

令和5年度

修士学位論文

海浜礫の特徴と漂砂の関係に関する実証的研究

Field study on the physical properties of beach gravels and
the relationship with sediment transport

指導教員 佐藤 慎司

副指導教員 赤塚 慎

副審査員 佐藤 理人

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻

社会システム工学コース

1265050 岡本 宝

2023年1月17日

要旨

海浜礫の特徴と漂砂の関係に関する実証的研究

岡本 宝

海岸侵食は世界的に深刻な問題であり、離岸堤やヘッドランドなどのハード対策や養浜などのソフト対策が実施されている。効果的な侵食対策を検討するには、まず、海岸での土砂移動機構を解明する必要がある。しかし、海岸での土砂移動は量と方向が複雑に変化するため土砂移動機構の理解は非常に困難である。一般的に河川の流れは、一方向であるため、土砂の移動も上流から下流に限られる。これに対し、海岸の波のもとでは、岸沖方向に往復運動するのに加えて、沿岸方向には波向き方向に弱い流れが発達する。そのため海岸の土砂は、波や地形の条件によって、岸沖のどちらにも移動し、さらに沿岸方向の移動も加わるなど、時空間的に変動が激しい。そこで、本研究では、海浜堆積物の特徴を詳細に分析することで、複雑な土砂移動機構の理解を深めることを目的とした。

本研究は、分析による仮説を現地における実測で検証しながら、段階的に進めた。対象領域は、既往研究が少なく、土砂の移動機構が未解明な高知県安芸郡琴ヶ浜海岸を選定した。全長約 5 km の琴ヶ浜海岸は、和食川・赤野川の 2 つの河川からの流出土砂で形成された礫浜である。2021 年 7 月に岡本 (2021) の卒業研究において、UAV を用いた現地調査を実施した。空間分解能約 1 cm のオルソ画像を取得し、最大粒径の沿岸分布が和食川の西側で西向きに減少していることが明らかになった。しかしながら、和食川の東側での土砂移動方向は不明瞭であったため、修士研究では、2022 年 8 月と 9 月に、礫の形状とインブリケーション構造に焦点を当てて、さらなる調査を実施した。礫の形状は、約 3000 個の礫をサンプリングし、長軸・中軸・短軸 3 軸の長さを測定した。インブリケーション構造は、礫の重なり具合からその方向を目視判定し、GNSS と方位コンパスを備えたスマートフォンカメラに記録した。礫の形状の調査では、礫の扁平率が和食川河口から西に向かって増加しており、最大粒径と同様に海浜礫の長期的な沿岸輸送が西向きであることが再確認された。一方、インブリケーション構造は、先行する台風による高波の入射方向に強く影響され、海浜礫の短期的な土砂移動方向を表すことが明らかになった。

礫の大きさや波浪の異なる他の海岸への適用性を検討するためには、UAV を活用した調査手法などさらなる研究が必要であるが、本研究により、礫の形状とインブリケーション構造は土砂移動方向を知るための良い指標と成り得ることが明らかとなり、世界中の海岸への適用可能性が期待される。

キーワード 礫浜, 最大礫, 扁平率, インブリケーション構造

Abstract

Field study on the physical properties of beach gravels and the relationship with sediment transport

Okamoto Takara

Coastal erosion is a serious problem worldwide, and measures such as detached breakwaters and headlands are being implemented together with soft countermeasures of beach nourishment. In order to develop effective erosion countermeasures, it is firstly necessary to understand the mechanisms of sediment transport on the beach. However, understanding the mechanisms of sediment transport is very difficult because the amount and the direction of sediment transport on beaches is complex and highly variable. Sediment transport in river is explained by unidirectional from upstream to downstream while sediment transport in nearshore zone is highly variable in the cross-shore direction as well as in the long-shore direction. Therefore, the objective of this study is to advance our understanding of complex sediment transport mechanisms through a detailed analysis of the coastal sediment characteristics.

This study was conducted stepwise by combining analyses with field measurements. The target area was selected to be the Kotogahama beach in Aki County, Kochi Prefecture, where there are few previous studies, and the sediment transport mechanism is not well understood. The 5 km Kotogahama beach was formed by sand and gravels supplied from the Wajiki River and the Akano River. A field measurement was conducted in July 2021 by using a UAV as a graduation study. Okamoto (2021) Orthographic mosaic images with spatial resolution of 1 cm were obtained by UAV. Alongshore distribution of maximum gravel size was found to decrease on the west side of the Wajiki River. Further measurements were conducted in this study in August and September 2022, focusing on the shape and the imbrication structure of the gravels. About 3,000 gravels were sampled, and length of three axes was measured for the shape of the gravels. Imbrication structures were recorded on a smartphone camera equipped with GNSS and compass. The gravel shape survey showed that the flattening rate of the gravels increased westward from the river mouth, reaffirming the long-term westward longshore transport of beach gravels as in the maximum gravel size survey. On the other hand, the imbrication structure of the gravels was strongly influenced by the direction of the

incoming wave caused by the precedent typhoon, representing the short-term migration characteristics of beach gravels.

This study has shown that the shape and imbrication structure of gravels can be a good indicator of the direction of sediment transport. The results are expected to be applicable to beaches around the world, but further study is needed to develop a UAV-based survey technique and to examine their applicability to other beaches with different gravel sizes and waves.

Key words gravel beach, maximum gravel size, flattening rate, imbrication structure

目次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 | 1 |
| 緒論 | 1 |
| 第 2 章 | 2 |
| 既往研究 | 2 |
| 2.1 漂砂に関する研究 | 2 |
| 2.2 礫の堆積構造に関する研究 | 2 |
| 第 3 章 | 5 |
| 現地調査 | 5 |
| 3.1 調査地の概要 | 5 |
| 3.2 現地調査 1 回目（岡本、2021、高知工科大学卒業研究） | 6 |
| 3.3 現地調査 2 回目 | 6 |
| 3.4 現地調査 3 回目 | 9 |
| 3.5 現地調査 4 回目 | 9 |
| 3.6 現地調査 5 回目 | 10 |
| 3.7 現地調査 6 回目 | 11 |
| 3.8 現地調査 7 回目 | 11 |
| 第 4 章 | 12 |
| 結果と考察 | 12 |
| 4.1 最大礫（岡本、2021、高知工科大学卒業研究） | 12 |
| 4.2 礫の扁平率 | 12 |
| 4.3 物部川河原のインブリケーション構造 | 13 |
| 4.3.1 結果 | 13 |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 4.3.2 考察..... | 14 |
| 4.4 琴ヶ浜のインブリケーション構造..... | 19 |
| 4.4.1 結果..... | 19 |
| 4.4.2 考察..... | 20 |
| 4.5 物部川河原のインブリケーションにおける法線マップ比較..... | 21 |
| 第5章 | 27 |
| 結論 | 27 |
| 5.1 結論..... | 27 |
| 5.2 今後の課題..... | 27 |
| 参考文献 | 28 |
| 謝辞 | 30 |

図目次

| | |
|--|----|
| 図 1 礫のオリエンテーション | 4 |
| 図 2 インブリケーション構造 | 4 |
| 図 3 高知県安芸郡琴ヶ浜..... | 5 |
| 図 4 物部川のインブリケーション構造..... | 7 |
| 図 5 琴ヶ浜のインブリケーション構造..... | 7 |
| 図 6 上から見たインブリケーション構造 | 8 |
| 図 7 横から見たインブリケーション構造 | 8 |
| 図 8 インブリケーション構造の調査方法 | 9 |
| 図 9 海岸の横断面のスケッチと礫の扁平率の測定 | 10 |
| 図 10 物部川..... | 11 |
| 図 11 最大礫の分布(上)と礫の扁平率(下) | 13 |
| 図 12 物部川河原のインブリケーション方向の分布 | 14 |
| 図 13 物部川の低水時・出水時の流れの方向 | 15 |
| 図 14 物部川戸板島地点の水位(水文水質データベース、2023) | 16 |
| 図 15 戸板島の河原地形 | 17 |
| 図 16 河原地形に重ねたインブリケーション構造(上)と滞筋の流向(下) | 18 |
| 図 17 琴ヶ浜のインブリケーション方向の分布..... | 19 |
| 図 18 有義波高と台風の進路..... | 20 |
| 図 19 オルソ画像全体(物部川)..... | 22 |
| 図 20 インブリケーションが明確に観察された領域 | 23 |
| 図 21 法線マップ | 24 |
| 図 22 $\nabla z(x,y)$ where $\Delta z(x,y) < 0$ | 25 |
| 図 23 目視によるインブリケーション方向(10月20日)..... | 26 |

第 1 章

緒論

世界中の海岸で、海浜砂礫が波によって削られて流出し、海岸線が後退する海岸侵食が起こっている。我が国の調査では、海岸侵食によって海岸部で失われる面積の合計は、1年間に1.6 km²にも及ぶと報告されている（国土交通省：海岸のすがた）。海岸侵食は、ダム建設による河川土砂の供給不足や港湾や突堤などの沿岸域構造物の建設による土砂移動の妨げなど、様々な理由によって進行する。効果的な侵食対策をするためには、沿岸域における土砂移動機構を理解することが不可欠である。しかし、海岸の土砂移動は、河川の土砂移動よりも複雑であり、土砂移動を理解することは非常に困難である。河川の流れは上流から下流への一方向であるため、土砂移動も一方向に限定されるが、海岸の波のもとでは、岸沖方向に往復運動するのに加えて、沿岸方向にも弱い流れが発達する。そのため、海岸の土砂は、波や地形条件によって、岸沖のどちらにも移動し、さらに沿岸方向の移動も加わるなど、時空間的に変動が激しい。これまでに数多くのモデルが開発されてきたが（例えば、八木ら、1985；宇多ら、1991 など）、海岸の土砂の動きと、その結果として生じる海岸の地形変化を予測する技術は不十分である。そこで、本研究では、海浜礫の特徴を詳細に分析することで、複雑な土砂移動機構の理解を進めることを目的とした。

海浜礫と漂砂の関係に関しては、砂礫の粒径が土砂の流れの方向に小さくなることが知られている（荒巻・鈴木、1962）。そのため、砂礫粒径の変化を追跡すれば、土砂の移動方向を推測することができる。本研究は、現地における実測を分析することで仮説を構築し、これを現地実測で検証することにより段階的に進めた。対象領域として、既往研究が少なく、土砂の移動機構が未解明な、高知県琴ヶ浜を選定した。琴ヶ浜は、和食川・赤野川の2つの河川からの流出土砂で形成されている。岡本（2021、卒業研究）の研究では、和食川放水路の西側で、沿岸土砂の移動方向に礫の大きさが減少することが示された。しかしながら、和食川の東側領域での土砂移動方向は不明瞭であったため、修士研究である本研究では、礫の形状とインブリケーション構造に焦点を当ててさらなる研究を実施した。

