し、各母数の空間分布を推定した。

極端波浪と気象要因の関係について、気象擾乱の種類別に有義波高の極値統計解析を行い、極端波浪を引き起こす気象要因と波高の関係を解析した。一般的に太平洋側では台風、日本海側では爆弾低気圧の影響が支配的であるため、太平洋側及び日本海側における GEV の位置母数 μ の分布形状は異なる特徴を示す。特に日本海側西日本では、台風と爆弾低気圧が混在した特徴的な極値分布を持つことがわかった。3 母数の空間分布と気象擾乱の関係を解析した。台風及び爆弾低気圧による極端波高の位置母数 μ の空間分布 (図-3) は各気象擾乱の経路と関連する結果が得られた。総観スケールでは GEV の 2 つの母数は気象擾乱の経路に強く依存し、湾スケールではより細かいスケールで地形により GEV の母数が変化することを明らかにした。



(a) 爆弾低気圧

図-3 気象擾乱の種類別の年最大波高に対する GEV の位置母数 μ の空間分布

(4) 港湾の荷役稼働率の変動

気候変動が平均・極端波浪場にもたらす影響評価の一環として、離島に着目し、気象庁による大気再解析値 JRA-55 をもとに WAVEWATCHIII を用いて行われた長期波浪推算のうち南北大東島沖の 34 年間 (1979 年~2012 年) の解析結果を利用して、極値統計解析による確率沖波の推移、及び NOWT-PARI による波浪変形計算を通じて得た各島の 3 方に位置する岸壁での荷役稼働率の推移について解析した。

南北大東島沖の推算値のうち、年最大有義波高・周期及び年平均有義波高の経年変化調べた。有義波高の最大値・平均値ともに 5 年程度の周期で増減を繰り返しているが、2004 年前後を除き、1998 年を境にその変動中心が下方にシフトしている。ついで、岸壁における荷役稼働率の推移を調べた。1 時間毎に推算された 34 年間の沖波諸元から各岸壁での波浪諸元に変換し、荷役稼働率を算定した。岸壁における荷役限界波高を 1m とか停止、このとき算定される各岸壁での荷役稼働率の経年変化を求めた (図-4)。年平均有義波高の経年変化傾向を反映して 1998 年頃を境にいずれも微増傾向にある。しかし、N 系の波の構成比が近年安定して高いことを反映して、各島の北地区岸壁での稼働率はほぼ横ばいであることがわかった。

南北大東島海域での長期波浪推算結果及び波浪変形計算結果を用いて、両島に來襲する確率沖波及び年平均波、及び両島岸壁での荷役稼働率の推移について考察した。この海域では 1998 年以降、荷役稼働率が微増し、顕

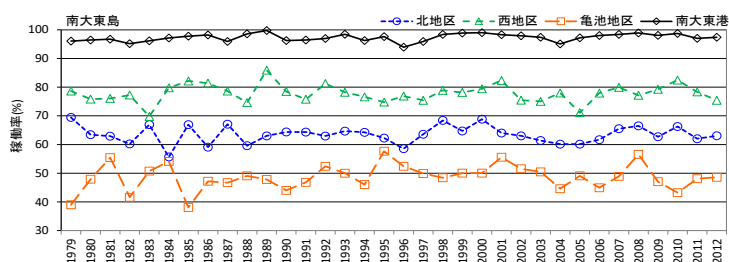


図-4 各岸壁での荷役稼働率の経年変化 (南大東島)

著な高波擾乱もみられないことを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計15件)

