

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360199

研究課題名（和文）マクロな土砂収支とミクロな土砂物理を融合した海浜変形予測技術の創生と比較実証

研究課題名（英文）Generation and Comparison of cross-shore profile changes considering both of the sediment budget and sedimentary structures

研究代表者

山田 文彦 (YAMADA FUMIHIKO)

熊本大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号：60264280

研究成果の概要（和文）：

岸沖方向の地形変化モデルは多くの研究がなされてきたが、依然としてその予測精度は十分ではない。本研究では、撮影の時間分解能が高い医療用X線CTを用い、移動床実験装置と組み合わせることで、波作用下での漂砂の鉛直分布や地表面形状ならびに底質内部構造を同時に、かつ連続的に計測できる計測法を開発した。その結果、申請者らが提案している漂砂量フラックスに対して見かけの比重を局所的に修正する方法の妥当性が得られた。

研究成果の概要（英文）：

A medical X-ray CT scanner was applied to dynamic measurements of beach profile changes, sedimentary structures, and sediment transport processes during wave actions in the laboratory experiments. In order to measure the cross-shore evolutions both of beach profiles and sediment transport process, the CT-scanner moves automatically along the flume. By reconstructing three-dimensional images using Hounsfield units, the evolution of beach morphology was examined. Because medical X-ray computed tomography has the advantage of a data acquisition time of 1.0 seconds for sediment transport processes during wave action, the obtained data, such as that of the suspended and bed load, are useful for clarifying the mechanism of profile change and validating numerical models.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|-----------|------------|
| 2010年度 | 7,800,000 | 2,340,000 | 10,140,000 |
| 2011年度 | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |
| 2012年度 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,000,000 | 4,200,000 | 18,200,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：底質輸送, 沿岸環境, X線CT, 地形変化

1. 研究開始当初の背景

岸沖方向の地形変化モデルに関しては、従来から多くの研究がなされている。例えば、

Bailard (1981) のパワーモデルでは、高波浪時のサンドバーの沖向き移動の再現性は比較的高い。しかし、静穏時に生じるサンドバーの岸向き移動を再現することは一般的

に難しい (Hoefel・Elgar, 2003)。この静穏時の岸向きの底質輸送のメカニズムとしては、非対称で前傾化した波形の伝播に伴う底面近傍の流速や加速度 (水平圧力勾配) の役割が重要であることが指摘されている。しかしながら、依然としてその予測精度は十分ではない。(例えば, Kobayashi ら, 2008; Ruessink ら, 2009)。この理由の一つとして、地形変化時の底質特性やその内部構造の時空間変動が未解明であること挙げられる。具体的には、地形変化時の底質内の攪乱深さ、および、攪乱深さ内の底質のかさ密度や間隙率等の時空間変動のことである。これまで計測の難しさもあり、これら底質特性の時空間変動が議論されることは少なく、時空間で一定と仮定した研究例が多い。こうした中、Foster ら (2006) は、現地観測により、せん断応力と水平圧力勾配の相対的な重要度を Sleath (1999) のモデルを拡張して検討した。Foster らは底質の攪乱深さに着目し、攪乱深さが深くなるほど、底質輸送に対する水平圧力勾配の重要度が増加することを示した。しかし、現状の計測機器の時空間分解能の制約から、底質の攪乱深さとその内部密度分布および地形変化量との関係性を定量的に現地観測で検討することは困難である。

そこで、室内実験において産業用 X 線 CT を適用し、地形変化時の底質特性やその内部構造をより詳細に計測する方法が提案された (山田ら, 2010)。この計測手法により底質の攪乱深さの変動が底質内部の密度分布から測定可能となった。さらに、底質比重や間隙率の変動を考慮して、従来の漂砂量フラックスを局所的に修正することで、地形変化計算の再現性を向上できることも示した。しかしながら、産業用 X 線 CT は 1 断面の撮影時間に数分を要し、また、撮影のためには移動床からの底質コアサンプリングが必要となり、地形変化時の底質特性やその内部構造の時空間変動を高速、かつ連続的に計測することは難しい。さらに、底質内部の密度分布の計測結果に与えるコアサンプリングの影響を定量的に評価することも困難であった。