本稿は、本章を含めて5章で構成される。第2章では漂砂や礫の堆積構造に関する既往研究をレビューしたうえで、本研究の意義と位置づけについて述べる。第3章では現地調査について調査地の概要と調査方法を述べる。第4章では現地調査の結果と考察を述べる。第5章では結論を述べる。

第2章

既往研究

2.1 漂砂に関する研究

漂砂に関する研究は数多く行われてきた。例えば、宇多ら(1991)は、沿岸漂砂による海浜地形変化について、水理実験により、沿岸漂砂が汀線付近で卓越することを示した。また、八木ら(1985)は、波・流れに基づいて漂砂方向および砂移動形態の変化を明らかにした。原田ら(2015、2016)は、高精度MPS法とDEMによる碎波帯漂砂過程の数値シミュレーションおよび波打ち帯での漂砂過程の数値シミュレーションを実施し、波打ち帯の海浜変形計算において粒子に作用する浸透流の重要性を示唆した。吉河ら(2018)は土砂移動について粒径の違いを踏まえた現象解釈を数値計算により検証し、モデル検討・改良の新たな可能性を示した。

これらのように漂砂の研究に関しては、数々の水理実験や数値シミュレーションによる土砂移動の解明方法が開発されているが、海岸での土砂移動は多くの要因が作用するため、漂砂機構の理解は十分であるとは言えない。さらに、漂砂に関する研究では、その多くが砂を対象としたものであり、礫を扱った研究は極めて少ない。研究対象とした琴ヶ浜をはじめ、高知県には礫浜が多く、急勾配海岸や河口周辺海岸では、礫海浜が多く見られ、海岸侵食とその対策が重要な問題となっている。そこで、本研究は礫海浜に焦点を当てて、礫の物理特性と漂砂の関係に関する研究を行うこととした。

2.2 礫の堆積構造に関する研究

粒径が2mm以下の砂は、その主たる鉱物である石英や長石が、粒状に粉碎される特徴があることから、個々の粒子の形状はほぼ球形である。これに対して礫は、河川や海岸での移動とともに、摩耗により削られ、楕円体状であることが多い。したがって、水の流れにおける砂粒子の物理特性は、粒径のみで代表できるのに対して、礫の場合には、楕円体の長軸、中軸、短軸それぞれの走向や傾斜角に加え、粒子同士の配列構造も礫粒子の移動特性に強く影響することになる。そのため、礫の移動機構を考えるうえでは、礫の堆積構造を把握することが重要となり、堆積構造から逆に、直近の移動履歴を推定することも可能となる。

礫の堆積構造を表現する指標としては、オリエンテーションとインブリケーションが代表的に用いられる(例えば、山本ら、2018)。オリエンテーションは、長軸の走向や傾斜角であり、これらと流れの方向との関係が議論される(図1参照)。インブリケーション構造とは、長軸・中軸で形成される礫表面の最大傾斜角で表現され、水の流れにより扁平な礫が移動・堆積する場合に、流れの方向に傾斜してお互いに重なるようにして規則的に堆積する

構造である(図 2 参照)。しかし、インブリケーション構造に関する研究は河川で行ったものがほとんどであり、海岸で実施した研究は少ない。一般的にインブリケーション構造は河川の上流から下流に発達するものとして知られており、海岸での堆積構造は往復流となる波運動のもとで形成されるため、河川とは異なると考えられている。そのため、海岸での研究事例が少ない。礫のオリエンテーションやインブリケーション構造が土砂移動の方向を知るための指標になり得ることを示した既往研究としては、Hodge ら(2009)、青野ら(2009)、山本ら(2018)、藤井ら(2021)などが挙げられる。

Hodge ら(2009)は粒径が比較的に大きく、露出した礫が豊富な The River Feshie (Cairngorm Mountains, Scotland)と Bury Green Brook (near Bishop's Stortford, England)という 2 つの対照的な河川の露出した礫表面のデジタル地形モデルを、レーザースキャナーにより計測し、表面傾斜、アスペクト、粒径方位などを計算することによって約 2 mm の高精度の TLS (Terrestrial Laser Scanner) データを分析した。その結果、インブリケーション構造が流れの方向に傾斜していることに加え、礫の長軸が流れの方向と垂直になることを示した。

青野ら(2009)は、河床礫と海浜礫との比較を行うために、木曽川と長良川および礫浜である三重県南部の七里御浜において礫の長軸方向を観測した。木曽川と長良川では、いずれも見事なインブリケーション構造が見られ、礫の長軸方向(=オリエンテーション)は、主流の方向に直交していることが確認された。一方、海岸である七里御浜では、河川ではっきりと観測されるようなインブリケーションの発達は弱く、礫の長軸方向は、汀線に対して、若干斜交して配列していることが確認された。以上の結果から、青野らは、礫の長軸方向(=オリエンテーション)が卓越流向を推定する良い指標であることを示す一方で、河川の礫と比較して海浜の礫は、長軸の方位が安定して配列せず、またインブリケーション構造の発達が弱いことを示した。

山本ら(2018)は、礫のオリエンテーションとインブリケーションはどちらの指標が流向を推定する上で適しているのか調べるために、札内川の河床礫におけるオリエンテーションとインブリケーションの比較を行った。札内川の河床礫の流向に対する長径軸の方位は、直交型であり、130 個の礫の 46.2%を占めた。一方、礫の最大傾斜の方位は、平行型であり、130 個の礫の 65.4%を占めた。山本らは、この結果から礫のインブリケーションがオリエンテーションよりも流向の推定に好適であることを示した。

藤井ら(2021)は、九頭竜川河床礫のオリエンテーションやインブリケーションなどのファブリックの調査を通して、礫岩の古流向を復元するためにどのような調査をするのが適しているかを検討した。礫のオリエンテーションの調査では、礫の長径軸が基準となる流向 0° からどれだけ傾いているかを調べた。礫のインブリケーションの調査では、礫の最大傾斜の方向が基準となる流向 0° からどれだけ傾いているかを調べた。礫のオリエンテーションの結果では、礫の長径軸が、流向(基準 0°)に直交する方向から $\pm 30^{\circ}$ の範囲($60\sim 120^{\circ}$ 、 $240\sim 300^{\circ}$)に多く集中しており、礫の長径軸は流向に直交することが確認された。その割

合は 46.5% を占めていた。一方、礫のインブリケーションの結果では、礫の最大傾斜の方向は、流向(基準 0°) から $\pm 30^\circ$ の範囲 ($330\sim 30^\circ$ 、 $150\sim 210^\circ$) に多く集中しており、礫の最大傾斜の方向は流向に平行することが確認された。その割合は 60.8% を占めていた。以上の結果から藤井ら (2021) は、オリエンテーションもインブリケーションも流向を反映しているものの、インブリケーションの方がより集中度が高く、流向を推定するにはより良い指標となることを示した。

河川の堆積構造と海岸の堆積構造を比較した研究として、青野ら (2009) がある。青野ら (2009) は、木曾川と長良川における河床礫と三重県七里御浜における海浜礫においてインブリケーションの発達の確認と礫の長軸方向の調査を実施した。その結果、礫の長軸方向が流向を推定する良い指標であることを明らかにする一方で、河川の礫と比較して海浜の礫は、長軸の方位が安定して配列せず、またインブリケーション構造の発達が弱いことを明らかにした。しかし、海岸においては、ある 2 地点の $1\text{m}\times 1\text{m}$ の正方形内の 100 個の礫のみの観測にとどまっており、海岸における礫の堆積構造を広範囲に観測した研究は存在しない。

そこで、本研究では琴ヶ浜において礫の堆積構造を広範囲かつ詳細に分析し、粒径や形状など他の物理特性を含めて土砂移動の方向との関連を明らかにする。

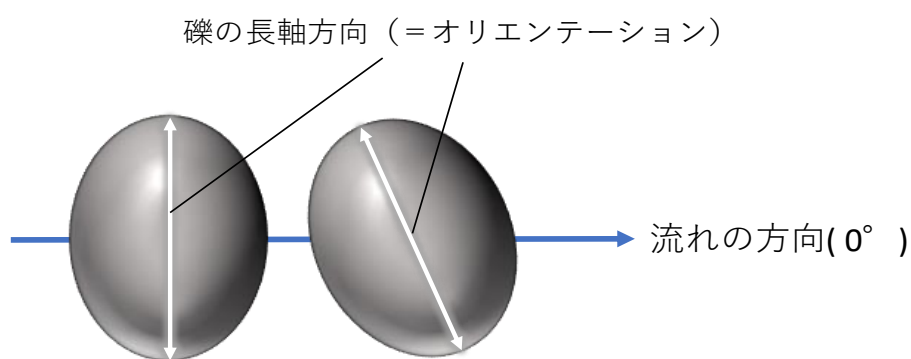


図 1 礫のオリエンテーション



図 2 インブリケーション構造

第3章

現地調査

3.1 調査地の概要

現地調査は高知県安芸郡琴ヶ浜で実施した。琴ヶ浜は東端と西端の2つの岬に囲まれたポケットビーチであり、太平洋に面した礫浜である(図3参照)。琴ヶ浜の形成過程は未解明だが、堆積物は和食川と赤野川の2つの河川から供給されている。和食川水系河川整備計画(平成28年12月)によると、和食川は、200年前までは浜の東端で赤野川に合流していたが、江戸時代の文化年間(1804~1817年)に農地の拡大などを目的として、琴ヶ浜の砂丘を掘削し、最短距離で海に注ぐよう進路を変更したと言われている。したがって、琴ヶ浜への土砂供給は、200年前より以前には、河口直前に合流した2つの河川により、東端のみから供給されていたが、最近の200年間では、西分と和食の境界付近に建設された和食川放水路からも供給されていると考えられる。



