



Title	高波浪時における海岸堤防前面の三次元的な地形変化に関する研究
Author(s)	田方, 俊輔
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15184号
Issue Date	2022-09-26
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/doctoral.k15184">https://doi.org/10.14943/doctoral.k15184</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/87209">https://hdl.handle.net/2115/87209</a>
Type	doctoral thesis
File Information	Shunsuke_Tagata.pdf



令和4年度 博士論文

高波浪時における海岸堤防前面の  
三次元的な地形変化に関する研究

Study on Three-Dimensional Topographic Changes in Front of  
Coastal Embankment During High Waves.

令和4年8月

北海道大学 大学院工学院 環境フィールド工学専攻

田方 俊輔

TAGATA Shunsuke

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景	1
1.2 既往研究	2
1.2.1 高波浪時における遡上域の土砂動態に関する研究	2
1.2.2 堤防際における局所洗掘に関する研究	10
1.3 本研究の目的	13
1.4 本研究の構成	14
<b>第2章 現地観測システムの検討</b>	<b>19</b>
2.1 本章の概要	19
2.2 現地観測の位置づけ	20
2.3 観測フィールドの選定	20
2.3.1 駿河海岸の概要	20
2.3.2 観測位置の選定	21
2.4 観測機器の選定	23
2.4.1 水位計（変位計）	23
2.4.2 データロガー	23
2.4.3 遠赤外線カメラ	24
2.5 超音波式水位計の設置角に関する室内実験	26
2.5.1 コンクリート床面に対する予備実験	26
2.5.2 室内造波水路による観測実験	28
2.5.3 実験結果のまとめ	32
2.6 現地観測システムの検討	32
2.7 観測期間と波の観測状況	33
2.7.1 観測期間と検討対象期間の設定	33
2.7.2 データの欠測状況	34
2.8 ノイズ除去手法の検討	34
2.8.1 ノイズ発生要因の検討	35
2.8.2 ノイズ除去手法の検討	36
2.9 本章のまとめ	38

<b>第 3 章</b>	<b>令和元年東日本台風の概要と遡上波の特性</b>	<b>40</b>
3.1	本章の概要	40
3.2	台風の概要	41
3.3	遡上波の特性	45
3.3.1	打上げ高の算定	45
3.3.2	遡上波の挙動	49
3.4	本章のまとめ	54
Appendix	遠赤外線カメラによる遡上波の算定	57
<b>第 4 章</b>	<b>高波浪時における堤防前面の地形変化過程</b>	<b>77</b>
4.1	本章の概要	77
4.2	台風前後の現地状況	78
4.3	砂面高の算定	81
4.4	三次元的な地形変化の進行過程	83
4.4.1	砂面の時間変化	83
4.4.2	砂面の空間変化	85
4.5	本章のまとめ	86
<b>第 5 章</b>	<b>三次元的な地形変化と波，流れの関係</b>	<b>88</b>
5.1	本章の概要	88
5.2	岸沖方向の砂面勾配と波の関係	89
5.3	岸沖漂砂量モデルの検証	94
5.4	流れと地形変化の関係	96
5.5	三次元的な地形変化の進行過程について	100
5.6	地形変化モデルの検討	101
5.6.1	実測漂砂量の算定	101
5.6.2	漂砂量モデルの検討	102
5.6.3	実測漂砂量と漂砂量モデルの関係	103
5.7	本章のまとめ	105
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b>	<b>107</b>
	<b>研究業績</b>	<b>111</b>
	<b>謝辞</b>	<b>113</b>

# 目次

1.1	東日本台風による被災状況, 国土交通省資料 (2019) より抜粋 . . . . .	1
1.2	Classified laboratory beach profiles., Sunamura and Horikawa (1974) . . . . .	3
1.3	Shoreline change in the laboratory., Sunamura and Horikawa (1974) . . . . .	3
1.4	Shoreline change in the field., Sunamura and Horikawa (1974) . . . . .	3
1.5	岸沖漂砂量分布形の分類, 鹿島ら (1982) . . . . .	4
1.6	遡上域沖端の水位と断面平均流速, 池田ら (2010) . . . . .	5
1.7	地形変化量, 池田ら (2010) . . . . .	5
1.8	5波平均無次元漂砂量, 池田ら (2010) . . . . .	5
1.9	near shore 帯の諸現象の相互関係模式図, 堀川 (1977) . . . . .	6
1.10	Wave gages installed along the pier and their close-up view, Mizuguchi (2010) . . . . .	7
1.11	Field observation system, Mizuguchi (2010) . . . . .	7
1.12	one storm における砂面変動の時系列 (図中の実線は計算天文潮位), 島田ら (2003) . . . . .	8
1.13	Comparison of observed ground water levels with calculated ones., 加藤ら (1992) . . . . .	8
1.14	Sketch of the “trapezium model” of Bellotti et al. [2003] for various onshore beach locations. The time series of the water depth $d$ are shown for regular waves shoreward of the run-down location ( $x_a > x_l$ ), at the run-down location ( $x_l$ ), and seaward of the run-down location ( $x_b < x_l$ ). . . . .	9
1.15	海浜変形モデルの適用範囲, 土木学会海岸施設設計便覧 (2000) . . . . .	10
1.16	洗掘形態, 榎木ら (1971) . . . . .	11
1.17	最大洗掘深さと最大衝突速度との関係, 榎木ら (1971) . . . . .	11
1.18	それぞれの入射角における平均断面, 栗山ら (1987) . . . . .	12
1.19	実測無次元洗掘量と計算無次元洗掘量の相関, 山田ら (2001) . . . . .	13
2.1	駿河海岸の位置および海底勾配 . . . . .	21
2.2	観測位置図 . . . . .	21
2.3	現地海岸の概況 . . . . .	22
2.4	駿河海洋観測所観測値 (左: 年最大有義波高, 右: 波向き) . . . . .	22
2.5	観測システムの構成図 . . . . .	24
2.6	遠赤外線カメラの設置状況 . . . . .	25

2.7	遠赤外線カメラによる撮影例	25
2.8	予備実験と概要（左）と超音波式水位計の観測範囲（右，omron カタログより抜粋）	27
2.9	予備実験変動時系列	27
2.10	室内実験水路模式図（上段：平面図，下段：断面図）	28
2.11	室内実験実施概要	28
2.12	撮影画像の一例	29
2.13	水位変動時系列（Case1-3）	30
2.14	水位変動時系列（Case4-6）	31
2.15	観測機器設置概要図（上段：平面図，下段：断面図）	32
2.16	観測機器設置概況	33
2.17	沖波の日最大有義波高	34
2.18	観測値時系列の一例（UW3, CW1）	35
2.19	降雨量および平均風速と観測データのバラつきの関係（左：降雨量，右：平均風速）	35
2.20	ノイズ処理のフロー	36
2.21	ノイズ処理（二次処理）の考え方	37
2.22	ノイズ処理後の計測値の一例	37
2.23	ノイズ処理後の周波数解析結果	37
3.1	台風経路図（左）および中心気圧時系列（右）	41
3.2	24時間降水量の期間最大値，国土交通省資料(2019)	41
3.3	沿岸波浪実況図（10月10日-10月11日），気象庁資料(2019)	42
3.4	沿岸波浪実況図（10月12日-10月13日），気象庁資料(2019)	43
3.5	台風来襲直後の2019年10月13日の侵食状況，藤原(2020)	44
3.6	台風来襲直後の2019年10月13日の堤防越波状況，藤原(2020)	44
3.7	2019年12月19日の侵食状況，藤原(2020)	45
3.8	沖波有義波高（駿河海洋）および潮位の変動時系列	45
3.9	遠赤外線カメラでの遡上波の観測例	46
3.10	個々波の定義方法	46
3.11	推算値と観測値の比較（駿河海岸，10月12日），加藤ら(2020)	48
3.12	本研究において観測された遡上波形の模式図	49
3.13	遡上波観測結果の一例	49
3.14	River surface flow image of the Uji River; (a) oblique-angled image and a searching line (b) space-time expression of brightness distribution on the searching line indicated in (a)., Fujita et al.(2007)	50
3.15	晴天時の遠赤外線カメラの画像例と検査線（図中，赤線）	51

3.16	STIV 解析結果の一例	52
3.17	観測打上げ高と区間平均遡上速度（岸向きが正）の関係	53
4.1	台風前後の地形変化状況	78
4.2	台風後の海岸状況	79
4.3	前浜の状況（観測点沖より北側を臨む）	79
4.4	前浜の状況（観測点沖より南側を臨む）	80
4.5	樹木の倒木状況	80
4.6	台風通過後の堤防天端状況	81
4.7	超音波水位計からの砂面高の算定例	81
4.8	東日本台風前後の岸沖断面図（岸向きを正）	82
4.9	東日本台風前後の沿岸断面図（北向きを正）	82
4.10	砂面変動時系列	84
4.11	各ステージにおける断面地形図（左：岸沖方向，右：沿岸方向）	85
5.1	駿河海洋観測所と御前崎 NOWPHAS の関係	89
5.2	砂面勾配と疑似沖波波形勾配の関係	90
5.3	砂面勾配と粒径・波高比の関係	90
5.4	砂面勾配と疑似長周期波形勾配の関係	92
5.5	砂面勾配と粒径・長周期波高比の関係	92
5.6	砂面勾配と砂村の関係式	93
5.7	岸沖漂砂量モデルと一波当たりの岸沖漂砂量の関係	96
5.8	晴天時の遠赤外線カメラの画像例と検査線（図中，赤線が岸沖方向，水色線が沿岸方向の検査線を示す）	97
5.9	検査線における時空間画像（St.1，コントラスト比 1.9 倍）	98
5.10	検査線における時空間画像（St.2，コントラスト比 1.9 倍）	98
5.11	検査線における時空間画像（St.3，コントラスト比 1.9 倍）	99
5.12	検査線における時空間画像（St.4，コントラスト比 1.9 倍）	99
5.13	海浜植生の存在状況	100
5.14	海浜断面変形の模式図	102
5.15	漂砂量モデルと実測漂砂量の関係	104

# 表目次

2.1	採用機材（水位計）	23
2.2	実験計測値（5波平均値）	29
2.3	機器設置位置および標高（座標：平面直角座標 VIII 系）	33
3.1	観測打上げ高の一覧	47
4.1	地形変化の特徴	86
5.1	回帰係数，本田ら (2013) より抜粋	91
5.2	係数値と相関係数（岸沖漂砂量モデル）	96
5.3	係数値と相関係数（漂砂量モデル）	104