2. 研究の目的

山田ら (2012) は撮影の時間分解能が高い医療用 X 線 CT を応用し、移動床水槽と組み合わせ、波作用下での漂砂の鉛直分布や地表面形状ならびに底質内部構造を同時に、また、高速かつ連続的に計測できる非破壊・非接触計測法を開発した。本研究では、山田ら (2012) と同様の実験装置を用いて、波作用下での移動床実験を行い、堆積・侵食過程での地形変化量と底質の攪乱深さ内のかさ密度の変化量との関係性等について定量的な考察を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

実験は平成 24 年 9 月 5 日～10 月 19 日までの約 1 ヶ月間カナダのケベック大学 INRS (Institut National de la Recherche Scientifique) で実施した。実験装置は図-1 に示すように、矩形断面 (0.3×0.3 m) のアクリル製水槽 (全長 8.64 m) を可動構台上に設置された医療用 X 線 CT (Siemens : Somatom Sensation 64) の検査孔 (直径 70 cm) の中に挿入した構造となっている。この可動構台は 4 本のレールの上に設置されており、水槽自体を動かすことなく X 線 CT 本体が約 2 m 間を自走して移動可能であり、岸沖方向の地形変化や底質輸送特性を計測できる。この 2 m 間を移動しながら計測を行なう方法を Spiral Scanning 法と呼び、撮影の所要時間は 180 s である。その他の撮影方法として、X 線 CT 本体を固定した定点計測も可能であり、この方法を Single Slice Scanning 法という。撮影方法の詳細は山田ら (2012)、Yamada ら (2013) に詳しい。

水槽には初期勾配 1/15 で中央粒径 0.147 mm (砂粒子比重 2.65 ; かさ密度 1.66 kg/m³) のオタワ砂を用いて斜面を設置した。入射波は規則波 (波高 5cm : 周期 0.7 s) と設定、沖側の一定部の水深を 20 cm とし、侵食型の波浪条件下で、地形変化を確認しながら、定常に達したと見なせた 450 分まで波を作用させた。なお、この実験では人為的に一様勾配を与えた状態での地形の定常状態を調べていることになる。そこで、初期地形の影響を比較するために、450 分以降は波高を約 2 倍 (8cm ; 周期 0.7 s) に変更し、新たな定常状態に至る過程での地形形状・底質内部特性の変化も確認した。同様に地形が定常となるまで確認しながら波を作用させ、合計 900 分間波を作用させた。岸沖方向の地形形状や底質内部構造は 45 分毎に造波機を止め計測した。用いた医療用 X 線 CT の空間分解能は 0.6 mm (3 次元方向)、時間分解能は 1s である。

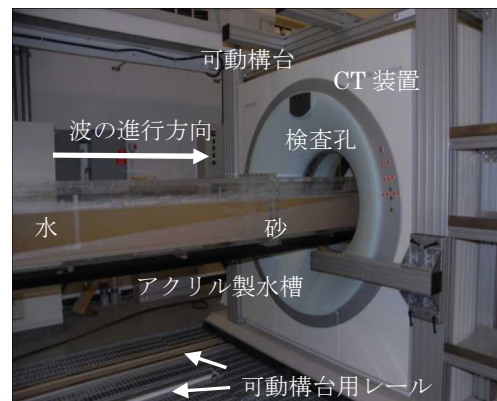


図-1 実験装置の概観

医療用 X線 CT による計測から得られる CT 画像は相対密度分布を表している。この相対密度の単位は、Hounsfield Unit (HU) であり、本装置の場合、-1024~3071 HU の範囲である。空気と水の相対密度はそれぞれ -1000 HU と 0 HU となる。今回の実験で得られる HU 値は、検査ボクセル (全方向 0.6 mm) 内の漂砂密度 (濃度) に比例する。本研究では、底質のかさ密度 (ρ_s) を以下の変換式を用いて実測した HU 値から算定した (ASTM, 1992)

$$\rho_s = -0.0257 \left(\frac{HU + 1024}{1000} \right)^2 + 1.0209 \left(\frac{HU + 1024}{1000} \right) - 0.0254 \quad (1)$$