図3 高知県安芸郡琴ヶ浜

3.2 現地調査 1 回目（岡本、2021、高知工科大学卒業研究）

最初の現地調査は卒業研究時の 2021 年 7 月 28 日に実施した。RTK-GNSS を搭載した UAV(DJI Phantom4 RTK+D-RTK2)によって浜辺全域を記録し、5 kmの琴ヶ浜を西から東へ、西分、和食、赤野の 3つのエリアに分けた。RTK-UAV は 3つのエリアをそれぞれ高度 36m で自動飛行した。UAV により、海岸は地上画素寸法約 1 cmの高解像度画像で撮影された。約 1 時間の調査で合計 1,400 枚以上の画像が撮影された。撮影された画像は、SfM/MVS ソフトウェアの metashape-pro で処理し、オルソ画像を取得した。岡本(2021)は、これらの高精細画像を分析することにより、海浜における最大礫の分布と礫移動の卓越方向との関係性を解明している。

3.3 現地調査 2 回目

2 回目の現地調査は 2022 年 8 月 25 日に実施した。岡本(2021)の研究では、和食川西側の西分地域では最大礫の粒径が西に向けて徐々に小さくなっており、これが西向きの土砂移動を表しているものと考察されたが、和食川東側の和食、赤野地区では、最大礫の分布に明確な傾向は見られなかった。最大礫径以外の指標を検討するため、本修士研究で実施した 2 回目の調査では、インブリケーション構造に焦点を当てて調査を行った。

インブリケーション構造とは、一般に河川に多く見られる構造として知られており、水流により底面にある礫などが、流向を向く構造である。インブリケーション構造は、流体中における物体が、最小の抵抗を得ようとして形成される。そのため、河川などの水流が発生する場所では、水位が引いた後に礫の並びを見ると、上流側に傾斜した礫ばかりになる(図 4 参照)。海岸における礫の堆積構造は、流れが一方向である河川とは違い、離岸流や向岸流、沿岸流などのあらゆる方向に流れが発生するため、河川ほどの特徴的な構造は現れないとされていた。しかし、琴ヶ浜においても平らな礫が堆積した最大遡上線付近でインブリケーション構造が顕著であった(図 5)。インブリケーションの向きの計測方法では、まず、図 5 のような海岸に発達したインブリケーション構造を目視で確認する。次に、インブリケーション構造を図 6 のように上から見た構造と、図 7 のように横から見た構造で、礫の重なりと傾斜方向を確認する。この方法で、インブリケーションの正しい方向を目視によって定めている。現地調査では、図 3 に示すように西分の 4 箇所インブリケーションの方向を調査した。図 8 はインブリケーション構造の調査方法を示したものである。GPS と方位を備えたスマートフォンカメラで、発達したインブリケーション構造を目視で確認し、流れの方向に合わせて画像を撮影した。画像に記録された緯度、経度、方位からインブリケーションの方向を図で表した。2022 年 8 月 25 日の調査では全部で 196 枚の画像を撮影しインブリケーションの方向を分析した。



図 4 物部川のインブリケーション構造



図 5 琴ヶ浜のインブリケーション構造

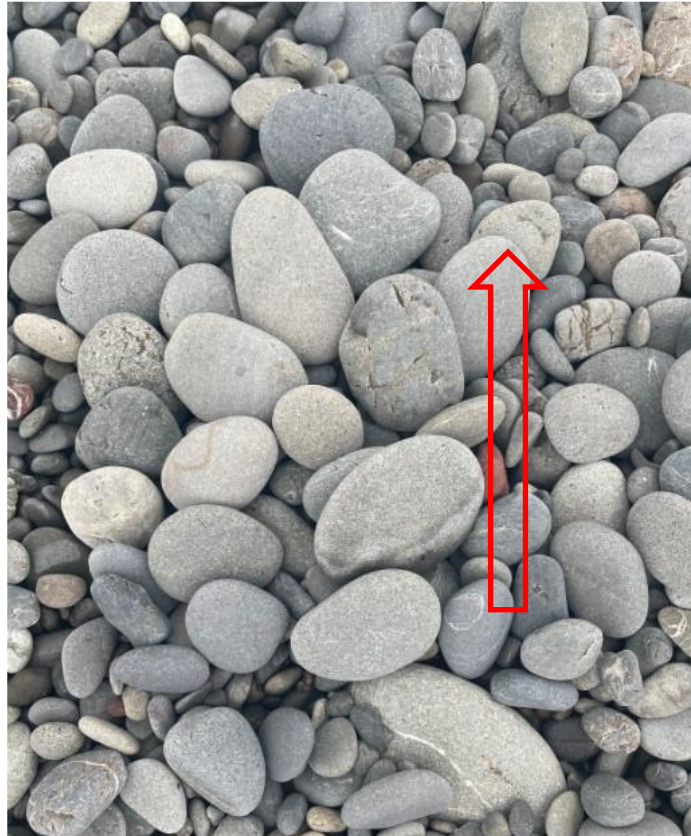


図 6 上から見たインブリケーション構造



図 7 横から見たインブリケーション構造



図 8 インブリケーション構造の調査方法

3.4 現地調査 3 回目

3 回目の現地調査は 2022 年 9 月 15 日に実施した。2 回目の現地調査の後に、2022 年台風 11 号が来襲したため、比較のため、2 回目と同様に最大遡上線付近でインブリケーションの方向を調査した。図 3 に示すように西分の西側を中心に調査した。西分 301 枚、和食 105 枚の計 406 枚の画像を撮影し、インブリケーションの方向を分析した。

3.5 現地調査 4 回目

4 回目の現地調査は 2022 年 10 月 22 日に実施した。礫の移動方向を推定するためのもう 1 つの指標として、ここでは、礫の形状に焦点を当てて調査を行った。琴ヶ浜の海岸地形は、海岸に平行なバームが形成されているのが特徴である。図 9 に示すように、海岸の岸沖断面は 2 つのバームによって特徴づけられる。海岸汀線から約 10m 離れた海側のバームは、潮汐による海面変動に伴う日々の遡上波によって形成されると考えられる。一方、陸側のバームは、高波の遡上によって形成されると考えられる。

礫形状の調査では、まず、礫の性質を調べるために、2 つのバームに沿って沿岸方向の線上で 100 個の礫をサンプリングした。サンプリングは、西分の西端から赤野の東端までの 15 地点で行った。地点間隔は約 400m で、合計約 3000 個の礫をサンプリングし、研究室で分析した。礫の形状分析では、長軸、中間軸、短軸の 3 軸の長さをノギスで測定した。そして、全ての礫の扁平率 f を以下の式で計算した：

$$f = (a - c) / a$$

ここで、 a は長軸の長さ、 c は短軸の長さを表している。

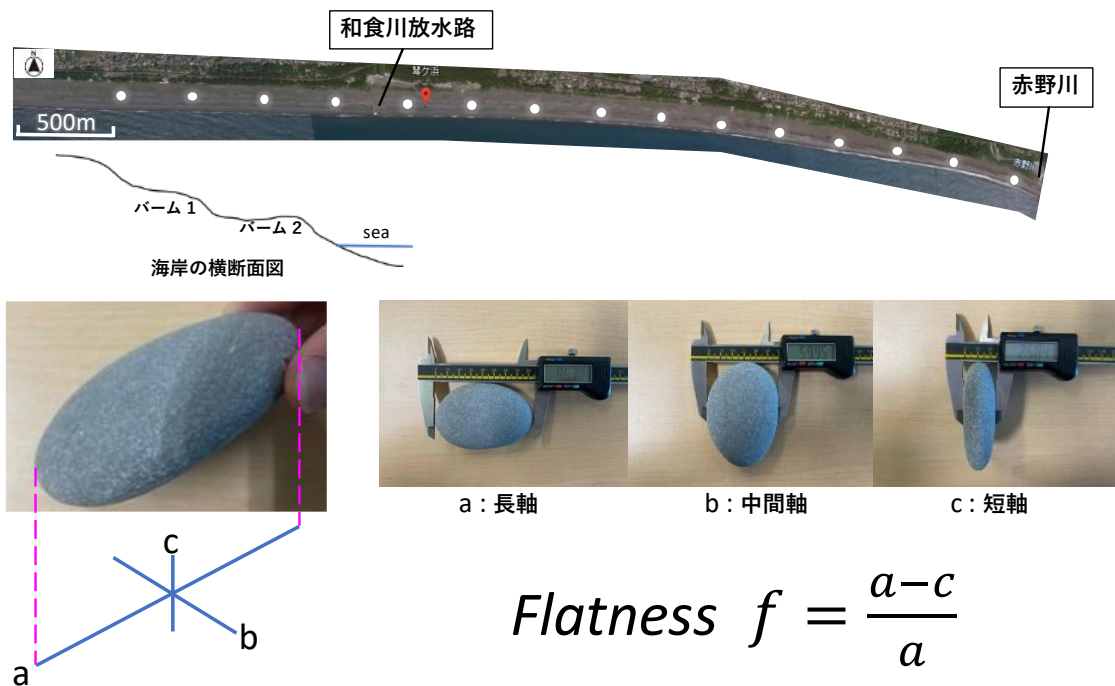


図 9 海岸の横断面のスケッチと礫の扁平率の測定

3.6 現地調査 5 回目

5 回目の現地調査は 2023 年 7 月 11 日に実施した。ここでは、河原の礫が海岸に比べて礫径が 10 倍以上大きく、インブリケーションの向きも判定しやすいことから、河原で実施した。河川のインブリケーション構造の調査は、戸板島の物部川の河原で実施した(図 10 参照)。河川の流れは、上流から下流に向かう一方向であるため、もともとインブリケーション構造は河川に見られる構造として知られている。物部川においても、琴ヶ浜と同様の方法でインブリケーションの向きを調べた。合計 414 枚の画像を撮影し、インブリケーションの方向を分析した。



図 10 物部川

3.7 現地調査 6 回目

6 回目の現地調査は 2023 年 10 月 13 日に実施した。これまでに実施したインブリケーションの調査では、目視での方向判定を個別に行う方法であることから、広範囲における観測が困難であったため、ここでは、広範囲を効率的に観測できる手法として UAV による観測を検討した。UAV 調査では、礫表面の反射光特性から、礫の傾斜角推定を検討する。調査は、海岸での調査へと展開していくことを前提に、まずは 5 回目と同じインブリケーション構造が明確に観察される戸板島の物部川の河原(図 10)で実施した。解像度 2.5 cm 程度の DEM を用いて地形標高 $z(x,y)$ の勾配を算出し、法線マップを作製した。さらに、標高のラプラシアン $\nabla^2 z(x,y)$ を計算し、礫表面(=上に凸な面)のみ法線マップの色を付けた。その中でも特にインブリケーションが明確に観察された約 20m 四方の領域に焦点を当て、目視での調査との比較を行った。