# 第1章 序 論

## 1.1 研究背景

海岸侵食は古くから議論される工学的に非常に重要な現象であるが、現象の複雑さや主外力である波の統計的な扱いゆえにその力学的機構について未だ未解明な点が多いのが現状である。また、近年、気候変動に伴う海面上昇や台風の激甚化が問題視<sup>1</sup>されており、今後、侵食の生じる範囲や速度が加速度的に進んでいくことが危惧されている。近年の台風について例えば、2018年台風第21号（Jebi）、2019年台風第15号（Faxai）や台風第19号（Hagibis）では、本州において広域での高潮・高波の被害が生じ、その規模は甚大なもの<sup>2</sup>であった。これらの台風による被害や海岸侵食の例として、一部地域において、高波浪に伴う岸沖漂砂の卓越により、短時間で海岸侵食が進行し、護岸の崩落、堤防損傷などの事例（図1.1）が生じるなど、高波の被害と併せて報告をされている。

一般に海岸の侵食機構は岸沖漂砂に起因する短期間の大規模な侵食と沿岸漂砂に起因する長期間の侵食に大別される。海岸侵食の議論の多くは、不可逆的な挙動を示す後者の沿岸漂砂に起因する侵食現象であり、人為的なインパクト（例えば、ダム建設による河川からの流出土砂の減少や港湾施設、海岸構造物の建造に伴う沿岸漂砂の遮断など）に対するものが一般的である。これらの現象は比較的長期な変動であり、外力や侵食量を平均化して議論することが可能であるため、種々のモデルが提案されるほか、汀線変化モデル<sup>例えば3</sup>などといった数値解析技術も発展してきている。一方、高波浪等に伴う岸沖漂砂に起因した短期間の地形変化は、高波浪後の常時波浪によって砂面の再形成等も期待できるものの、例えば高波浪により堤防際において局所的に大規模な侵食が進むと、護岸基礎部の露出等が生じ、構造物の安定性を損なうなど、不可逆的で甚大な被害が生じる可能性も有している。このような現象は工学的に非常に重要な現象であるにも関わらず、観測の難しさや現象の複雑さから、その力学的機構には未解明な点が多い。



国土交通省「令和元年第19号による被害等（令和元年11月22日）」の資料を基に作成

図 1.1 東日本台風による被災状況，国土交通省資料（2019）より抜粋

## 1.2 既往研究

本節では、本研究に関連する既往研究として、高波浪時における海岸域での地形変化についての工学的知見を整理し、課題の抽出を行う。なお、高波浪時の遡上域～堤防付近における地形変化に関連する研究は大別して、遡上域の土砂動態に関する研究と堤防際における局所洗掘に関する研究が挙げられる。

### 1.2.1 高波浪時における遡上域の土砂動態に関する研究

遡上域における高波浪時の地形変化に関する研究は、実験的な手法、現地観測、数値解析等があり、様々なアプローチによって、現象理解を深めるための検討が実施されてきている。

ここでは主要な研究について整理するとともに、本研究との関係について述べる。

#### (1) 実験的な研究

高波浪による地形変化に関する実験は、古くは1950年代から数多く実施され、条件の違いによって様々なケースがあり、考察や活発な議論が進められてきた。

これらのうち、代表的な研究として、例えば、Sunamura and Horikawa<sup>4</sup>は、断面水路を用いた室内実験から、形成される砂浜の形状を分類(図1.2)し、前浜堆積、前浜侵食の砂移動傾向についてC値(式(1.1)、図1.3および図1.4)を提案の上、現地海岸での適用性を検証している。

$$\frac{H_0}{L_0} = C (\tan \beta)^{-0.27} \left( \frac{d}{L_0} \right)^{0.67} \quad (1.1)$$

ここで、 $H_0$ ：沖波波高、 $L_0$ ：沖波波長、 $\tan \beta$ ：砂面勾配、 $d_{50}$ ：砂の中央粒径であり、C値に応じて海岸特性(Cが8以上：沖向きの砂移動、前浜が削り取られるタイプI、Cが4以下：砂礫が岸向きに移動しバームが形成されるタイプIIIであり、タイプIIはその中間)を評価することが可能であることを示している。

本指標は現在でも海岸の特性を把握する上で使用されており、海浜断面の分類の考え方や変化傾向に関する代表的な研究であると言える。また、Sunamura and Horikawa<sup>4</sup>は、海岸の地形変化特性を波高、波長、代表粒径の空間的な諸量で整理できることを示唆しており、本研究における検討での基本的なデータの取り扱いの参考となり得る。

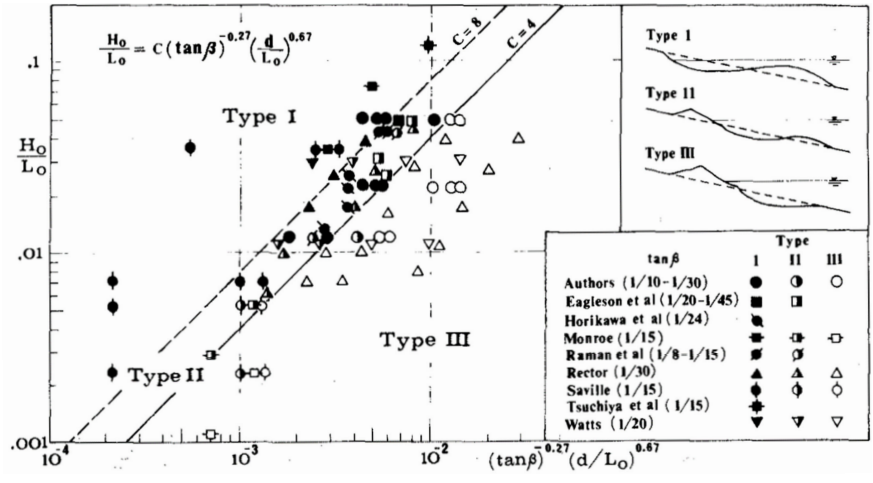


Figure 1.2 Classified laboratory beach profiles., Sunamura and Horikawa (1974)

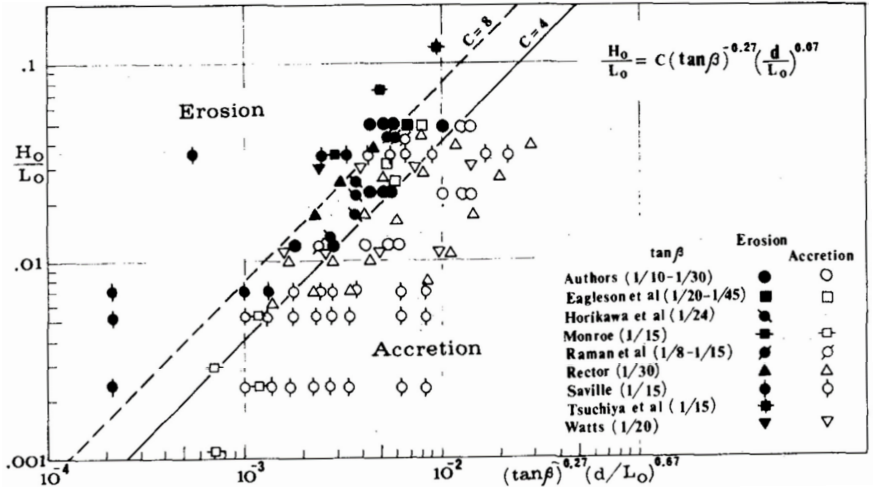


Figure 1.3 Shoreline change in the laboratory., Sunamura and Horikawa (1974)

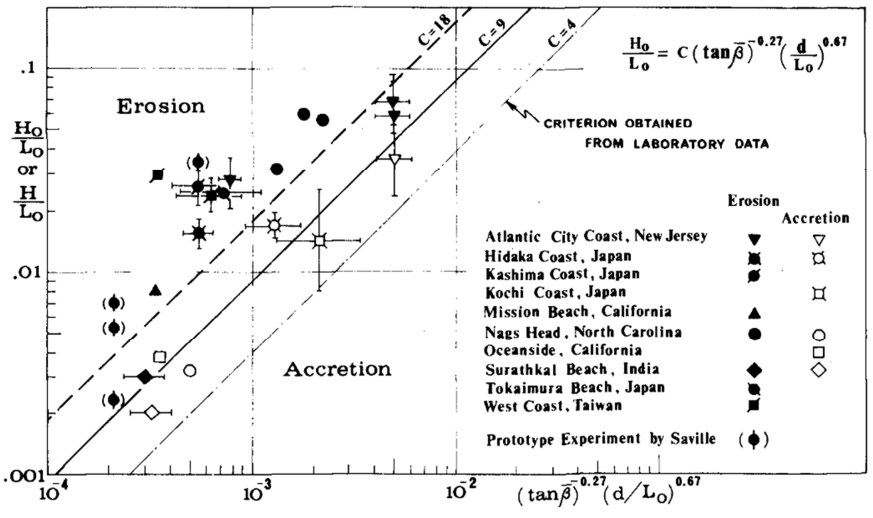


Figure 1.4 Shoreline change in the field., Sunamura and Horikawa (1974)

鹿島ら<sup>5,6</sup>は大型造波水路を用いて現地海浜に近い条件での模型実験を実施し、上記の  $C$  値について、勾配および粒径の異なる条件の汀線変化を分類し、前進、後退の境界値として  $C = 18$  を提案している。また、実験による岸沖漂砂量の分布形（図 1.5）に着目し、波の減衰率を考慮した簡易な岸沖漂砂量モデルが提案された。

$$Q = Q_1 - Q_2 + Q_3 = A_1 e^{-(x-x_1/B_1)^2} + A_2 e^{-(x-x_2/B_2)^2} + A_3 e^{-(x-x_3/B_3)^2} \quad (1.2)$$

ここで、 $Q_1$ ：主に波の軌道運動の平均型性によって生ずる offshore zone の岸向き漂砂、 $Q_2$ ：主に沖向きの平均流速によって生ずる surf zone の沖向き漂砂、 $Q_3$ ：主に波の打上げによって生ずる swash zone の岸向き漂砂であり、式 (1.2) の右辺の各項は砕波点付近 ( $x = x_1$ )、surf zone の中央付近 ( $x = x_2$ )、静水時の汀線付近 ( $x = x_3$ )、にそれぞれピーク値  $A_1 \sim A_3$  をもち、漂砂量の分布範囲が  $B_1 \sim B_3$  により表現される。ここで、ピーク値  $A_1 \sim A_3$  は、初期値  $A_{10} \sim A_{30}$  から減衰率  $\alpha_1 \sim \alpha_3$  で時間的に減衰するよう設定される。

$$A_1 = A_{10} e^{-\alpha_1 t}, A_2 = A_{20} e^{-\alpha_2 t}, A_3 = A_{30} e^{-\alpha_3 t} \quad (1.3)$$