図-2 は実験開始前の CT 撮影結果の一例である。横軸は (1) 式より求めたかさ密度であり、空気および純水の ρ_s は、それぞれ約 0.0, 1.0 kg/m³ となる。縦軸はアクリル (厚さ 8mm) 底面からの距離である。静水面は 208mm の位置にあり、それより上方は空気となる。底質表面は 75mm 付近にあり、底質かさ密度の鉛直分布は斜面作成時のならし方等の不均一性が表れている。また、水の領域で純粋の ρ_s より若干値が大きいのは、注水時に斜面上の砂が巻き上がった影響による。しかしながら、図より (1) 式により流体~底質内の密度分布が定量的に評価可能であることが確認でき、次節以降の解析に用いた。

(1) 地形変化の連続計測結果

図-3 は Spiral Scanning 法により得られた底質の表面形状 (地形) の時空間分布を表示した結果である。図中の地形の濃淡は白色ほど表面高さが高いことを表しており、3 次元の地形形状が再現されていることが分かる。

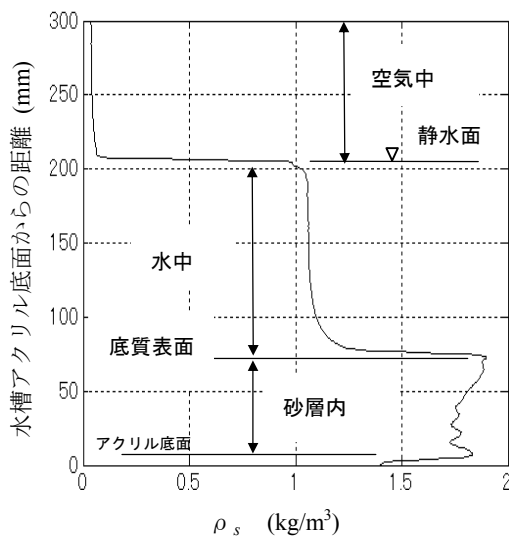


図-2 かさ密度 (ρ_s) の鉛直分布の計測例

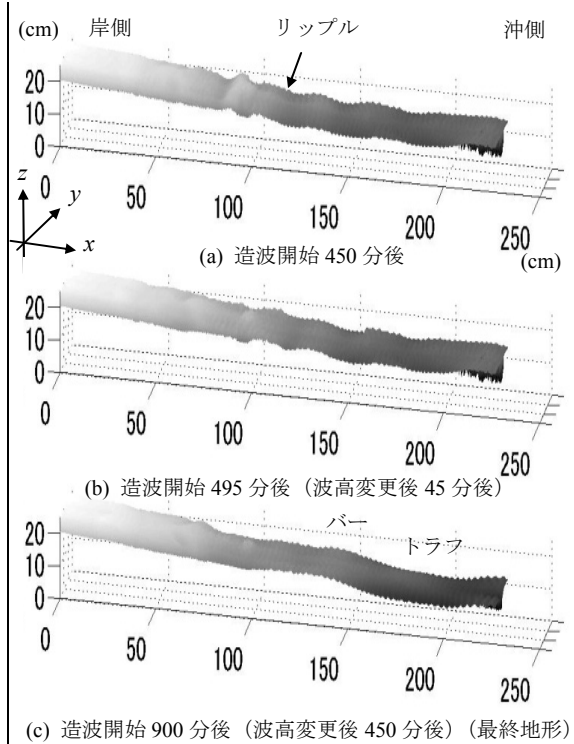
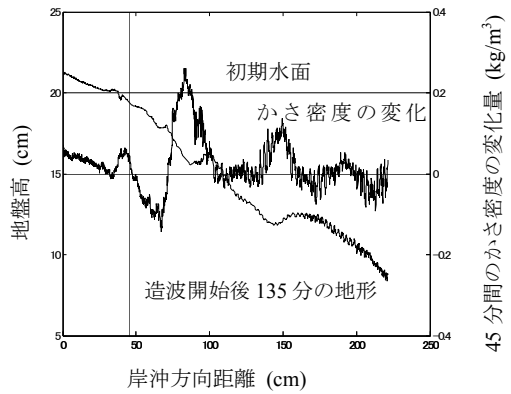