3.8 現地調査 7 回目

7 回目の現地調査は 2023 年 10 月 20 日に実施した。ここでは、河原のインブリケーションは海岸と違って、変化が少ないものと思われたため、詳細計測して 7 月のインブリケーション構造と比較することを検討した。また、6 回目の UAV 調査と目視での調査との比較も検討した。調査は、戸板島の物部川の河原(図 10)で 5 回目と同様に実施した。合計 315 枚の画像を撮影し、インブリケーションの方向を分析した。

第 4 章

結果と考察

4.1 最大礫（岡本、2021、高知工科大学卒業研究）

図 11 は、5m×5m のグリッド内における最大礫の大きさの分布を示している。マーク記号の大きさは礫の大きさを表している。また、赤色記号は岸沖方向の測線上での最大礫の位置と大きさを表している。大きな礫は海岸線から約 50m の狭い範囲に集中しており、高波の遡上境界に対応しているものと考えられる。図 11 の下部に、岸沖方向の最大礫径の沿岸方向分布を実線でプロットした。これを見ると、西分では最大礫の大きさが西に向かって減少していることが確認できる。この減少傾向は、土砂の沿岸移動方向を表していると考えられる。一方、和食川放水路の東側では、赤野川河口付近のわずかな減少傾向を除き、明確な傾向は見られなかった。

4.2 礫の扁平率

修士研究として実施した調査で得られた、礫の扁平率の沿岸分布を図 11 の下部に示す。これを見ると、礫の扁平率の変化は最大礫の傾向と一致していることが確認できる。西分では、西に向かうにつれて礫の扁平率が高くなることが確認された。これは波による摩耗作用によるものと考えられる。すなわち、河川から供給された礫は、波浪の往復運動によって徐々に摩耗され、扁平な形状となりながら沿岸方向に輸送されるため、遠方まで到達した礫ほど扁平率が大きくなるものと推定される。礫の扁平率と最大礫の類似性は、両方の指標が、数十年スケールの長期的な土砂移動方向を表していることが考えられる。

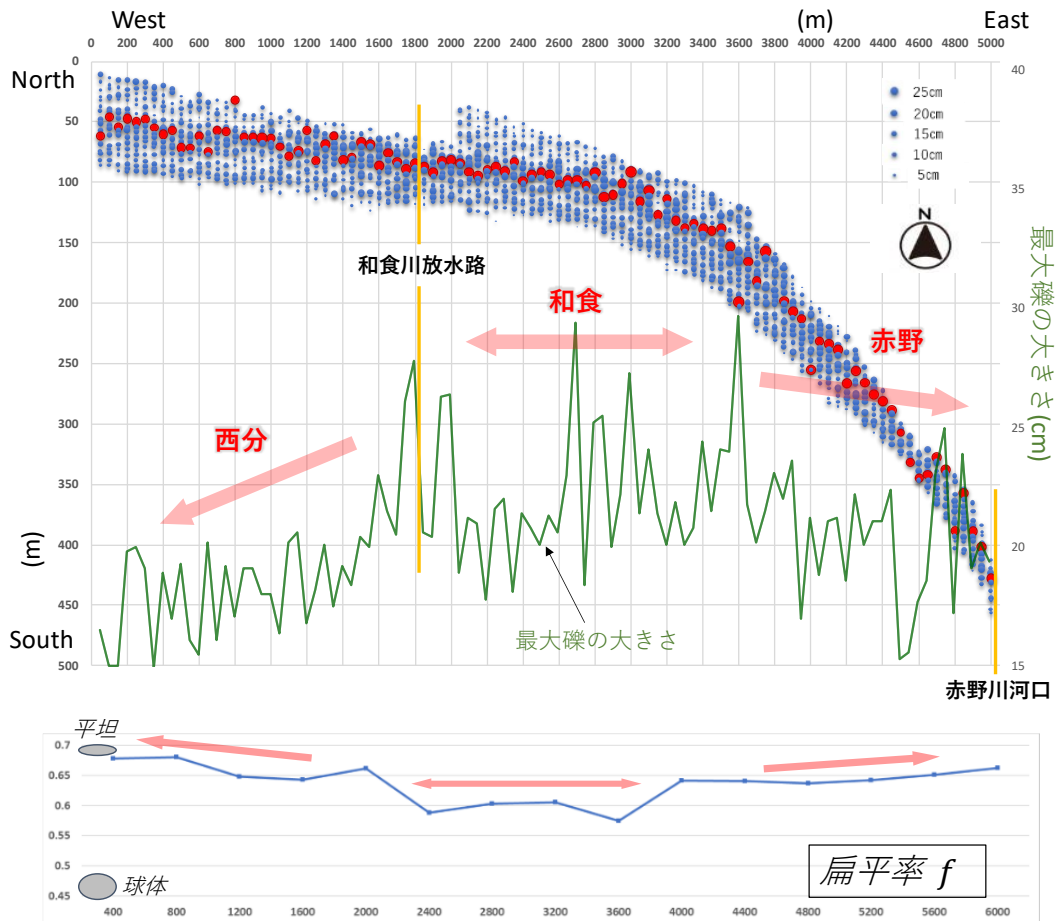


図 11 最大礫の分布(上)と礫の扁平率(下)

4.3 物部川河原のインブリケーション構造

4.3.1 結果

図 12 は、2023 年 7 月 11 日と 2023 年 10 月 20 日に調査したインブリケーションの方向を示している。これを見ると、7 月も 10 月もインブリケーションの方向は上流から下流に向いていることが確認できる。これは、河川の流れが上流から下流への一方向に限定されるためである。さらに細かく分析を進めると、7 月、10 月共に赤矢印と青矢印の方向のインブリケーションが存在することが確認できる。しかし、10 月には青矢印の数が減少している。また、図 12 の橙色枠の地域を比較すると、 $X=18,187.5\text{m}$ の西側で 7 月は南向きであるのに対し、10 月は西向きであることが確認できる。

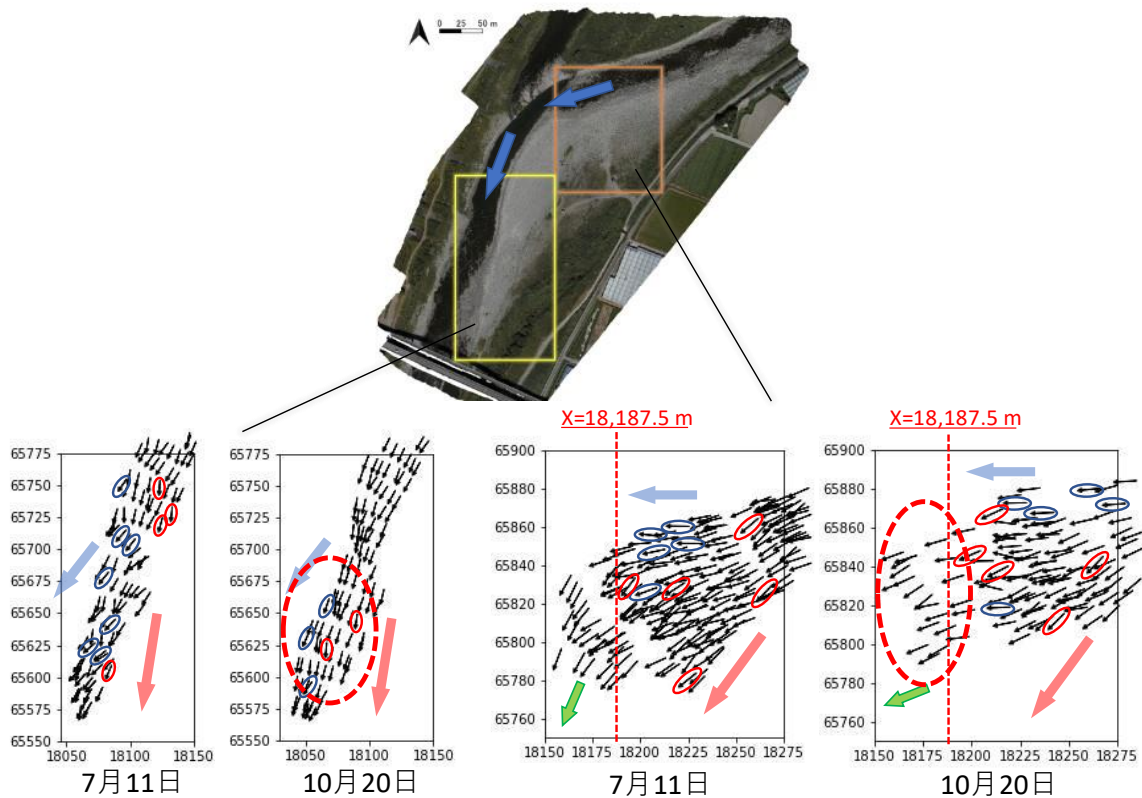


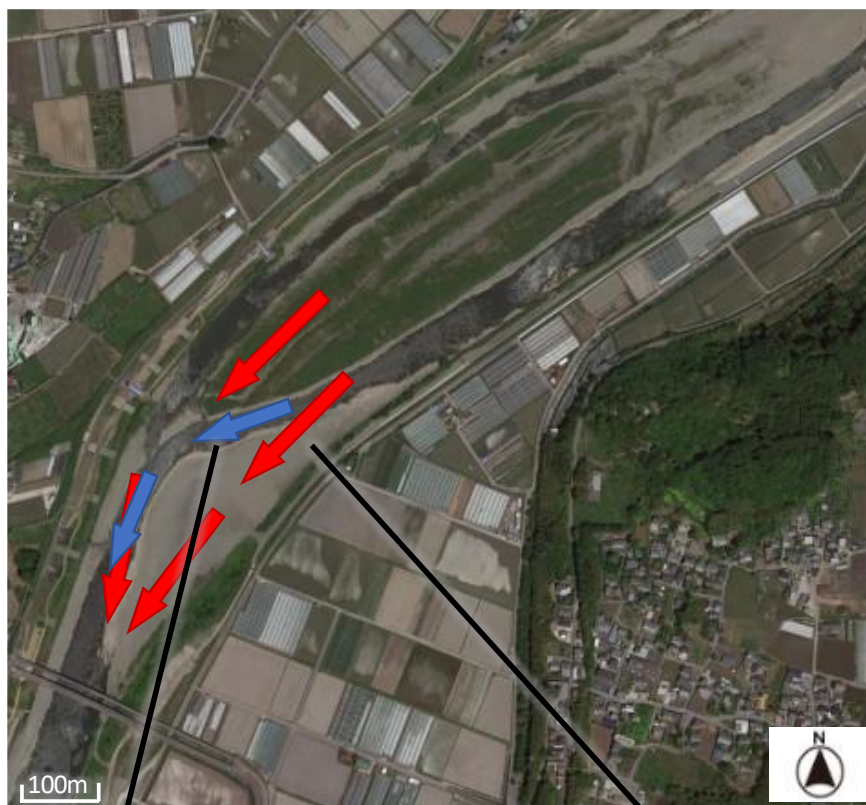
図 12 物部川河原のインブリケーション方向の分布

4.3.2 考察

物部川の河原でインブリケーション構造が赤矢印と青矢印の2方向が観察された理由と、7月と10月でインブリケーションの方向が変化した理由について考察する。まず、図13で赤矢印は出水時の河川の流れを示し、青矢印は河川の滞筋に沿った流れを示している。つまり、物部川でのインブリケーション構造は出水時の流れと低水時の滞筋に沿った流れが混在したために形成されることが考えられる。このことから、河川のインブリケーション構造の詳細は、低水・高水時の河原の流れの状態を表していることが考えられる。次に、7月と10月のインブリケーションの変化の理由を考察する。