この研究における漂砂量分布のモデルは取り扱いが容易であり、漂砂の分布形に応じて、侵食、堆積の形状が評価される点は興味深い。

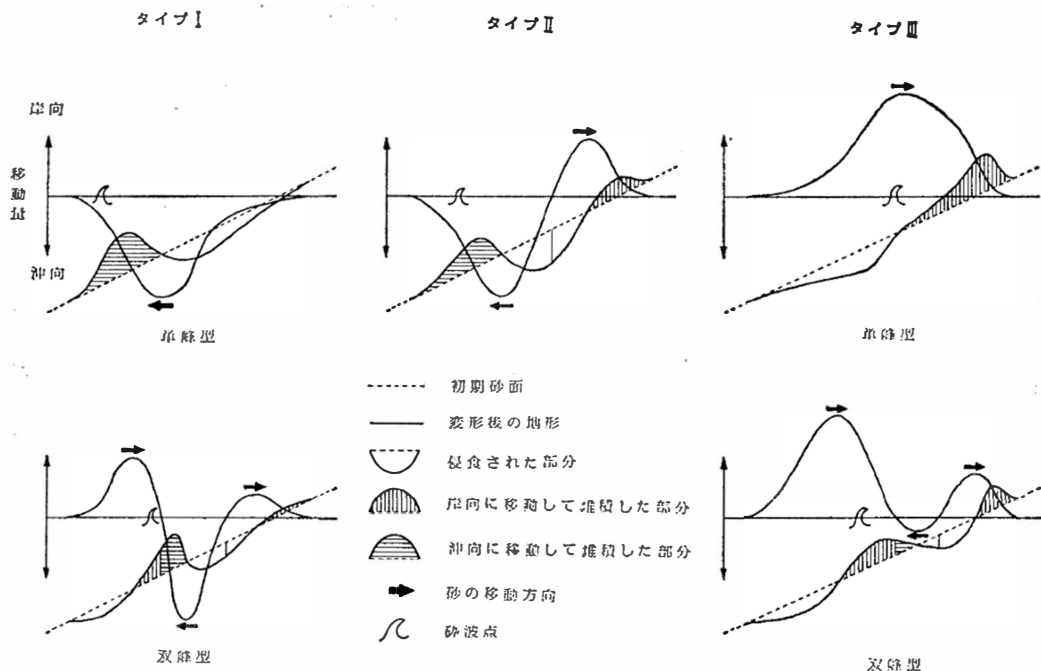


図 1.5 岸沖漂砂量分布形の分類, 鹿島ら (1982)

2000年代以降、(筆者の主観ではあるが)大型造波水路等を用いた移動床実験は、過去に比べその数が減ってきているように見受けられる。これは、実験そのものにかかる人的、費用のコストの大きさを考えるとやむを得ないと考えられるが、その一方で、計測技術も高度化し、様々な計測機器が世に出てきており、これまで計測が難しいとされてきた地形変化の面的な挙動の計測も可能となっていることも認識しなければならない。このような計測技術の発展に伴う実験の一例として、池田ら<sup>7</sup>のような、画像解析を用いた地形変化動態の把握等も実施されている。

池田ら<sup>7</sup>の実験では、種々の論文において地形変化に寄与すると考えられている長周期波(地形変化に対する長周期波の重要性については、次項において詳述した)に着目し、長・短周期の合成波を用いた移動床実験を実施し、水面および砂面を側方から撮影した動画を用いて、画像解析により半波ごとの岸沖漂砂量を算定、評価(図1.8)している。

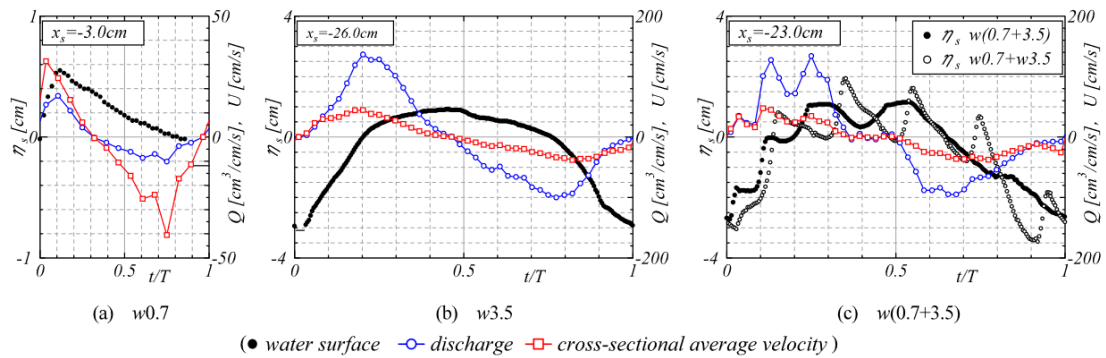


図 1.6 遡上域沖端の水位と断面平均流速, 池田ら (2010)

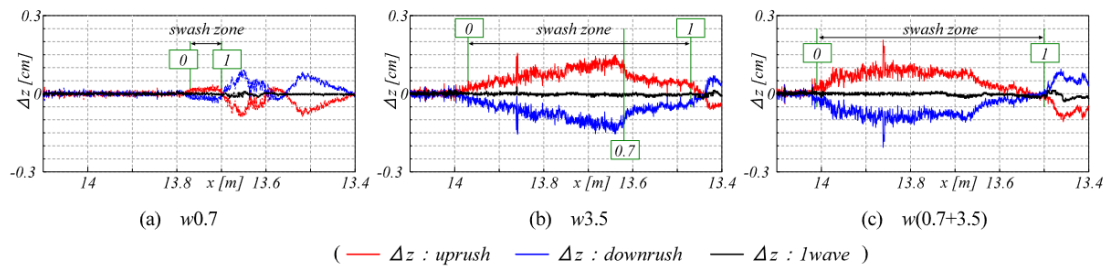


図 1.7 地形変化量, 池田ら (2010)

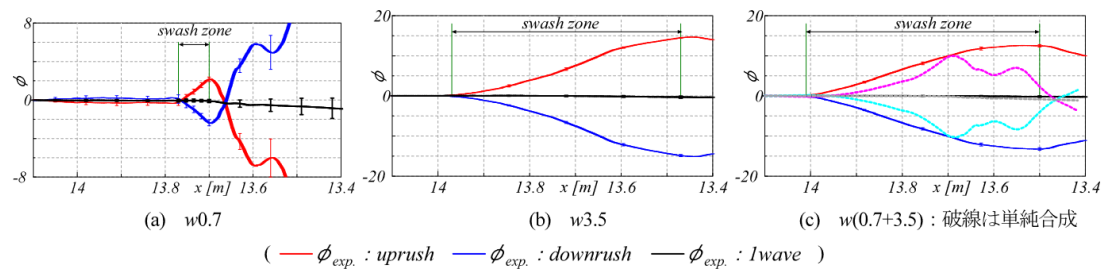


図 1.8 5 波平均無次元漂砂量, 池田ら (2010)

この実験によれば、遡上域における漂砂は up rush 時に岸向き、down-rush 時に沖向きに卓越し、量は up rush 時に Shields 数の 3/2 乗に比例することが確認されている。ただし、down-rush 時には同様の傾向はあるものの、水位の影響で計測値がバラつくことが指摘されている。

図 1.6 - 図 1.8 は、up rush と down-rush による漂砂量の分布について、短周期波、長周期波、短・長周期合成波に対する岸沖漂砂の基礎的な挙動を示した結果であり、その考え方は参考になる。ただし、実験スケールでどの程度までの実現象を表現し得るかについては議論の余地がある。

このような研究は高波浪時の漂砂特性の基本を理解するために非常に有用な研究である一方で、実験精度の問題や特に移動床時の相似則による現象理解の複雑さが課題として残り、現地で生じる現象との比較を丁寧に実施していくことが必要となる。

## (2) 現地観測による研究

高波浪時の遡上域における地形変化に関する現地観測についても、実験的な研究と同様に古くから数多くの観測が実施されてきている。

特に遡上域の波の特性や地形変化を把握するための現地観測については、図 1.9 (堀川<sup>8)</sup>) に示されるように、波、海浜流、漂砂等の作用の結果であり、また逆に海浜地形はこれらの諸現象に大きな影響を及ぼすことを考慮しなければならない。そのため、遡上域における諸現象を正確に理解するためには、海浜地形を精密に測定するだけでなく、広域を密に計測し、測定結果に同時性を持たせることが要求される。

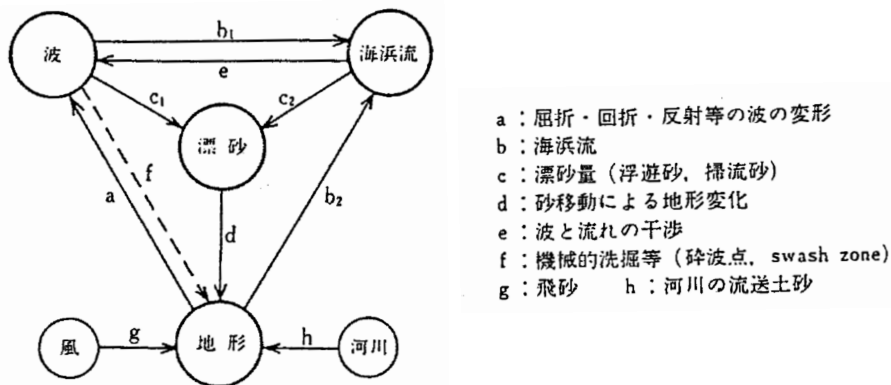


図 1.9 near shore 帯の諸現象の相互関係模式図, 堀川 (1977)

このように広域かつ同時性を満たす時空間密度の高い現地観測の一例として、ここでは、波と地形変化について長期の現地観測を実施した例として、Mizuguchi<sup>9</sup>を整理する。

水口らは、茨城県波崎海岸にある独立行政法人港湾空港技術研究所の観測用栈橋において空中発射型超音波式水位計を岸沖方向に密に配置した高頻度かつ長期の現地観測を実施しており、筆者の知る限り約 10 年に亘って連続した現地観測を実施していた。

現地観測の概況を図 1.10 に、観測システムの模式図を図 1.11 にそれぞれ参照する。



図 1.10 Wave gauges installed along the pier and their close-up view, Mizuguchi (2010)