図-3 底質表面形状の時空間変化の計測結果 (奥行 30cm)

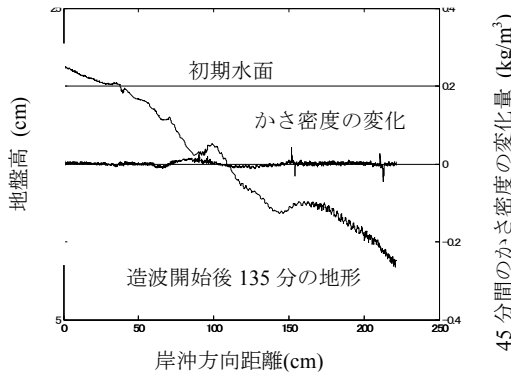
(2) 地形変化と底質密度の関係性

地形変化に伴う底質のかさ密度の変動範囲の推定とその時空間分布等を検討した。そのために表層から 1 mm 毎に深さを変化させ、45 分毎の底質密度の差分を比較することで、底質のかさ密度の変動が顕著な範囲を調べた。

図-4 は波作用時間が 90 分~135 分の間のかさ密度の変動の鉛直方向の平均値を 135 分後の地形と重ねて示したものであり、a) 図は表層から 9mm 以内、b) 図は表層から 9mm 以深での結果を示す。また、図-5 は同様に波作用時間が 405 分~450 分の結果である。これらの結果より、地形変化に伴う底質かさ密度の変動が顕著な範囲は表層から 9mm 内に分布することが分かる。同様に全ての時間で比較を行ったが、今回の実験では、すべての時間において表層 9mm 以深では、かさ密度の変動がほとんど生じていないことが分かった。つまり、底質の攪乱深さは約 9mm となり、この値は平均粒径 d_{50} の約 60 倍、碎波波高の約 0.15 倍に相当する。この値は Madsen (1974) の水平床での理論値 (0.11 倍) に近い値であるが、注意する点は、瞬時の地形表面を基準とした深さであり、初期地形からの堆積・侵食量は含んでいないことである。