図14は2023年7月から10月までの土佐山田町戸板島での物部川の水位を示している(水文水質データベース)。水位計零点高は、TP=20mである。これを見ると、7月の観測日の1カ月後に台風7号が来襲し、水位が一気に上昇していることが確認できる。この時の最高水位が2.34mであり、10月の観測日までに2.34mの水位を超えることがなかったことから、10月のインブリケーション構造は台風7号によって形成されたインブリケーション構造であることが考えられる。したがって、7月と10月のインブリケーションの変化は、台風7号による水位の上昇によって引き起こされたものと考えられる。

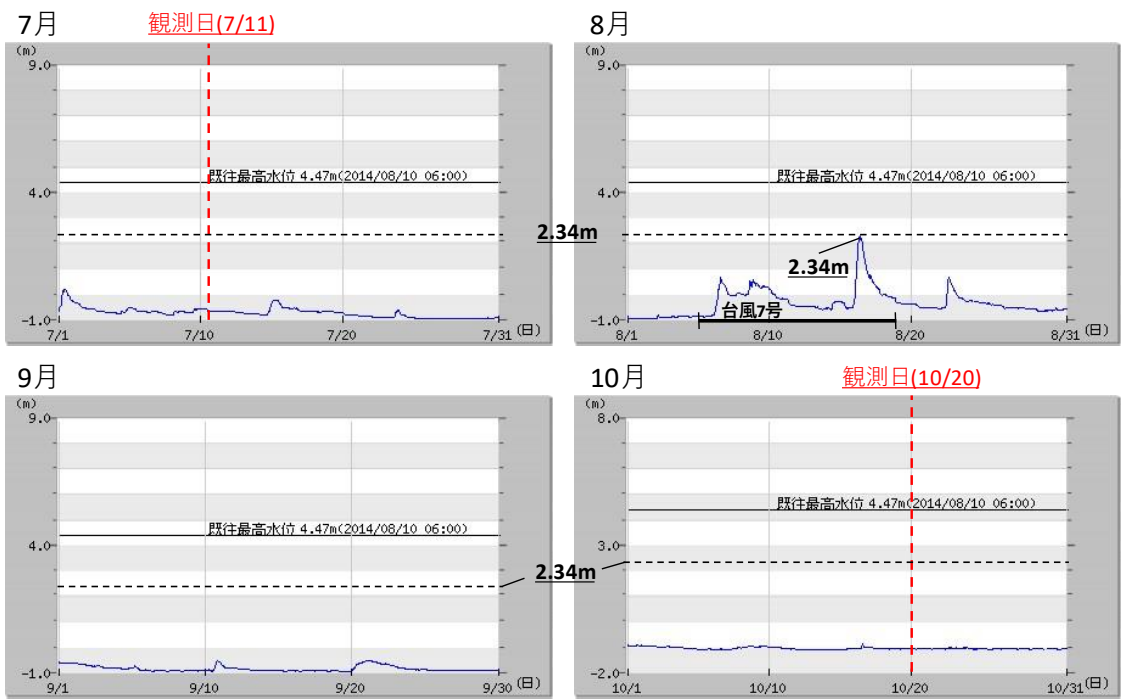
図 15 は戸板島の河原の地形（標高）を示している。さらに、図 16 の上部は戸板島の河原地形（標高）に 10 月のインブリケーションの方向を重ねた図である。河川の低水時水位を代表していると思われる等高線を図 15 の 0m 付近であると仮定すると、台風 7 号による最高水位が 2.34m であったことから、河原は図 15 の 2~3m の間まで水没したことが推測できる。また、台風 7 号による出水は中規模のものであったため、河原の高い標高の領域まで水没するものではなく、標高が比較的低い領域のみが水没したものと考えられる。したがって、図 13 で示した青色の流れが発達したものと思われ、河原の北側では、西向きの流れにより西向きのインブリケーション領域が拡大し、河原の南側では、右岸に衝突して流れを南向きに変えた強い流れの影響で、インブリケーションの向きが南向きに揃ったものと推定される（図 16 の下部参照）。このように、河床地形や滞筋流路とインブリケーションの関係を詳細に分析することで、河川においても複雑な出水時の流れの構造を解明することが可能である。



低水時の滞筋に沿った流れ

出水時の流れ

図 13 物部川の低水時・出水時の流れの方向



水位計零点高のTP=20m

図 14 物部川戸板島地点の水位(水文水質データベース、2023)