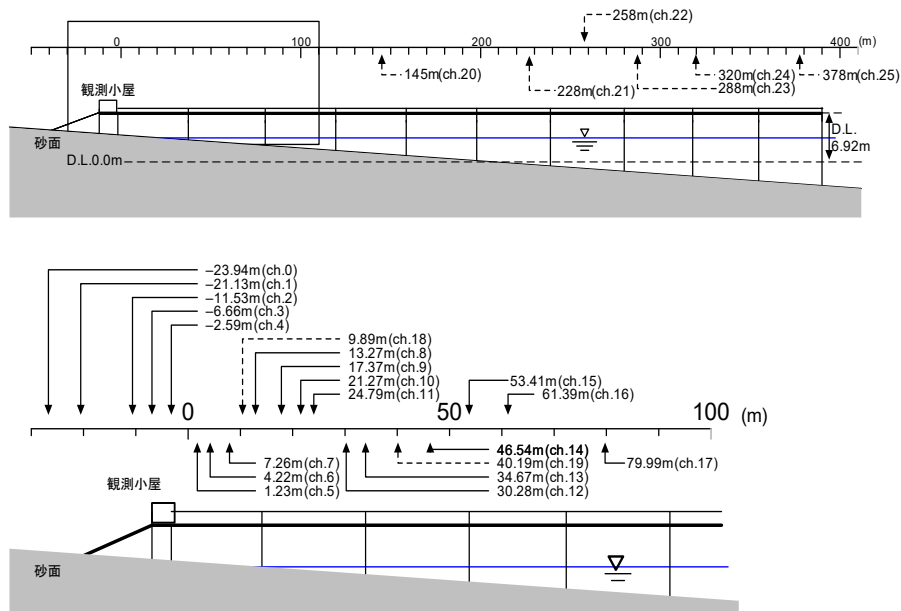


図 1.11 Field observation system, Mizuguchi (2010)

観測体制や機器については第 2 章にて詳しく参照するが、この観測中に取得された高波浪時の岸沖方向での地形変化については、様々な検討が報告をされている。

この一連の研究の中で、特に指摘されているのが地形変化に対する長周期波の重要性であろう。

例えば、島田ら<sup>10</sup>は、上記の観測システムによって観測した 2001 年の高波浪に伴う大規模侵食 (図 1.12) に着目し、汀線付近の侵食は重複波となる長周期成分によってもたらされ、遡上域でエネルギーを失う短周期波は堆積に寄与していることを示唆した。また、侵食後には汀線付近の地形は緩勾配化し、進行波と重複波の境界周波数が低周波数側に变化することが重要な要素となることを指摘している。

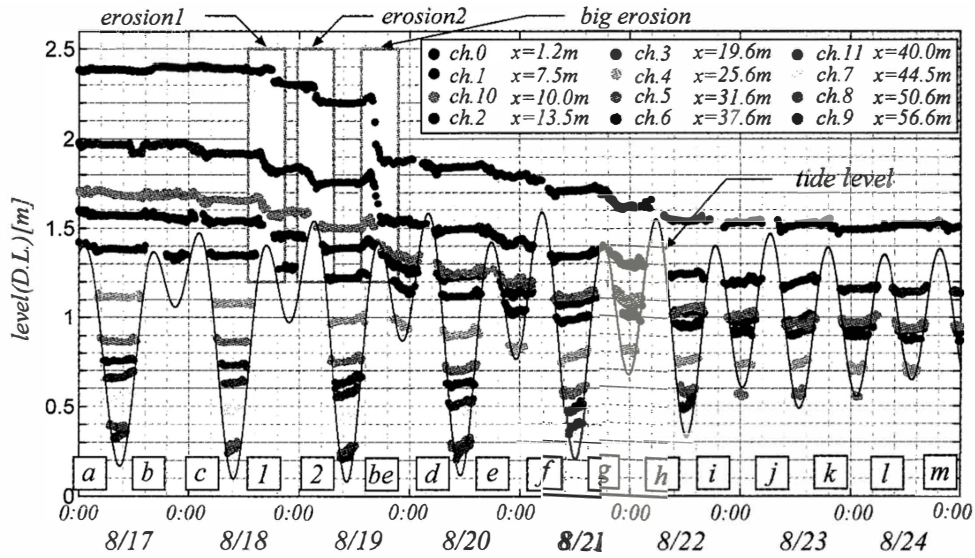


図 1.12 one storm における砂面変動の時系列 (図中の実線は計算天文潮位), 島田ら (2003)

また, 同観測地点においては, 加藤ら<sup>例えば, 11</sup> が波浪と地下水の連続観測を実施しており, 特に荒天時におけるバームの侵食の直接的な外力は長周期波であると結論付けている. ただし, この研究においては, 波が直接的に漂砂を輸送するのに加え, 長周期波の遡上がバーム頂レベルを越えるようになると, バーム頂水平部に海水が滞留し, 海水が浜に浸透することで, 地下水位が上昇, 前浜から地下水が浸出するレベルが高くなることで侵食が進行することを指摘している. また, 荒天時のバーム侵食限界レベルは, ダルシーの式の定常解から算定した浸出レベルの上昇と一致する (図 1.13) とされる.

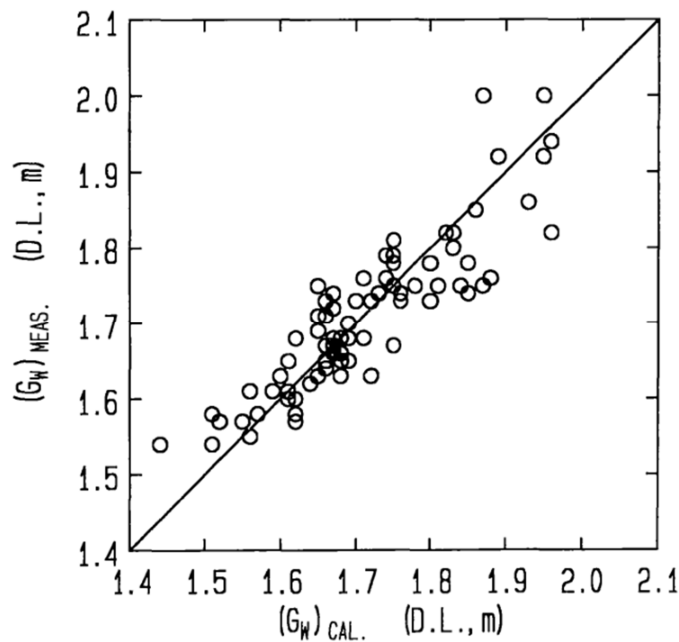


図 1.13 Comparison of observed ground water levels with calculated ones., 加藤ら (1992)

また、Brocchini and Baldock<sup>12</sup> は、遡上域における地形変化の現象について、これまでの研究等を体系的に取りまとめており、その中で指摘されるのが、低周波数、すなわち長周期波が斜面に対し入射角を持って入射することで、沿岸方向に流れが生じ、エッジ波が生じることで侵食が進行する過程である。この遡上波の過程は、Bellotti et al.<sup>13</sup> によりモデル化されており、下図に示すような台形モデルにて表現される。

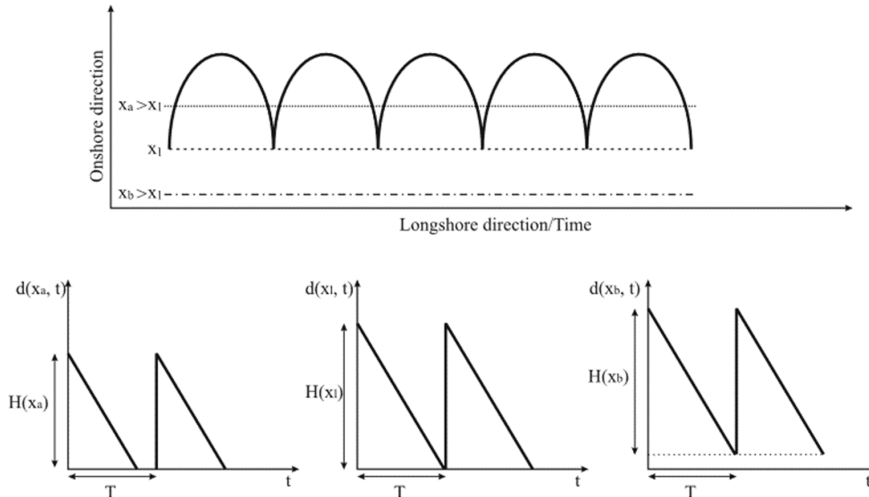


図 1.14 Sketch of the ‘‘ trapezium model ’’ of Bellotti et al. [2003] for various onshore beach locations. The time series of the water depth  $d$  are shown for regular waves shoreward of the run-down location ( $x_a > x_l$ ), at the run-down location ( $x_l$ ), and seaward of the run-down location ( $x_b < x_l$ ).

遡上域における土砂輸送は波の遡上特性に応じて生じるものであり、“zigzag transport” (Brocchini<sup>14</sup>) と称される。これらは大きなスケールで現象を見た際に、カスプが形成される基本的な動態であり、3次元的な地形変化の挙動が評価される点において非常に興味深いものである。ただし、上記は自然海浜における考え方の一例であり、堤防近傍の土砂動態を評価する上では、未だ理論的に不完全であることは否めない。

このように、現地において海岸侵食現象を連続的に観測することはメカニズムの把握のために非常に有用であるが、大規模な観測設備が必要となり、容易に実施することが難しく、これまでの議論は汀線付近の地形変化に留まっているのが現状である。

### (3) 数値解析による研究

海浜変形に対する数値計算モデルは、間瀬ら<sup>例えば,15や16など</sup>により開発されたエネルギー平衡方程式に基づく波浪変形計算により、容易に波浪伝播過程を計算することが可能となり、それに伴い地形変化に関する解析モデルの開発も多く進められてきた。海浜変形モデルの適用の範囲は図 1.15 に示される通りである。

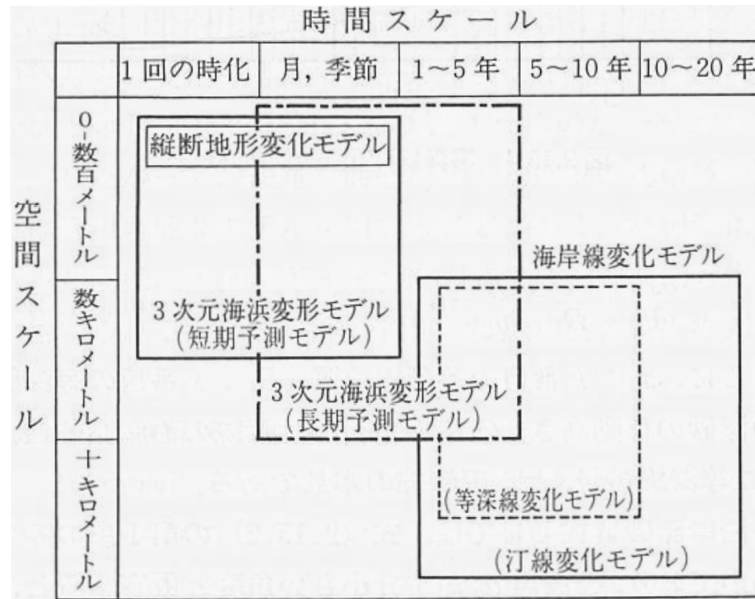


図 1.15 海浜変形モデルの適用範囲, 土木学会海岸施設設計便覧 (2000)