1. Mori, N., S. Nakajo, S. Iwamura and Y. Shibutani (2018) Projection of decrease in Japanese beaches due to climate change using a geographic database, Coastal Engineering Journal, Taylor & Francis, 8p. doi: 10.1080/21664250.2018.1488513
2. Yang, J.A, S.Y. Kim, N. Mori, H. Mase (2018) Assessment of long-term impact of storm surges around the Korean Peninsula based on a large ensemble of climate projections, Coastal Engineering, Elsevier, Vol.142, pp.1-8. doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.09.008
3. Kishimoto, R., T. Shimura, N. Mori and H. Mase (2017) Statistical modeling of global mean wave height considering principal component analysis of sea level pressures and its application to future wave height projection, Hydrological Research Letters, Vol.11(1), pp.51-57. doi: 10.3178/hr.11.51
4. Mori, N. and T. Takemi (2016) Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean, Weather and Climate Extremes (review paper), Vol.11, pp.53-69. doi: 10.1016/j.wace.2015.09.002
5. Shimura, T., N. Mori and M.A. Hemer (2016) Variability and future decreases in winter wave heights in the Western North Pacific, Geophysical Research Letters, Vol.43(6), pp.2716-2722. doi:10.1002/2016GL067924
6. 藤木 峻, 森 信人, 川口浩二, 末廣文一 (2018) 混合分布モデルを用いた波浪方向スペクトル Partitioning に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_103-I_108.
7. 志村智也, 森 信人 (2018) JRA-55 にもとづく日本周辺の高解像度長期波浪推算と波候スペクトルの解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_127-I_132.
8. 森 信人, 志村智也, 岸本理紗子 (2018) 日本周辺の波高の長期変動特性と気候変動指数の関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_133-I_138.
9. 岡田 信瑛, 内山 雄介, 多田 拓晃, 遠藤 颯, 馬場 康之, 水谷 英朗, 久保 輝広, 森 信人, 渡部 靖憲, 大塚 淳一, 山田 朋人, 猿渡 亜由未, 二宮 順一 (2018) 半閉鎖性内湾における海水交換特性の季節変化とその形成メカニズムについて, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_667-I_672.
10. 澁谷容子, 小竹康夫, 森 信人, 佐々木淳 (2018) 海上施工時における低波浪およびうねり性波浪の経年変化と将来変化に関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 74(2), I_1333-I_1338.
11. 森 信人, 千綿 蒔, 二宮順一, 間瀬 肇 (2017) JRA-55 を用いた日本周辺の冬期低気圧の長期変動特性について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_487
12. 岸本理紗子・森 信人・志村智也・間瀬 肇 (2017) 海面気圧の主成分を考慮した統計的波高推定法の高度化と波高の将来変化予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 73(2), I_1411
13. 岸本理紗子, 森 信人, 志村智也, 安田誠宏, 間瀬肇 (2016) 海面気圧の主成分を考慮した全球の統計的波高推定手法の開発. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), I_139-I_144.
14. 久保 慎也, 二宮 順一, 森 信人, 馬場 康之, 水谷 英朗, 久保 輝広, 内山 雄介, 渡部 靖憲, 山田 朋人, 大塚 淳一, 猿渡 亜由未 (2016) 現地観測に基づく水温躍層の破壊と鉛直混合に関する研究. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), I_487-I_492.
15. 小坂田祐紀, 澁谷容子, 森信人, 志村智也, 黒岩正光, 松原雄平 (2016) 気候変動に伴う波浪特性の変化が皆生海岸の地形に与える影響について. 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 72(2), I_847-I_852.

〔学会発表〕(計9件)

1. Mori, N., R. Kishimoto and T. Shimura (2018) Wave climate variability and related climate indices, Proceedings of the 36th International Conference on Coastal Engineering, ASCE,
2. Chiwata, M., T. Shimura and N. Mori (2018) Relation between shape of extreme wave height distributions and weather system, Proceedings of the 36th International Conference on Coastal Engineering, ASCE,
3. 澁谷容子・根橋宙加・横塚和久・小竹康夫・森 信人 (2018) 海上工事における施工実績と波浪特性の関係について, 土木学会年次講演会
4. Mori, N., T. Shimura, H. Kamahori and A. Chawla (2017) Historical wave climate hindcasts based on JRA-55, Proceedings of Coastal Dynamics 2017, pp. 117-124.

5. Mori, N. (2018) Impact Assessment of Climate Change on Coastal Hazards in East Asia, AOGS 13th Annual Meeting
6. Mori, N. and T. Shimura (2017) Long-term impact assessment of storm surge based on Japanese mega-ensemble projection (d4PDF) using 60 km AGCM, 1st International Workshop on Waves, Storm Surges and Coastal Hazards, Liverpool, UK.
7. Uchiyama, Y., T. Yoshiki, H. Tada, Y. Baba, H. Mizutani, T. Kubo, N. Mori, A. Saruwatari, J. Ohtsuka, J. Ninomiya, Y. Watanabe, Upper Ocean Dynamics and Associated Water Exchange at the Entrance of a Semi-enclosed Bay Based on an In-situ ADCP Measurement, AOGS 13th Annual Meeting
8. 千綿 蒔, 森 信人, 間瀬 肇 (2017) JRA-55 を用いた日本周辺の冬期低気圧の長期変動特性について, 土木学会関西支部, 2p.
9. 平山克也, 濱野有貴, 森谷拓実 (2019) 長期波浪推算に基づく確率沖波及び荷役稼働率の推移に関する考察, 土木学会年次講演会

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：北野 利一
 ローマ字氏名：Toshikazu Kitano
 所属研究機関名：名古屋工業大学
 部局名：工学（系）研究科（研究院）
 職名：教授
 研究者番号（8桁）：00284307

研究分担者氏名：安田 誠宏
 ローマ字氏名：Tomohiro Yasuda
 所属研究機関名：関西大学
 部局名：環境都市工学部
 職名：准教授
 研究者番号（8桁）：60378916

研究分担者氏名：平山 克也
 ローマ字氏名：Katsuya Hirayama
 所属研究機関名：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
 部局名：港湾空港技術研究所
 職名：グループ長
 研究者番号（8桁）：60371754

研究分担者氏名：伴野 雅之
 ローマ字氏名：Masayuki Banno
 所属研究機関名：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
 部局名：港湾空港技術研究所
 職名：研究官
 研究者番号（8桁）：80549204

研究分担者氏名：藤木 峻
 ローマ字氏名：Toshikazu Kitano
 所属研究機関名：国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
 部局名：港湾空港技術研究所
 職名：研究官
 研究者番号（8桁）：10735004

(2)研究協力者

研究協力者氏名：志村 智也
 ローマ字氏名：Tomoya Shimura

※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、研究者個人に帰属されます。