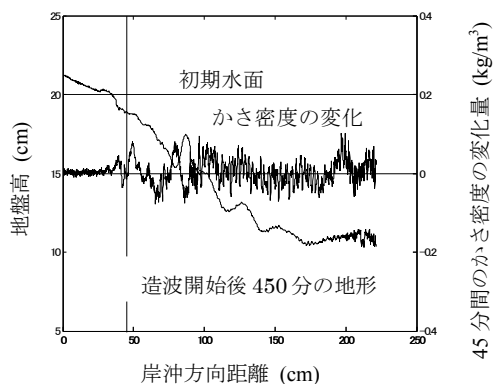


(a) 表層から 9mm 以内の底質かさ密度の変動の平均値

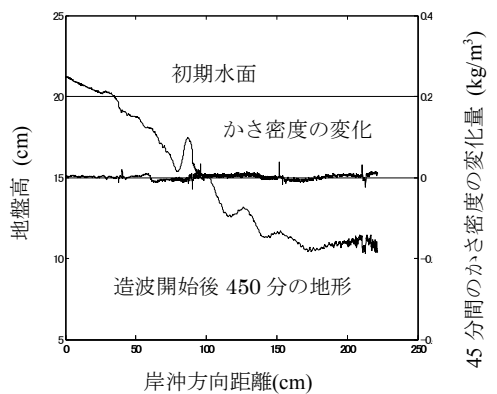


(b) 表層 9mm 以深の底質かさ密度の変動の平均値

図-4 底質内部のかさ密度の変動の岸沖分布 (波作用期間：90分～135分の間)



(a) 表層から 9mm 以内の底質かさ密度の変動の平均値



(b) 表層 9mm 以深の底質かさ密度の変動の平均値

図-5 底質内部のかさ密度の変動の岸沖分布 (波作用期間：405分～450分の間)

次に、底質の攪乱深さ内のかさ密度の変動と地形変動の関係について検討した。波作用時間が 90 分から 135 分の間のかさ密度の変動の鉛直方向の平均値と地形変動 (45 分間で堆積した場合を+) では、地形変化が定常に向うまでは、局所的に堆積した地点では、かさ密度は小さくなり、また、侵食した地点ではかさ密度が増加している。そこで、全時間のデータを用いて示したものが図-7 である。図より、底質の攪乱深さ内のかさ密度の変動と地形変動の間には負の相関が存在することが確認できる。ただし、負の相関性が必ずしも当てはまらないデータも部分的に存在することから、今回の解析では考慮していない両者の位相差の影響や地形の変動履歴などについて、今後も検討する必要がある。

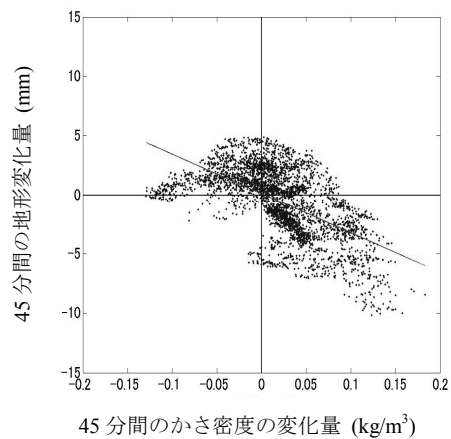


図-6 底質内部のかさ密度の変動と地形変動の相関図 (波作用期間：90分～135分の間)

4. 研究成果

時間分解能の高い医療用 X 線 CT を応用し、波作用下での移動床実験を行い、堆積・侵食過程での地形変化量と底質移動層内のかさ密度の変化量の関係などについて検討を行った。主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 底質内の地形変化に伴う底質内部におけるかさ密度の変動範囲を推定するため、45 分毎に撮影した CT 画像の差分を比較した。その結果、波高条件を変化させても、かさ密度の変動が顕著な範囲は表層から 9mm 程度であった。そこで、定量的な検証を行うために、表層 9mm 内外の砂層かさ密度の変動の平均値 (45 分間) の岸沖分布を比較した結果、すべての時間において表層から 9mm 以下では、かさ密度の変動はほとんど生じていないことが分かった。この値は平均粒径 d_{50} の約 60 倍、碎波波高の約 0.15 倍に相当する。
- 2) 底質の攪乱深さ内のかさ密度の変動と地形変動の間関係性について検討を行った結果、両者間には負の相関が存在することが確認できた。特に、地形変化が定常に向う

までは、局所的に堆積した地点では、かさ密度は小さくなり、また、侵食した地点ではかさ密度が増加する傾向がある。

これらの結果は、山田ら(2010)の提案した漂砂量フラックスに対して底質特性を代表する見かけの比重を局所的に修正する手法の妥当性を支持する根拠となりうる結果である。

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 24 件)