海浜変形計算については、海岸線変化モデル (one-line モデル<sup>17</sup> や等深線変化モデル<sup>18</sup>) に代表されるような、沿岸漂砂に基づく広域かつ長期計算が可能なモデルについて一般化が進み、実務においても検討の基本モデルとして普及している。一方、岸沖漂砂を含む面的な3次元海浜変形モデルは、波 - 海浜流 - 漂砂量の計算から成るモデルがあり、波の計算によって求めた波高の分布から radiation stress を求め、それを海浜流の機動力として与え、漂砂量までを計算するモデルがあるほか、河田ら<sup>19</sup> による理論的な数値モデルとして非線形波浪場を取り扱うモデルが開発されている。

数値計算モデルによる検討では、再現計算に基づく現象理解に加え、予測的な検討が可能であることから、その利用価値は高く、応用の範囲も広い点に利点がある。一方で、表現できる現象がモデルによって限定されるほか、波の取り扱いには注意が必要であり、特に短期間で生じるような高波浪時の地形変化は個々波の挙動を追うことが重要であるため、その分計算の条件設定 (観測値との整合) や計算コスト、遡上波の取り扱いなど、いくらかの課題があると考えられる。

## 1.2.2 堤防際における局所洗掘に関する研究

堤防際における局所洗掘に関する研究は、古くから実験を主体とした研究にて実施されている。

例えば、佐藤ら<sup>21</sup> は、2次元造波水路を用いた実験から、直立壁堤脚部の局所洗掘について、その機構を検討し、現象の時間スケールから以下に示す4つのタイプに分類できることを示している。

- ・タイプ (I) 急激に掘れた後、埋まる
- ・タイプ (II) 急激に掘れた後、そのままの状態が続く
- ・タイプ (III) 急激に掘れた後、徐々に掘れる
- ・タイプ (IV) 初めから徐々に掘れる

また、榎木ら<sup>22, 23</sup>は、同様に2次元造波水路による一様勾配斜面での実験を実施し、特に逆直角三角形の洗掘形態（図 1.16 (a)）をとる場合には、のり面の“もどり流れ”による洗掘が卓越することを示している。

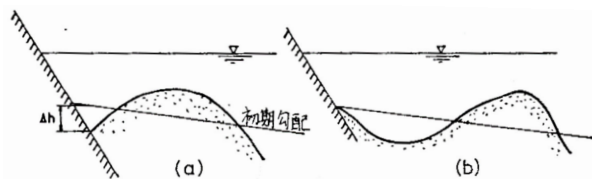


図 1.16 洗掘形態, 榎木ら (1971)

このもどり流れの流速と堤脚部における衝突速度の関係から、流れがのり面勾配、入射波の特性ならびに下流水深によって、Free jump あるいは Submerged jump の様相を示すことを明らかにしている。また、最大衝突流速と最大洗掘深さの関係について、最大洗掘深さは最大衝突速度の4乗に比例することを実験的に確かめている。

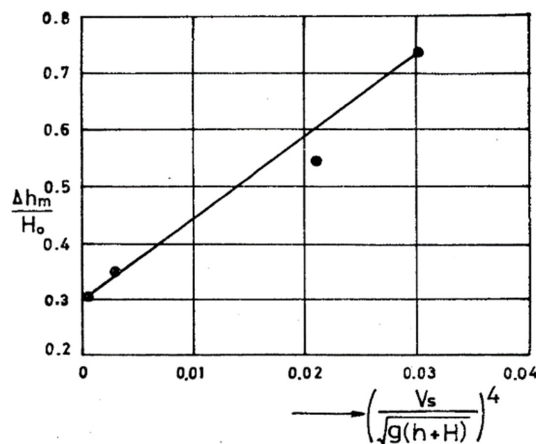


図 1.17 最大洗掘深さと最大衝突速度との関係, 榎木ら (1971)

また、栗山ら<sup>24</sup>は3次元造波水路を用いて、斜め入射重複波による直立防波堤前面の局所洗掘性能を示している。この場合には、波の入射角により洗掘の傾向が変わるとし、波の入射角が小さい場合には、重複波の節の位置において洗掘深が大きくなるのに対し、波の入射角が大きい場合には重複波の腹の位置において洗掘深が大きくなる傾向を示唆している。

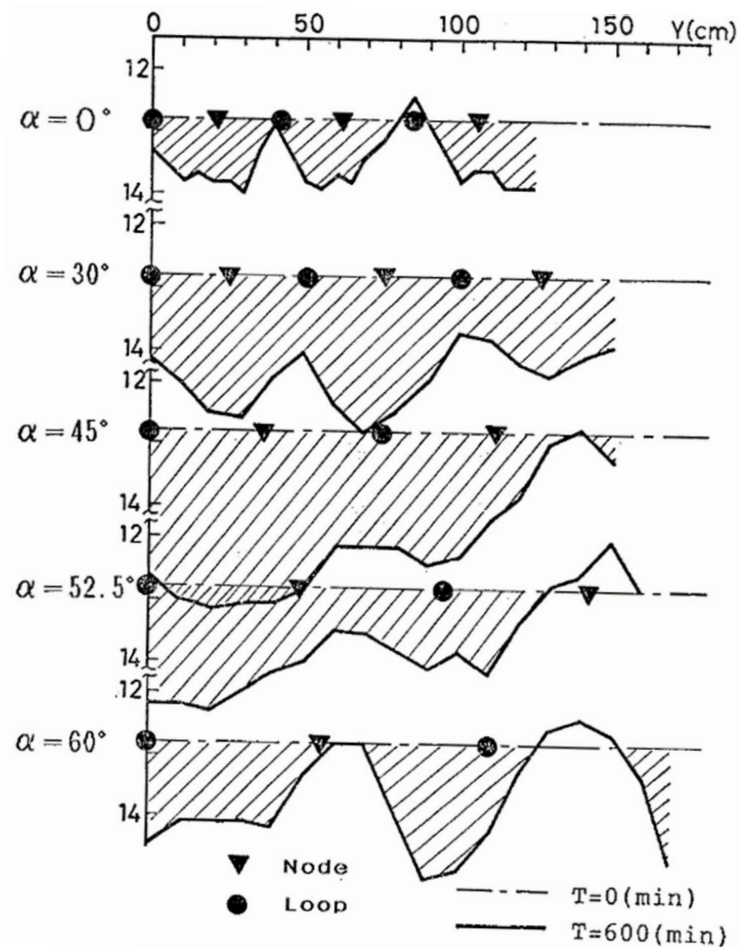


図 1.18 それぞれの入射角における平均断面, 栗山ら (1987)

上記のとおり、局所洗掘が生じる発生機構は複雑であるものの、対象地点の水深に応じて、碎波を伴う遡上波と重複波によるものの大きく2つに大別されるものと考えられる。ただし、実験的な研究は基礎的な挙動を任意の地点や時間で評価することが可能であるものの、相似則（フルード則、レイノルズ則）を同時に満たすことが困難であるため、現地の現象をすべて再現できているとは言い難い。

このような中で現地の実測データや数値計算によって洗掘の定量的評価を行うものとして、山田ら<sup>25</sup>の研究があり、Boussinesq と  $k - \epsilon$  モデルによる数値解析モデルが提案され、侵食・堆積、構造物周辺の洗掘傾向を良好に再現できることが示されている。

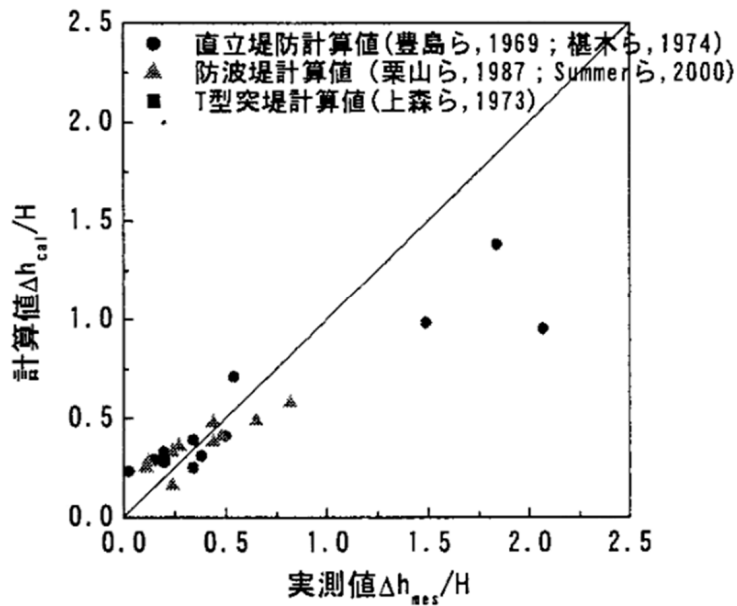


図 1.19 実測無次元洗掘量と計算無次元洗掘量の相関, 山田ら (2001)

ただし、モデルの検証は水理模型実験によって求められたものであり、現地条件での適用性は未だ課題として残っている。

以上に示す通り、堤防前面における局所洗掘は実験や数値計算により、外力に応じた洗掘の発生量は評価されつつあるが、高波浪時における現地の応答や局所的な侵食の進行過程について言及したものは少なく、研究の進展が望まれる。

### 1.3 本研究の目的

これまでの研究では、高波浪時の遡上域における海浜の短期かつ大規模な地形変化に対して、断面2次元水路を用いた実験による岸沖方向での議論や汀線付近の現地観測が主体であり、特に海岸堤防の安定性に寄与する堤防前面での地形変化については、その研究事例は多くない。

本研究では、未だ未解明な点も多い高波浪時における堤防前面の土砂動態機構を解明することを目的に、静岡県駿河海岸に設置した複数台の観測機器によって取得した令和元年東日本台風時の連続データを用いて波と地形変化を検討し、地形変化の三次元的な進行過程を明らかにするとともに、定量的な評価を行うことを目的とする。

## 1.4 本研究の構成

本論文は以下に示すとおり、全6章で構成される。

第1章：序論

第2章：現地観測システムの検討

第3章：令和元年東日本台風の概要と遡上波の特性

第4章：高波浪時における堤防付近の地形変化過程

第5章：三次元的な地形変化と波、流れの関係

第6章：結論

近年気候変動に伴う海水面の上昇、発生する台風の激甚化が示唆されている。例えば、2018年台風第21号（Jebi）、2019年台風第15号（Faxai）や台風第19号（Hagibis）は、本州において大規模な高潮・高波の被害を発生させた。この際、高波浪に伴う岸沖漂砂の卓越により、短時間での海岸侵食が発生し、高波と併せて護岸の倒壊などの被害も報告されている。