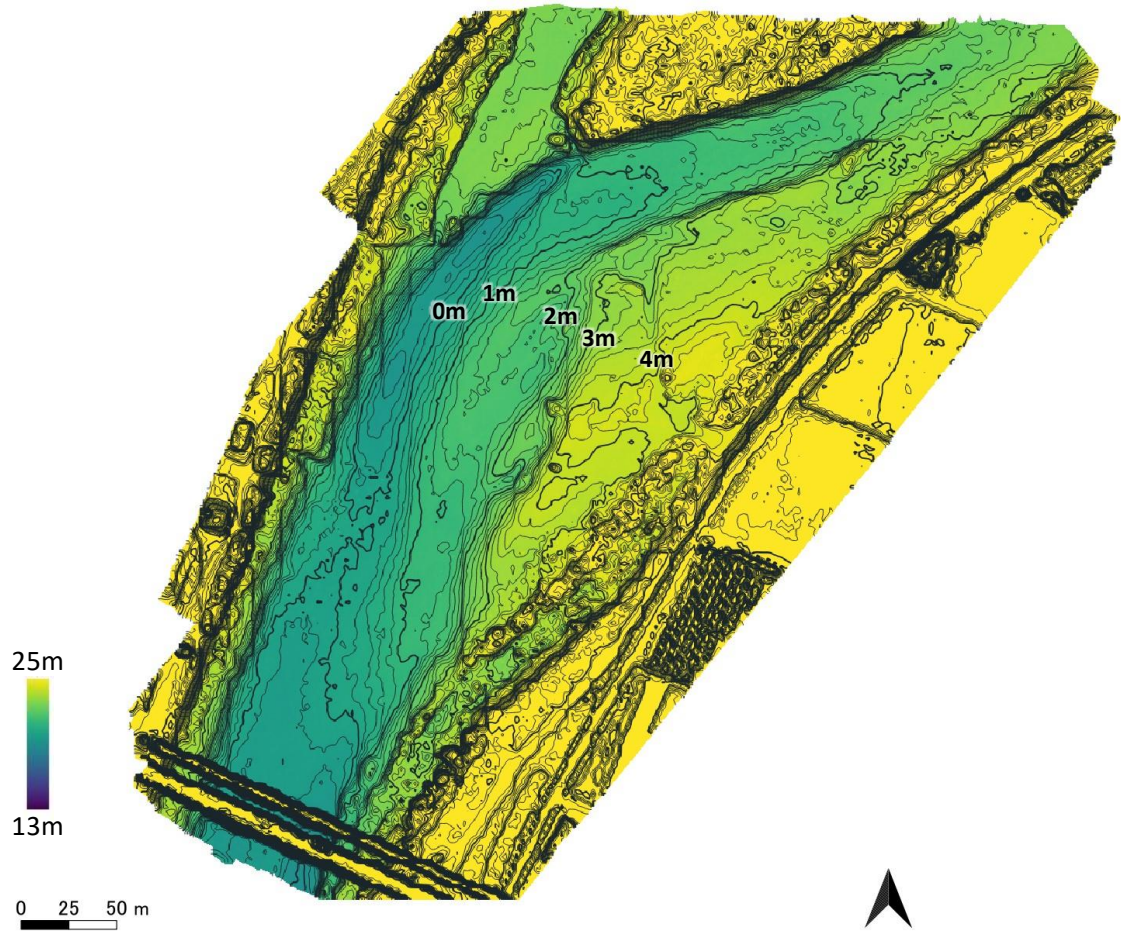


図 15 戸板島の河原地形

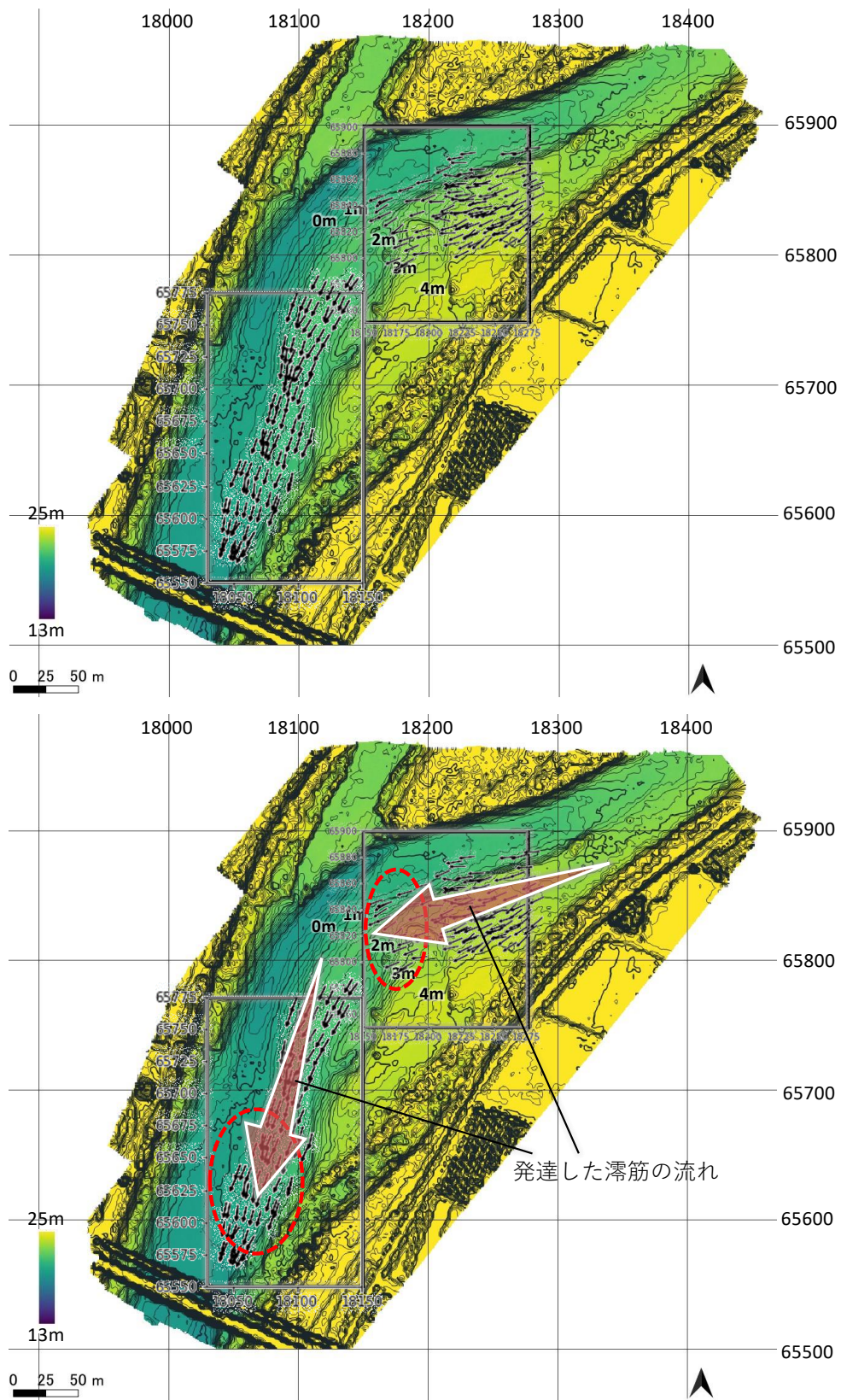


図 16 河原地形に重ねたインブリケーション構造 (上) と滞筋の流向 (下)

4.4 琴ヶ浜のインブリケーション構造

4.4.1 結果

図 17 は、2022 年 8 月 25 日と 2022 年 9 月 15 日に調査したインブリケーションの方向を示している。これを見ると、8 月のインブリケーションの方向はほとんどが西向きであることが確認できる。一方、9 月のインブリケーションの方向はほとんどが東向きであり、8 月とは反対の変化を示した。また、9 月のインブリケーション構造は $Y=57,350\text{m}$ 上に形成されており(図 17 の赤線)、8 月のインブリケーション構造よりもさらに岸側で形成されていることが確認できる。さらに、海側方向のインブリケーションがわずかに存在することも確認できる。これは、弱い引き波の影響によるものだと考えられる。しかし、多くのインブリケーション構造が岸方向であることから、海岸でのインブリケーション構造は、引き波よりも強い寄せ波の影響を受けて形成されることが考えられる。

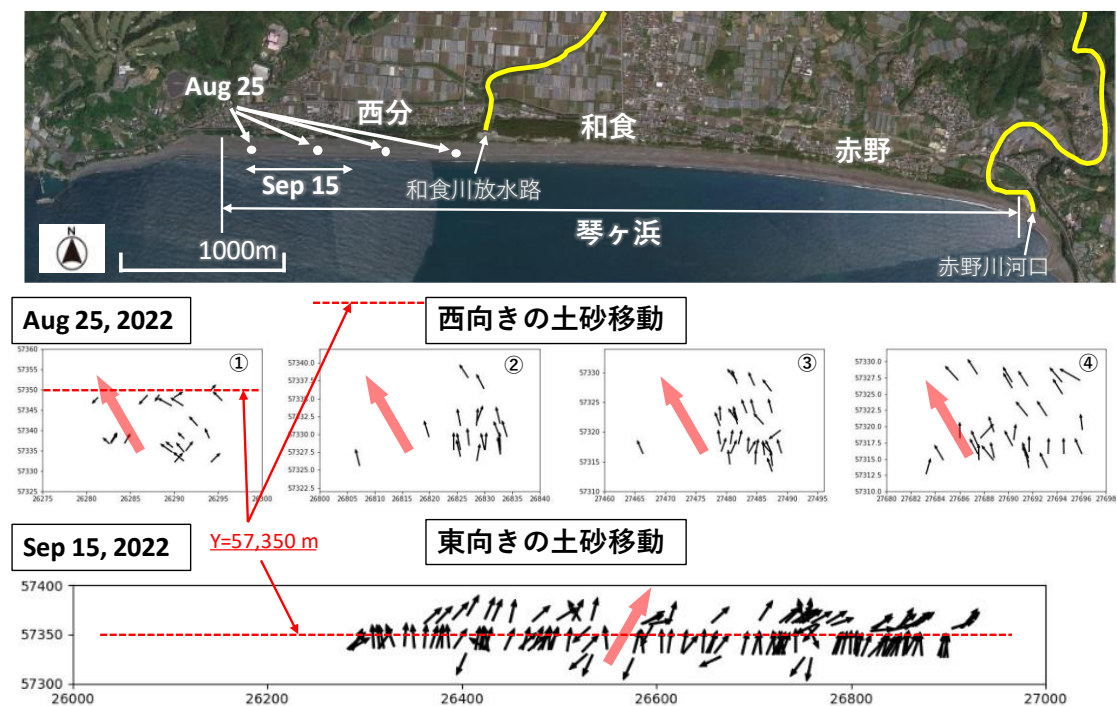


図 17 琴ヶ浜のインブリケーション方向の分布

4.4.2 考察

琴ヶ浜において、8月と9月でインブリケーションの方向が変化した理由について考察する。図 18 は有義波高と台風の進路を示している。これを見ると、8月に接近した 2022 年台風 8 号では、東からの高波が発生し、9月に接近した 2022 年台風 11 号では西からの高波が発生したことが確認できる。よって、入射波の波向きで規定される沿岸方向の土砂移動は台風 8 号では西方向であるのに対し、台風 11 号では東方向であったと考えられる。ここで、8月 25 日に調査したインブリケーションの方向が西向きに卓越したことから、台風 8 号の影響を受けたことが考えられる。対照的に、9月 15 日に調査したインブリケーションの方向は東向きに卓越したことから、台風 11 号の影響を受けたことが考えられる。また、9月 15 日に調査したインブリケーション構造は Y=57,350m 上に形成されており(図 17 の赤線)、8月 25 日のインブリケーション構造の形成ラインよりも 20~30m 岸側に形成されている。これは、台風 11 号の最大有義波高が台風 8 号の 2 倍であったことから、8月 25 日に調査したインブリケーション構造が台風 11 号によって流されたことを示唆している。また、インブリケーションの方向と直前の高波の入射方向が一致していることから、インブリケーション構造から、直前の高波浪による土砂の移動方向を推測することができることが明らかになった。礫の大きさと形状が長期的な土砂の移動方向を表すのとは対照的に、インブリケーション構造は短期的な土砂の移動方向を表すことが明らかになった。

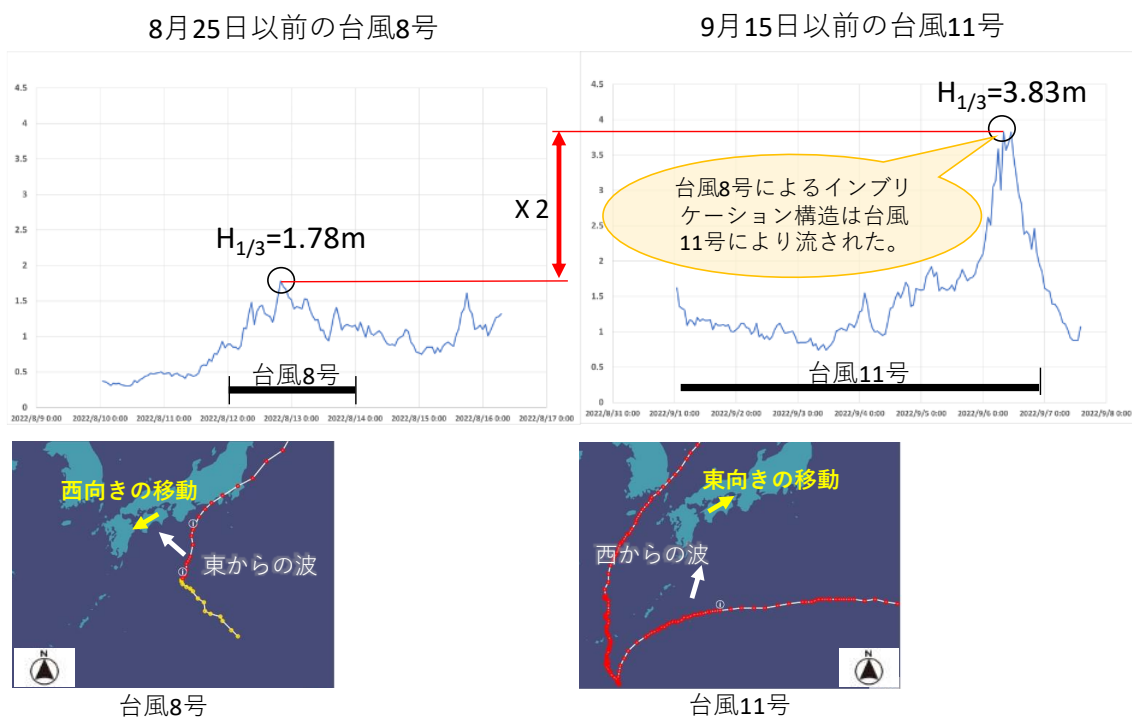


図 18 有義波高と台風の進路

4.5 物部川河原のインブリケーションにおける法線マップ比較

図 19 は 10 月 13 日に実施した UAV 調査により得られたオルソ画像であり、図 20 はインブリケーションが明確に観察された 22.6m 四方の領域を抽出したものである。図 21 は 22.6m 四方の領域において、左から作製した法線マップ $\nabla z(x,y)$ 、ラプラシアン $\Delta z(x,y)$ が負となる領域のみの法線マップ、オルソ画像の順に示している。図 22 は図 21 においてラプラシアン解析のみ抜粋したものであり、右上方向に傾いた面は赤、左下方向に傾いた面は緑を示す。図 23 は目視により行った 22.6m 四方の領域のインブリケーションの方向である。図 22 を見ると、赤色が卓越していることから、礫面の傾斜法線は北東向きが卓越していることがわかる。したがって、インブリケーションの向きは南西向きである。一方、図 23 においても目視観測で確認されたインブリケーションの向きは南西向きであり、ラプラシアンと法線マップを組み合わせた解析と一致することが確認された。すなわち、礫の粒径に比べて十分に小さい解像度で DEM を作成すれば、凸面の傾斜方向解析により、インブリケーションの向きを判定できることになり、広域の河原や海岸でのインブリケーション分布の調査が大幅に効率化できることが期待できる。