1. Yamada, F., Kobayashi, N., Shirakawa, Y., Watabe, Y., Sassa, S., and Tamaki, A. Effects of Tide and River Discharge on Mud Transport on Intertidal Flat, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 査読有, Vol. 138(2), 2012, 172-180

2. Nakano, T., Nasuda, J., Agata, Y., Yurimoto, T., Maeno, Y., Nakamura, Y., Yamada, F., & Tamaki, A.

Life history and population dynamics of the surf clam, *Mactra veneriformis* (Bivalvia: Mactridae), on an estuarine intertidal sandflat in western Kyushu, Japan

Molluscan Research, 査読有, Vol. 32 (3), 2012, 159-176

3. 沖 和哉, 柿木哲哉, 由比政年, 辻本剛三, 山田文彦, 平均水面の昇降が浮消波堤の波高低減効果に与える影響に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 査読有, Vol. 68 (2), 2012, I_726 - I_730

4. 山田文彦, 立山龍太, 辻本剛三, 末長清也, Bernard Long, Constant Pilote, 医療用 X 線 CT を用いた波作用下の地形変化・底質輸送の同時連続計測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 査読有, Vol. 68 (2), 2012, I_506 - I_510

5. 辻本剛三, 玉井昌宏, 宇野宏司, 柿木哲哉, 砂浜底質の色彩分析とその活用方法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 68 (2), 2012, 1456-1460

6. 玉井昌宏, 辻本剛三, 砂浜の色彩の相対比較と近隣河川の流域地質との関係, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 査読有, Vol. 68(2), 2012, 660-665

7. 辻本剛三, 濱森彩, 柿木哲哉, 宇野宏司, 連結ブロックを用いた遡上波の低減とその水理特性に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発) 査読有, Vol. 68 (2), 2012, 312-317

8. 松山正之, 由比政年, 石田 啓, 北部加越海岸における海浜変動の沿岸方向変化に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol. 68, 2012, pp. I_600-I_605.

9. 由比政年, 岡田磨香, 石川海岸における多段砂州の 3 次元周期変動特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 68 (2), 査読有, 2012, I_641-I_645

10. Yamada, F., Tsujimoto, G., and Long, B. Internal Sediment Density Structures around bars due to beach deformation using X-ray CT, Journal of Coastal Research, SI, 査読有, Vol. 64, 2011, 716-720

11. Kakinoki, T., G. Tsujimoto, F. Yamada, D. Sakai, K. Uno, Beach profile and sediment characteristics of a mixed sand beach under diurnal sea level variations, Journal of Coastal Research, SI, 査読有, Vol. 64, 2011, 765-770

12. 山田文彦, 舟越善隆, 立山龍太, 辻本剛三, 外村隆臣, 底質内部の密度構造の時空間変化を考慮した海浜変化予測モデルの適用性, 土木学会論文集 B3 (海岸工学), 査読有, Vol. 67 (1), 2011, I_496-I_500

13. 外村隆臣, 多田裕治, 末長清也, 小林信久, 山田文彦, 多段バー地形の平面分布特性と底質密度構造, 土木学会論文集 B3 (海岸工学), 査読有, Vol. 67 (1), 2011, I_621-I_625

14. 辻本剛三, 玉井昌宏, 高野浩太郎, 山田文彦, Low-Energy-Beach の岸沖地形・底質特性の変動モードの長期予測に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 査読有, Vol. 67 (1), 2011, I_576-I_580

15. 渡部要一, 佐々真治, 山田文彦, 中間軟弱層を含む干潟地盤の地層断面推定精度の向上 - MASW と微動アレイ探査の併用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) 査読有, Vol. 67 (2), 2011, I_1361-I_1365

16. 辻本剛三, 山田文彦, 酒井大樹, 甲斐田秀樹, 柿木哲哉, フィルター層を有する人工海浜の岸沖断面地形の季節変動に関する研究, 海洋開発論文集, 査読有, Vol. 26, 2010, 1209-1214