特に堤防前面で極端な砂面の低下が発生すると、護岸基礎の露出が進み、倒壊等のリスクが高まるなど、その現象の理解は工学的にも非常に重要である。また、十分な前浜を有している海岸であっても、高波浪が来襲し遡上先端が堤防まで到達する場合には、大規模に土砂が輸送され、常時波浪時の状況と比較して不可逆的な地形変化を呈することもある。高波浪時における堤防前面の局所的な地形変化に関する研究は、古くから実験的な手法で検討されているものの、断面二次元的な議論が多く、その三次元的、局所的なメカニズムについては未だ未解明の点も多いのが現状である。

本論文は、上記の背景のもと、高波浪時の海岸堤防前面における地形変化過程を把握し、周辺の波、流れと地形変化の関係を解明することを目的とした現地観測から、静岡県駿河海岸における令和元年東日本台風（2019年台風第19号）時の波と地形変化について検討したものである。

現地観測は駿河海岸田尻地先の海岸堤防前面に複数台の超音波式の水位計、容量式の水位計を面的に配置し、遠赤外線カメラによる撮影と併せて連続観測を実施した。その観測結果から高波浪時の時空間的な地形変化過程を評価し、遠赤外線カメラによって撮影した動画より画像解析によって求めた外力条件との比較から、地形変化との関係について議論した。令和元年東日本台風時の堤防前面における地形変化の特徴として、高波浪の継続時間が24時間程度であり、そのうち約70mの前浜を越えて堤防前面まで遡上した波は60波であったこと、その波により沿岸方向約10mの範囲で20cm - 50cmの砂面低下が生じ、沿岸方向に勾配を持つような三次元的な地形変化が局所的に生じていたことが挙げられる。この現象の時空間的な過程、定量的な評価を行うことが本論文の主たる目的であり、海岸堤防前面の地形変化過程を理解するための研究である。

本論文は全6章から構成されており、各章の要旨を以下に述べる。

第1章では、本論文の序論として、本研究の背景、既往研究との関連性や課題を整理するとともに、研究の目的や概要について整理した。

第2章では、現地の観測システムの検討として、観測位置の概況や観測機器および本研究で開発した観測システムの内容について詳述した。なお、本研究では超音波式水位計により遡上波の観測や地形変化の詳細を把握しているが、その設置角に対して水面や砂面を適切に観測、評価することが可能かを確認する必要がある。そのため、室内造波水路実験によって設置角と観測値の関係を整理し、観測精度について言及をした。なお、室内実験結果からは、超音波センサーについて照射角 $20^{\circ}$ までは0.01m程度の精度で観測が可能であることが確認された。また、超音波式水位計の観測データに生じるスパイクノイズの除去手法として、複数台の水位計から波の遡上伝播過程を追いかけることで、ノイズ除去を行うアルゴリズムを提案した。

第3では、本研究において検討対象とした令和元年東日本台風の概要を述べ、その時の遡上波の特性について検討した。本台風は、2019年10月12日に大型で強い勢力を保ったまま伊豆半島に上陸し、関東地方を通過した後、13日に日本の東側で温帯低気圧に変わった。その被害状況は関東から東北にかけて広範囲に生じており、本台風の接近、通過に伴い広い範囲で大雨、暴風、高波、高潮が記録された。特に波については、静岡県石廊崎で有義波高13mの記録的な波高が観測され、駿河海岸近傍の駿河海洋観測所（現地観測箇所から南西約5km、水深45m）においても既往最大に匹敵する波高8.6m、周期13.8秒の波が観測された。観測地点まで到達した波について、遠赤外線カメラの動画よりSTIVによる遡上波の速度を算定し、遡上波の波高規模に応じてup rush時の遡上速度は速くなる一方で、down-rush時の速度はほぼ一定値となることを確認した。これは遡上波の有していたエネルギーが堤防での反射により逸散し、down-rush時には砂面勾配に沿って薄層流で流下することに起因すると想定した。

第4章では、地形変化の過程について、超音波式水位計の観測データから、その時間的発展を整理し、駿河海岸における高波浪時の三次元的な地形変化の挙動を明らかにした。砂面低下は潮位の上昇時、より波が堤防まで到達しやすい時間帯に進行し、潮位が下がり遡上波の数が少なくなると、地形変化が生じにくい状況となる。また、潮位の高い時間帯での地形変化について、面的に一様に低下するケースと、急激な砂面低下が進行し沿岸方向に勾配を持つような三次元的な砂面低下が進行するケースがあった。この時、一様に砂面低下する際には岸沖方向で砂面勾配が急勾配化、地形変化の三次元性が強まる時間帯では砂面勾配が緩勾配化する傾向が確認された。

第5章では、砂面勾配や地形変化量（漂砂量）と波、流れの関係について検討した。地形変化過程において、断面地形の差分により一波ごとの岸沖漂砂量を算定し、Shields数の考え方に基づく斜面勾配の影響を考慮した漂砂量モデルによる算定値と比較した結果、一様に砂面低下が進む時間帯については、概ねモデルと一致する一方で、三次元性が現れ

る時間帯では定量的に一致しない傾向を確認した。また、高波浪の終了時に形成される砂面勾配は、既往研究で提案された値と一致することが確認できた。地形変化の外力条件を評価するために、沿岸方向の流れ（特に down-rush 時の流れに着目）を可視化し比較することで、三次元的な地形変化が生じた時間帯では沿岸方向への流れが卓越したことを示した。この要因について、動画の判読から高波浪によって植生がフラッシュし、その削られた砂面に沿って流れが卓越することで、三次元的な地形変化が生じたことを示した。上記の地形変化過程のもと、沿岸方向の流れを考慮する漂砂量モデルを提案し、実測値との比較を行った結果、モデルと実測値との間に良好な相関関係を得た。

第6章では、各章で明らかとなった結論をとりまとめ、本研究の総括を行うとともに、今後の課題について言及した。特に海岸植生はこれまで砂面の固定化（極端な侵食への抵抗）に寄与すると考えられていたが、本研究では植生のフラッシュに伴って局所的な勾配を持って砂面低下が生じ、その勾配に沿って down-rush 時の流れが加速されることで、侵食が進行する過程を示した。このことから海岸植生は一定の外力に対しては侵食への抵抗効果を発現するものの、フラッシュする規模の波浪が来襲した場合には、侵食を助長する可能性があることが示唆された。以上、本研究成果が今後の海岸管理の一助になることを期待し、結論として取りまとめた。

## 参考文献

- 1) 例えば, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) : Climate Change 2021: The physical Science Basis.
- 2) 森 信人 : 近年の高潮・波浪災害とその特徴について, ながれ 40, pp. 15-18, 2021.
- 3) 田中則男, 灘岡和夫 : 汀線変化予測モデルの開発と現地への適用, 港湾技研資料, No.436, pp.3-40, 1982.
- 4) Tsuguo Sunamura, Kiyoshi Horikawa : TWO-DIMENSIONAL BEACH TRANSFORMATION DUE TO WAVES, Coastal Engineering, No.14, 1974.
- 5) 鹿島良一, 清水隆夫, 丸山康樹, 斉藤昭三 : 大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 197-201, 1981.
- 6) 鹿島良一, 清水隆夫, 丸山康樹, 斉藤昭三 : 大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究 (2), 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 228-232, 1982.
- 7) 池田 仁, 岡本 弘, 水口 優 : 短周期合成波による遡上域付近の波と漂砂量に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 66, No.1, pp. 426-430, 2010.
- 8) 堀川清司 : 海浜変形予測手法の開発について, 海岸, No.17, pp.1-5, 1977.
- 9) Masaru Mizuguchi : Field observation of beach responses to storm waves at Hasaki in Japan, ICCE 2010, 2010.
- 10) 島田玄太, 内野敬太, 関 克己, 水口 優 : 高波浪時における汀線近傍の地形変化に及ぼす長周期波と短周期波の役割海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 531-535, 2003.
- 11) 加藤一正, 柳嶋慎一 : 長周期波によるバームの侵食, 土木学会論文集, No.452, II-20, pp.41-50, 1992.
- 12) M. Brocchini and T. E. Baldock : RECENT ADVANCES IN MODELING SWASH ZONE DYNAMICS : INFLUENCE OF SURF-SWASH INTERACTION ON NEARSHORE HYDRODYNAMICS AND MORPHODYNAMICS, Reviews of Geophysics, 46, RG3003, pp.1-21, 2008.

- 13) Bellotti, G., R. Archetti, and M. Brocchini : Experimental validation of mean swash zone boundary conditions, *J. Geophys. Res.*, 108(C8), 3250, doi:10.1029/2002JC001510, 2003.
- 14) Brocchini, M. : Eulerian and Lagrangian aspects of the longshore drift in the surf and swash zones, *J. Geophys. Res.*, 102, 23, 155-23, 169, 1997.
- 15) 間瀬 肇, 高山知司, 国富将嗣, 三島豊秋 : 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, *土木学会論文集*, 第 628 号, II-48, pp. 177-187, 1999.
- 16) Mase, H. : Multi-directional random wave transformation model based on energy balance equation, *Coastal Eng., Jour.*, Vol.43, No.4, pp.317-337, 2001.
- 17) Pelnard-Considere, R. : Essi de theorie de l'evolution des formes de rivage en plages de sable et de galets, IV eme Journees de l'Hydraulique, 1954.
- 18) 宇多高明, 河野茂樹 : 海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発, *土木学会論文集*, No.539/II-35, pp.121-139, 1996.
- 19) 河田恵昭, 木村彰宏 : 平面波浪場の 3 次元海浜変形の特性に関する研究, *京都大学防災研究所年報*, 第 43 号, B-2, 2000.
- 20) 海岸施設設計便覧 2000 年版, 土木学会, 2000.
- 21) 佐藤昭二, 田中則男, 入江 功 : 直立壁堤脚部の波による二次元的洗掘実験, 第 13 回海岸工学講演会論文集, pp.156-161, 1966.
- 22) 榎木 亨, 川崎芳一 : 海岸堤防堤脚部の洗掘について, *京大防災研究所年報*, 第 4 号, pp.1-12, 1960.
- 23) 榎木 亨, 高畑市三 : 海岸堤防堤脚部の局所洗掘機構について (その II) -特にのり面上のもどり流れの特性について-, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 371-375, 1971.
- 24) 栗山善昭, 朝倉弘敏, 藤田 誠, 入江 功 : 斜め入射重複波による直立堤前面の海底洗掘, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.156-161.
- 25) 山田浩次, 田辺勇人, 鳥居謙一, 加藤史訓, 山本吉道, 有村盾一, Vu Thanh Ca : 海岸構造物周辺の洗掘の定量的評価, *海岸工学論文集*, 第 48 巻, pp.551-555, 2001.