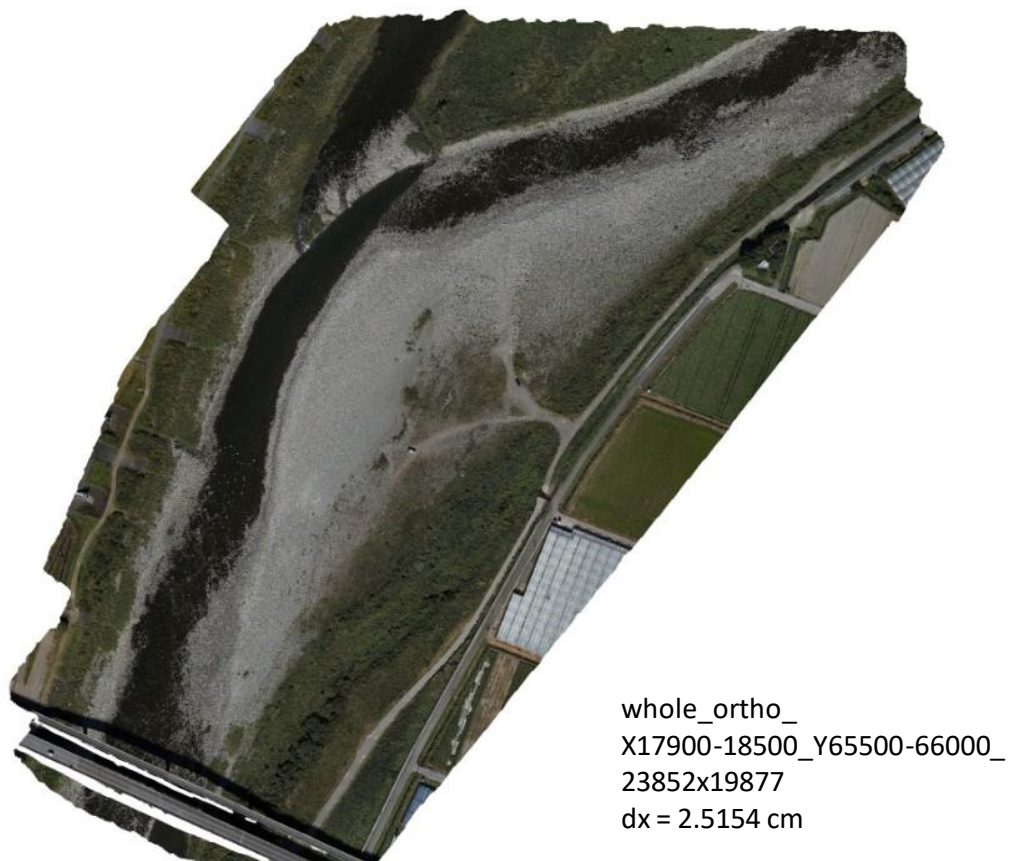


図 19 オルソ画像全体(物部川)