17. 沖和哉, 柿木哲哉, 辻本剛三, 由比政年, 山田文彦,
可視化実験によるダブルバリア型浮消波堤周辺における流動場特性の画像解析,
海洋開発論文集, 査読有, 2010, Vol. 26, 795-800

18. 山田文彦, 辻本剛三, 田端優憲, 立山龍太, 外村隆臣, 小林信久,
X線CTを用いた地形変形を伴うバー・トラフ付近の底質内部の密度構造の検討,
土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 66 (1), 2010, 436-440

19. 沖和哉, 平野宗治, 四辻拓哉, 柿木哲哉, 由比政年, 山田文彦, 辻本剛三,
ダブルバリア型浮消波堤におけるCd値およびCm値の計測と平面波浪特性についての考察,
土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 66 (1), 2010, 726-730

20. 西敬浩, 郷原慎一郎, Charles Lemckert, 外村隆臣, 山本浩一, 濱田孝治, 山田文彦,
ラグランジュ・ブイを用いた潮間帯での渦動粘性係数・渦拡散係数の時空間分布推定,
土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 66 (1), 2010, 1386-1390

21. 辻本剛三, 酒井大樹, 山田文彦, 柿木哲哉, 宇野宏司, 平均水位変動が混合粒径の海浜地形と底質特性に及ぼす影響
土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 66 (1), 2010, 536-540

22. 山田文彦, 白川雄一朗, 舟越善隆, 田川一彦, 外村隆臣, 坂西由弘, 小林信久, 玉置昭夫, 多田彰秀, 河口潮間帯干潟の土砂動態に及ぼす潮汐と河川出水の相対的重要度,
土木学会論文集 B2 (海岸工学) 査読有, Vol. 66 (1), 2010, 531-535

23. 榎田真也, 山崎達夫, 由比政年,
橋脚基礎周辺の洗掘過程に関する実験的研究, 水工学論文集, 査読有, 第 54 巻, 2010, 835-840

24. 由比政年, 榎田真也, 早川和宏, 川島弘靖, 浦貴暁, 石田啓, 千里浜海岸における海浜変動の基本特性に関する研究,
土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 66, 2010, 561-565

[学会発表] (計 4 件)

- ① 見垣亮太, 辻本剛三, 柿木哲哉, 宇野宏司, 「粗粒材を用いた岸沖断面地形と粒径分布の特性に関する研究」, 土木学会関西

支部年次学術講演会, 2012, 6月9日, 神戸市, 神戸市立工業高等専門学校

- ② 沖和哉, 柿木哲哉, 辻本剛三, 入射波と浮消波堤動揺の位相差と透過率および反射率の関係, 平成24年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-8, 2012, 6月9日, 神戸市, 神戸市立工業高等専門学校

- ③ OKI, K., G. TSUJIMOTO, M. YUHI, T. KAKINOKI and F. YAMADA, Evaluation of wave energy dissipation effect of double barrier floating breakwater, International Conference on Coastal Engineering (Shanghai, China), Poster Session, 2010, 6月30日~7月5日, 上海, 国際会議場.

- ④ 沖和哉, 柿木哲哉, 辻本剛三, 画像解析を用いたダブルバリア型浮消波堤周りの流動場の計測 (第2報), 平成22年度土木学会関西支部年次学術講演会, II-3, 2010, 5月22日, 京都府, 京都大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

辻本 剛三 (TSUJIMOTO GOZO)
神戸市立工業高等専門学校・都市工学科・教授
研究者番号: 10155377

由比 政年 (YUHI MASATOSHI)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 20262553

沖 和哉 (OKI KAZUYA)
京都大学・先端技術グローバルリーダー養成ユニット・講師
研究者番号: 30293880

柿木 哲哉 (KAKINOKI TETSUYA)
神戸市立工業高等専門学校・都市工学科・准教授
研究者番号: 50353298