## 第2章 現地観測システムの検討

本研究では、堤防前面における波と地形変化過程を把握することを目的に、静岡県駿河海岸を対象に観測機器を密に配置し、2019年9月～12月の約3ヵ月間の連続観測を実施した。本章では、現地観測システムの構築について、その概要を述べるとともに、その観測機器の精度等について検証した結果について詳述する。

### 2.1 本章の概要

遡上域の波の特性や地形変化を把握するための現地観測は、海浜地形を精密かつ広域に計測することが重要であり、時空間的に高密度の観測を実施することで、その動態を詳細に理解できるものと考えられる。古来の現地観測では、多くの観測がサンプリング間隔が短いもので1日程度（例えば測量成果の比較など）のものしかなく、動的な高波浪時の侵食現象を捉えることが困難とされていた。このような中で、より細かな観測を実施するための手法として、島田ら<sup>1</sup>の研究事例に学び、波と地形変化の両方を高頻度のサンプリングによって把握する手法について検討した。

本研究では、静岡県駿河海岸の堤防前面に、特に堤防前面の遡上波の特性と地形変化過程に着目した観測を実施することを目的として、超音波式水位計を用いた面的な連続観測システムを構築した。観測機器には、比較的簡易に実施が可能となる小型かつ安価な超音波式水位計（変位計）を採用し、その適用条件について、室内実験を行うことで、観測システムの構築に当たっての課題等を整理した。また、超音波式水位計との比較検証のための容量式水位計を配置したほか、近年、河川の高度流量観測等で、その有用性が確認されている遠赤外線カメラを現地に設置し、台風に伴う暴浪時や夜間も含めた連続的な動態把握を行う手法を提案した。

以上より、堤防前面の砂面高及び遡上波の水面変動を連続して捉えることが可能な観測システムを静岡県駿河海岸の堤防地点に設置し、無人での連続観測を実施した。

また、観測した超音波式水位計のデータには一定程度のノイズを含んでいたため、ノイズを除去するアルゴリズムについても提案した。

## 2.2 現地観測の位置づけ

本研究において実施する現地観測は、堤防前面における波と地形変化の動態を高密度に計測することを目的とした。

例えば、広域かつ高頻度の現地観測事例としては、島田ら<sup>1</sup>の観測があり、茨城県波崎海岸にある独立行政法人港湾空港技術研究所の観測用栈橋に空中発射型超音波式波高計（以下、AEUWG）を遡上域の約 55m 区間の岸沖方向に 12 台を設置し、サンプリング間隔 5Hz での連続観測を実施していた事例がある。この観測システムの参考にするべき点は、AEUWG が砂面露出時には砂面の鉛直位置を、遡上波が存在する時には水面変動を計測する点に着目し、時空間的に密な観測を行った点であろう。筆者が把握する限り、この観測は 2001 年から 2010 年ごろまでの約 10 年に亘って実施されており、その間、2003 年や 2009 年の高波浪時における大規模なバーム侵食などを観測<sup>2</sup>し、遡上域の地形変化の動態を理解する上で、有用な観測結果を取りまとめている。一方で、この観測では密なデータ計測が可能ではあるものの、AEUWG の設置方向から岸沖方向の土砂移動過程での議論が主になること、また、他に追従するような観測が出てこなかった点に課題があると考えられる。加えて、高波浪時の概況が視覚的に確認できないため、現地状況の理解が取得したデータに依存してしまい、観測に伴って発生するノイズ等の値により、結果が左右されてしまうという問題も有している。

本研究では、砂面と遡上波の動態を超音波式水位計で計測し、かつ遡上波を直接計測する手法として容量式水位計を採用することで、ノイズ除去を行う仕組みを提案する。また、台風に伴う暴浪時や夜間も含めた海岸状況を視覚的に捉える方法として、遠赤外線カメラを採用し、連続観測を実施したものである。

## 2.3 観測フィールドの選定

本現地観測は、静岡県焼津市田尻地先に位置する駿河海岸において実施した。本節では、駿河海岸の概要について述べるとともに、観測箇所の選定について詳述する。

### 2.3.1 駿河海岸の概要

駿河海岸（直轄区間）は、静岡県駿河湾内に位置する海岸延長 12.1km の砂浜海岸である。海岸背後は古くから人口や産業が集積し都市化が進み、海域は港湾利用や漁業が盛んである。また、砂浜にはウミガメの産卵や鳥類の飛来、海岸植生などが見られ環境面においても多様性を有しており、堤防では日常的に散策などの余暇利用も見受けられ、利用面にも配慮された海岸である。一方、駿河海岸は、その急峻な地形（図 2.1）から太平洋で発達した巨大な波浪が海岸線近くまでエネルギーを保ったまま来襲するため、これまでに甚大な海岸災害が幾度も発生してきた。

このため、昭和36年9月の第2室戸台風による災害を契機に、昭和39年から継続して直轄事業が進められてきた。これらの高波に対しては、堤防の整備や必要浜幅の確保など、多面的な海岸事業が進められてきているが、近年、ダム建設等に伴う大井川からの流出土砂量の減少<sup>3</sup>や大井川港などの人的構造物による沿岸漂砂の遮断により、海岸侵食の進行が著しく、必要浜幅の確保に課題が生じているのが現状である。当該海岸では、大井川港でのサンドバイパスや養浜事業、海岸構造物の建設など、面的防護の観点から様々な対策が実施されている。

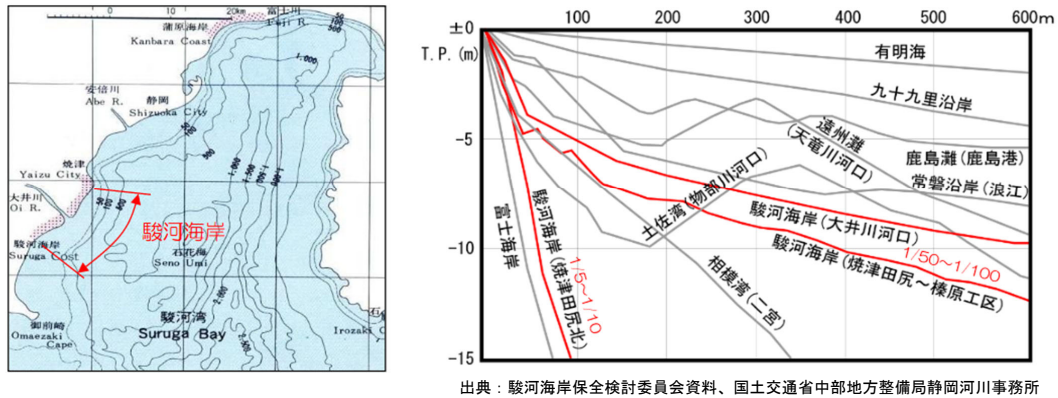


図 2.1 駿河海岸の位置および海底勾配

### 2.3.2 観測位置の選定

本現地観測では、複数の観測機器を現地に設置し、無人にて連続観測を行うことを前提とした。そのため、観測の実施が可能で、かつこれまで越波履歴等があり、比較的来襲波のレベルが大きい箇所を対象とするため、駿河海岸測線 No.15 付近を選定した。なお、当該地点は、昭和40年代、50年代に越波被害が相次ぎ、堤防の整備を順次進めてきた区間（堤防天端高 T.P.+7.9m）である。

観測位置図を図 2.2 に示す。



図 2.2 観測位置図

当該海岸の前浜勾配は 1/8 であり、前浜延長約 70m である。沖合には突堤、離岸堤が配置されているが、本観測地点の沖合は海岸構造物の開口部（図 2.3）であり、波の遡上に

は大きな影響はないものと推察される。

現地盤に対して堤防は台風の来襲前において1m程度露出しており、波返し工が設置される。観測地点周辺は粒径1mm程度の砂利が主構成材料であり、一部礫が散在する状況にあった。また、前浜には小規模ではあるが、バームの形成が確認された。

観測位置の概況について、現地の状況を図2.3に示す。



図 2.3 現地海岸の概況

参考に、沖波条件（国土交通省管理 駿河海洋観測所）として、2008年から2017年の10年間における年平均最大波高5.42m、年平均最大周期14.87s、主波向きはSSE方向である。

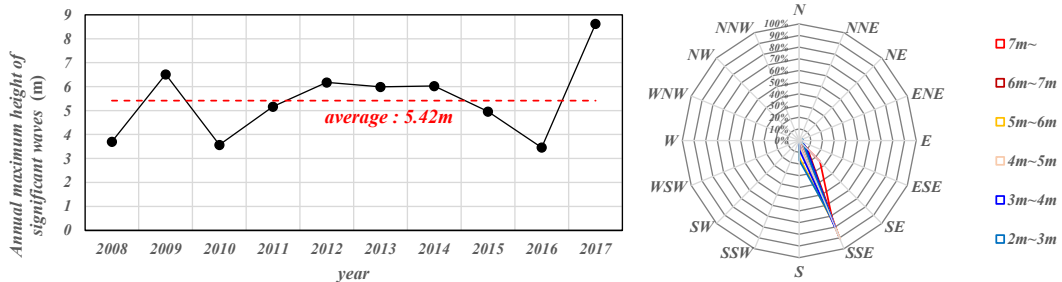


図 2.4 駿河海洋観測所観測値（左：年最大有義波高，右：波向き）

## 2.4 観測機器の選定

現地観測は、遡上波および地形変化の挙動を確認するための観測機器として非接触式の超音波型水位計を、また、遡上波の挙動を確認するための接触式の観測機器として容量式水位計を、それぞれ選定した。また、遡上波の状況等を確認することを目的に遠赤外線カメラによる連続撮影を実施した。

### 2.4.1 水位計（変位計）

本観測においては、波および地形を計測することを目的に、非接触式である超音波式水位計として OMRON 社製の簡易変位計（サンプリング周波数 3Hz）を、また、遡上波の水位を計測することを目的に接触式水位計として東京計測製の容量式水位計（10Hz）をそれぞれ採用した。

表 2.1 採用機材（水位計）

計測方法	非接触式 *1	接触式 *2
区 分	超音波式水位計	容量式水位計
メーカー	OMRON	株式会社東京計測
製品名	E-4PA-N	特注品
分解能	1.0 mm	1.0 mm

\*1：非接触式の水位計は一般に、センサーより発射した信号パルスが水面にて反射し、帰来するまでの時間を計測することで基点からの距離を計測するものである。主な計測方式は電波式と超音波式に大別されるが、後者の方が製品事例は多く、機材も相対的に安価である。本観測では小型かつ安価で安定した計測が可能な機器として超音波式水位計を採用した。