図 20 インブリケーションが明確に観察された領域

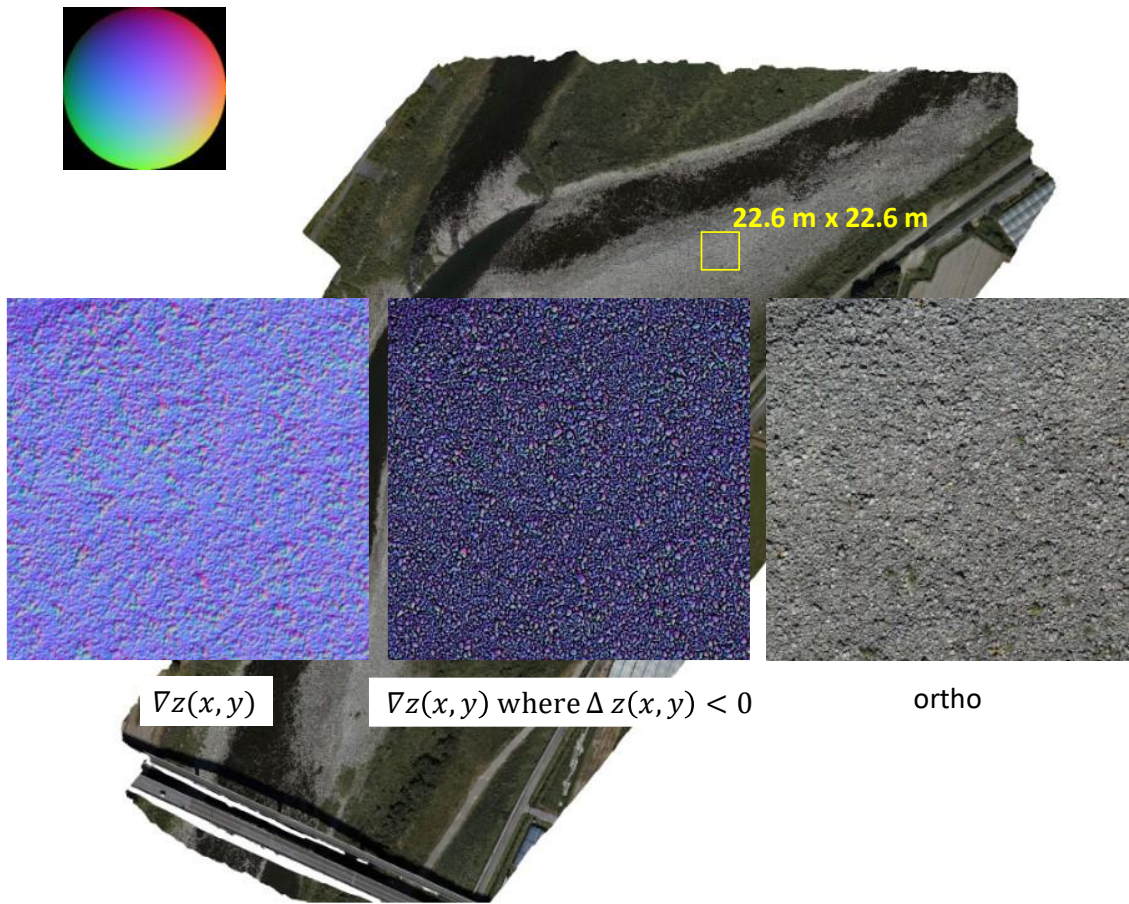


図 21 法線マップ

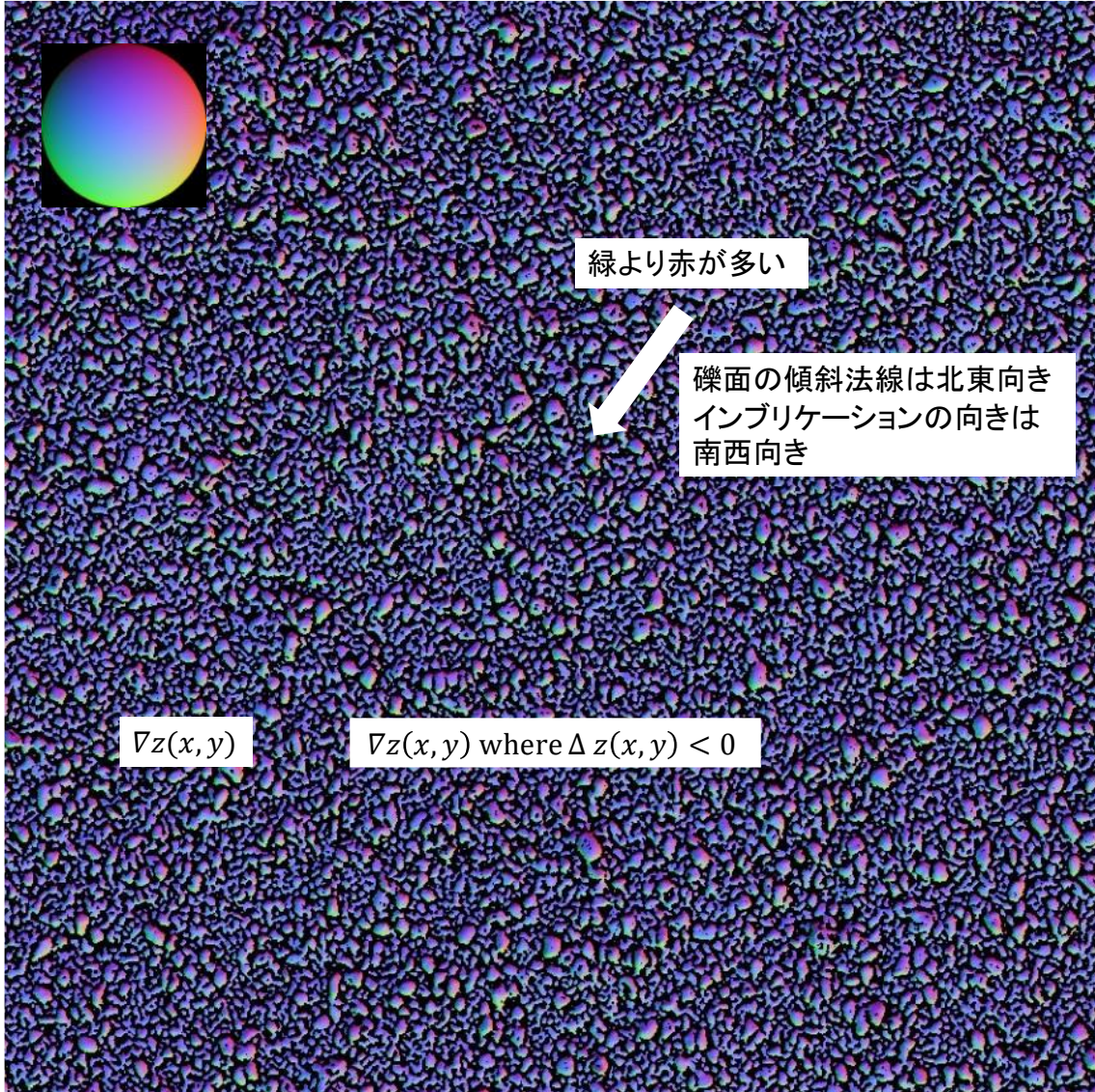


図 22 $\nabla z(x, y)$ where $\Delta z(x, y) < 0$

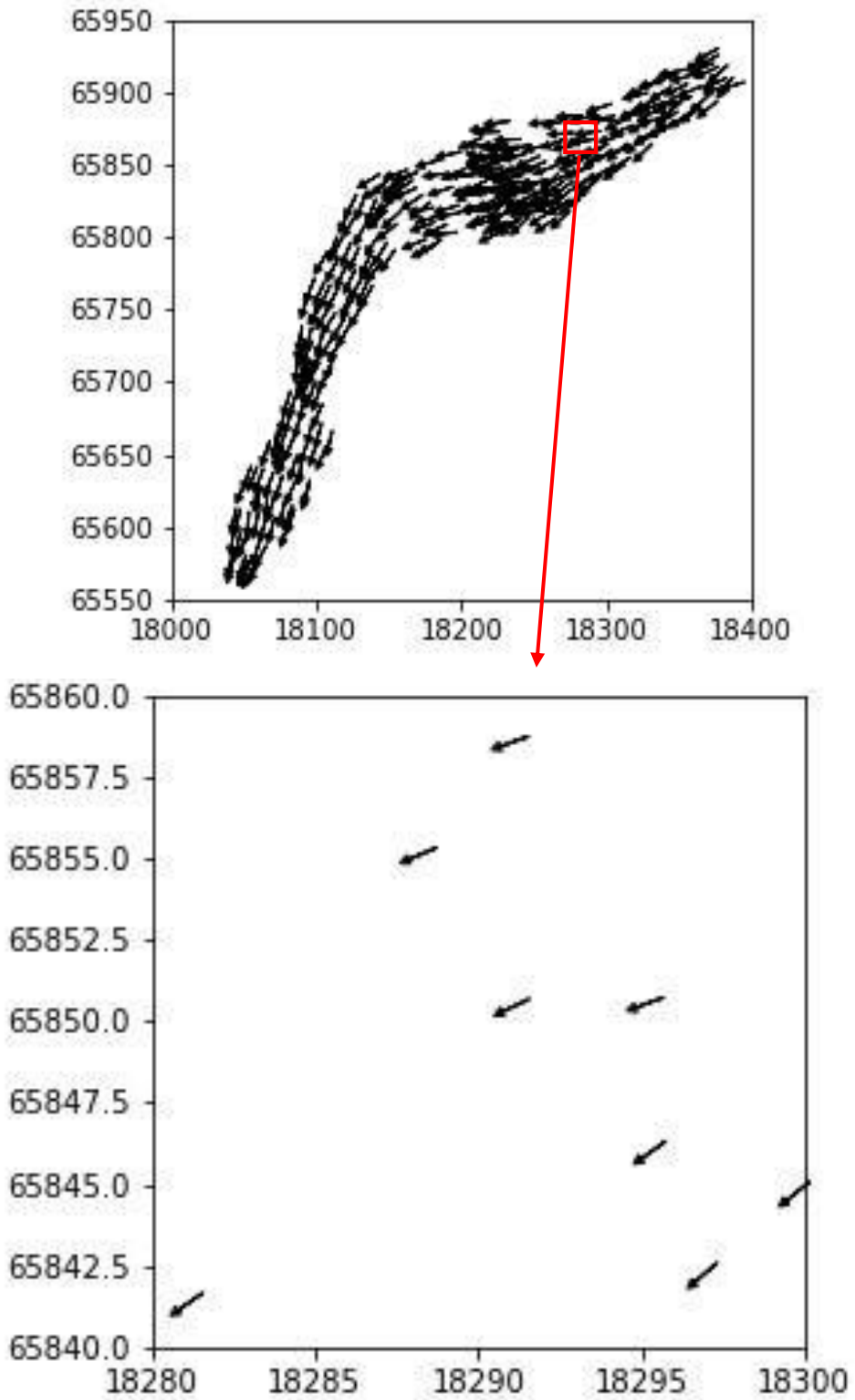


図 23 目視によるインブリエーション方向(10月20日)

第5章

結論

5.1 結論

本研究では、海岸での土砂移動機構を解明するために、高知県琴ヶ浜で現地調査を行った。主な結論は次のとおりである：

- (1) 最大礫の大きさと礫の扁平率は、長期的な土砂の移動方向を示す指標と考えられる。琴ヶ浜の西側では、最大礫の大きさの減少と礫の扁平率の増加が西方向の沿岸輸送を表していると考えられる。
- (2) 礫のインブリケーション構造は、河原では流れの方向に全域にわたって確認された。河原のインブリケーションの向きは、上流から下流に向かう向きで変化は少ないが、局所的には直前の出水の影響を受けて再配置される。
- (3) 海岸でのインブリケーション構造は、河川に比べて相対的には不明瞭であるが、直前の高波の最大遡上線付近に、沿岸方向に連なる形で、明確なインブリケーションが確認された。インブリケーションの方向は、直前の台風による高波の入射方向に応じて変化することから、短期的な土砂の移動方向を表していることが明らかとなった。最大遡上線より海側の領域でもインブリケーション構造は部分的に確認され、その向きは波向き方向でかつ岸向きであった。引き波に比べて寄せ波の方が強い流速となる、非対称な遡上波運動を反映するものと考えられる。
- (4) UAV 調査で礫の粒径に比べて十分に小さい解像度で DEM を作成すれば、凸面の傾斜方向解析により、インブリケーションの向きを判定できる。これにより、広域の河原や海岸でのインブリケーション分布の調査が大幅に効率化できる。

5.2 今後の課題

本研究により、礫の形状とインブリケーション構造は土砂移動方向を知るための良い指標と成り得ることが明らかとなった。この成果は、世界中の海岸への適用可能性が期待されるが、礫の大きさや波浪の異なる他の海岸への適用性を検討するためには、さらなる研究が必要である。

参考文献

- [1] 岡本宝 (2021) : ポケットビーチにおける海浜底質特性の分析, 高知工科大学卒業研究.
- [2] 国土交通省 : 海岸のすがた,
https://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/kaigandukuri/sugata_index.html
- [3] 荒巻孚, 鈴木隆介 (1962) : 海浜堆積物の分布傾向からみた相模湾の漂砂について, 地理学評論, 35 巻 1 号 p17-34
- [4] 宇多高明, 山本幸次, 河野茂樹 (1991) : 沿岸漂砂による 3 次元海浜地形変化の予測法, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp.386-390.
- [5] 八木宏, 小川由信, 首藤伸夫 (1985) : 波・流れ共存場における漂砂機構に関する実験, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.293-296.
- [6] 原田英治, 五十里洋行, 後藤仁志, 菅原康之, 松藤慶之 (2015) : MPS-DEM による波打ち帯での漂砂過程の数値シミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 71 巻, pp.487-492.
- [7] 原田英治, 五十里洋行, 後藤仁志, 居村光孝, 清水裕真 (2016) : 高精度 MPS 法と DEM による碎波帯漂砂過程の数値シミュレーション, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 72 巻, pp.583-588.
- [8] 吉河秀郎, 菅原大助, 後藤和久, 佐藤晃, 金松敏也, 阪口秀 (2018) : 仙台湾南部における 3.11 津波に伴う沖向き土砂移動の数値シミュレーションによる検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 74 巻, pp.337-342.
- [9] 青野宏美 (2009) : 河床礫と海浜礫の長軸方向の定向配列, 岐阜聖徳学園大学紀要, 教育学部編, no. 48, 1-15.
- [10] 山本憲志郎 (2018) : 札内川の河床礫におけるオリエンテーションとインブ리케이션との比較, 中央学院大学人間・自然論叢, no. 45, 3-17.
- [11] 藤井純子, 中川登美雄, 白崙文乃, 八十川竜馬 (2021) : 福井県九頭竜川の河床礫のフアブリック, 福井大学地域環境研究教育センター研究紀要, 日本海地域の自然と環境,

No.28, 69-80.

[12] Hodge, R., J. Brasington, K. Richards (2009): Analysing laser-scanned digital terrain models of gravel bed surfaces: linking morphology to sediment transport processes and hydraulics, *Sedimentology*, Volume56, Issue7, p.2024-2043

[13] 和食川水系河川整備計画 (2016) : <https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/170901/kasen-keikaku-housinkeikaku.html>

[14] 国土交通省 水文水質データベース：川の防災情報, <http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SiteInfo.exe?ID=308051288808010>

謝辞

本論分の執筆にあたり、多くの方々に支えられ、助けられました。心からの感謝の気持ちを述べさせていただきます。

まず、指導教員である佐藤慎司先生（高知工科大学教授）に深い感謝の意を表します。佐藤先生が私の指導教員であられなかった場合、私の論文完成及び卒業は叶わなかったと思います。先生の専門的な知識、熱心な指導、そして精神面での温かいサポートが、私の研究と成長を支えてくださりました。特に、困難な瞬間には先生の言葉とお心遣いが、私を前に進ませる原動力となりました。心より感謝申し上げます。

研究室のメンバーの皆様にも感謝の意を表します。研究を進める中で、皆さんとのコミュニケーションが何よりも重要でした。研究の合間に行われた軽い会話や、困難な課題にともに取り組む姿勢は私の研究生活を豊かなものにしました。心より感謝申し上げます。

そして、私の家族や友人に心から感謝の意を表します。彼らの絶え間ないサポートと励ましによって、研究の過程での困難な時期も乗り越えることができました。

この場を借りて、関係者の皆様にも心よりの感謝を申し上げます。