\*2：接触式の水位計は一般に、センサー部において水面を感知し、基準面からの水面高を計測するものである。主な計測方式は容量式とステップ式に大別され、前者は実験室、後者は現地観測での採用事例<sup>4</sup>が多い。一方で、大規模なステップ式水位計は現状製品化されているものがないことから、本観測では容量式水位計を現地観測対応にて実施できる機器を採用した。

### 2.4.2 データロガー

データロガーは日置電機株式会社（HIOKI）製の 10ch データロガー（LR8431）を使用し、観測機器によるアナログ信号をデジタル信号で保存した。なお、サンプリング間隔は

0.1s で収録した。なお、安定的な観測を実施するため、当該地点には仮設電源を架設し、電源を供給した。

主たる観測システム構成は図 2.5 に示すとおりである。

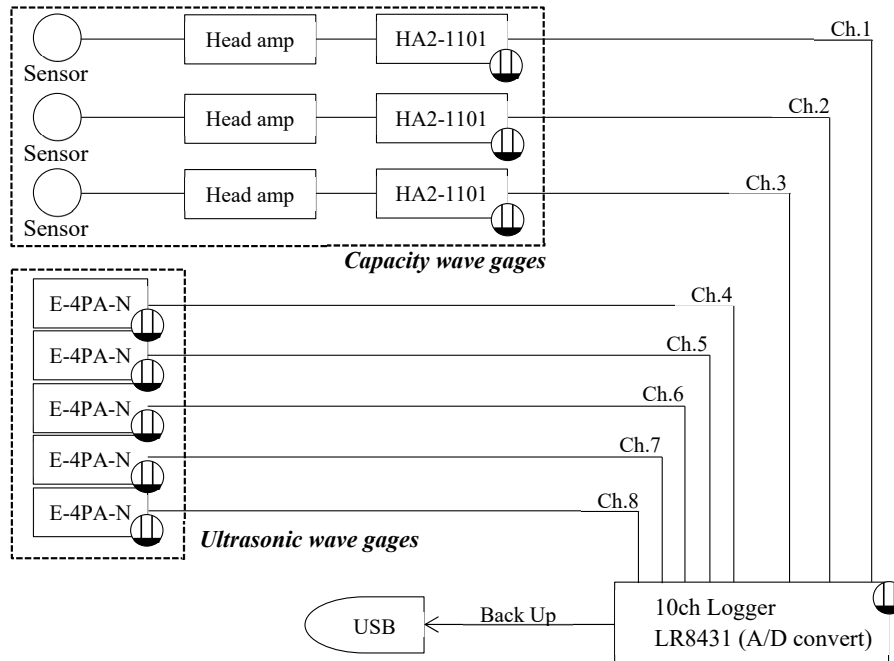


図 2.5 観測システムの構成図

### 2.4.3 遠赤外線カメラ

対象地点への波の進入状況、地形の変化状況などを視覚的に把握するためには、カメラ等を用いた常時監視が有効である。カメラによる撮影は映像録画やインターバルカメラによる写真撮影などが考えられるが、一波毎の周期を考慮する場合、現象は数秒のオーダーであり、インターバルカメラでは撮影できない可能性が高い。また、通常の光学カメラでは、夜間や悪天候時の撮影に課題があり、高波浪の生起時間によっては、現象を取り逃す可能性がある。

ここで、本観測では、近年、河川観測の分野でその応用が期待されている遠赤外線カメラによる撮影を試みた。遠赤外線カメラは通常、物体が放出エネルギーとして発している赤外線波長（9.0 - 14.0  $\mu\text{m}$ ）を観測するものであり、放出エネルギーに加え熱を捉えることが可能である。河川における高度流量観測の分野においては、Fujita<sup>5</sup>を代表するように、水面の微小な温度差を遠赤外線カメラで観測し、その移流を計測することで表面流速を計測する手法が確立されつつある。海岸・海洋分野においては、猿渡ら<sup>6</sup>が水面の白波観測などに採用しているものの、その事例は極めて少ない。

本観測では、波の進入状況や地形変化の状況を視覚的に確認することを目的に、フレー

ムレート 30Hz の FLIR 社製遠赤外線カメラを海岸の岸沖方向を臨むように設置し、連続観測を実施した。



図 2.6 遠赤外線カメラの設置状況

平常時の撮影画像は図 2.7 に示すとおりであり、画像向かって右側に海岸堤防、左側が沖を示す。また、画像奥には石積の護岸が写っており、海浜植生は白く表示される。



図 2.7 遠赤外線カメラによる撮影例

## 2.5 超音波式水位計の設置角に関する室内実験

空中発射型の超音波式水位計を用いた現地の観測事例については、前述のとおり、島田ら<sup>1</sup>や Mizuguchi and Seki<sup>7</sup>に代表されるように連続観測を実施した事例等が報告されているが、その設置状況に応じた精度についての検証事例はほとんどなく、メーカーの公称値を参照することがほとんどである。一方、超音波式水位計から照射される超音波は、高い指向性を有するが、距離に応じて検出範囲が異なるという特性も有している<sup>8</sup>。そのため、超音波水位計を現地に設置するにあたり、超音波式水位計によりデータの取得が可能な精度及び照射角度を把握する必要がある。

特に本観測においては、小型かつ安価な機器を用いて、現地常設の観測機器による無人観測を行うため、その観測機器の設置状況に応じた観測精度を把握しておくことは非常に重要である。そこで、本節では選定した超音波式水位計について、その設置状況による観測精度を検証することを目的に、コンクリート床面に対する定常的な予備実験と断面造波水路を用いた室内観測実験を実施した。

なお、両実験においては現地観測に使用した超音波式水位計（OMRON 製 E-4PA-N）を用い、HIOKI 製多チャンネルデータロガーにて A/D 変換し、計測間隔 0.1 秒で収録した。これは現地に設置する際のシステム構成と同様である。

### 2.5.1 コンクリート床面に対する予備実験

特に砂面を検出するにあたっての精度検証を目的に、照射角度に関する室内実験として水平面（コンクリート製床面）に対して照射実験を実施した。

実験は垂直時に超音波センサーが地表面高 0.64m になるよう観測機器を配置し、超音波式水位計のサンプリング間隔 0.3s、データロガーでの収録間隔 0.1s で観測した。照射角度は 0°、10°、20°、25°、30°、40° の 6 ケースとし、各ケースにおいて約 200 点以上の観測点が得られるように収録した。予備実験の実施状況と超音波式水位計の検出範囲を図 2.8 に示す。なお、本機器においては、センサーから 0.5m の範囲は不検出範囲である。

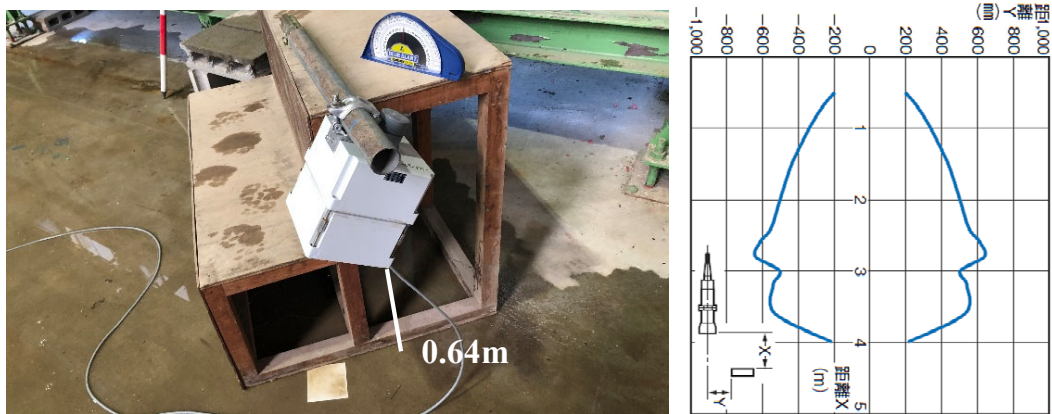


図 2.8 予備実験と概要 (左) と超音波式水位計の観測範囲 (右, omron カタログより抜粋)

観測結果の時系列を図 2.9 に示す。

観測結果より、照射距離に対する計測値の誤差は 0.001m のオーダーであり、計測誤差は小さい。ただし、超音波式水位計はセンサー部からの相対距離を計測するため、照射角度が付く場合、計測値はセンサーからの射角距離で計測される点には十分に留意が必要となる。また、照射角度について概ね照射角  $20^\circ$  の範囲においては安定的な観測が実施できるものの、 $25^\circ$  以上の照射角となる場合には、床面から帰来する超音波を観測できず、ノイズが発生することを確認した。

つまり、現地に設置する場合、特に砂面を計測するに当たっては、照射角度  $20^\circ$  までの範囲で計測できる場合は、計測誤差はほぼ生じないという結果を得た。

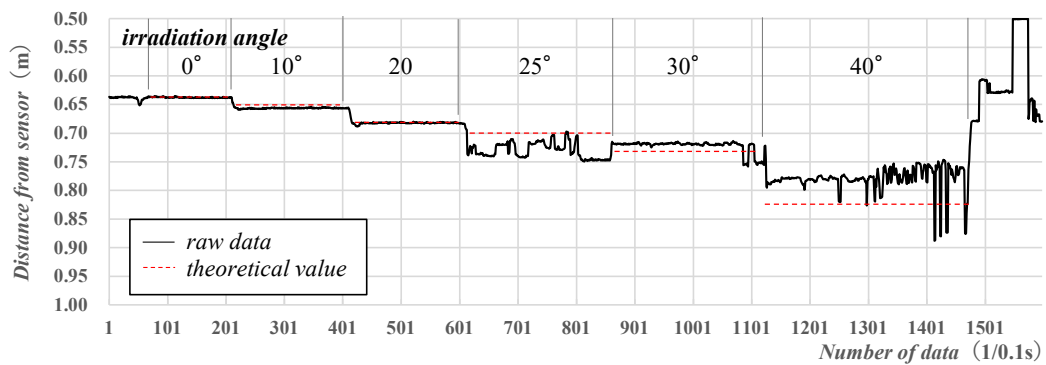


図 2.9 予備実験変動時系列

## 2.5.2 室内造波水路による観測実験

超音波式水位計の波浪観測への精度検証として、国土総合政策技術研究所内の風洞付造波実験水路にて、規則波（目標波高 15cm，目標周期 1.8s）を造波し，超音波式水位計の照射角度を変えた観測を実施した。

### (1) 実験条件

水路実験は，風洞付造波実験水路（幅 0.6m，深さ 1.2m，延長 52.0m，図 2.10 参照）を用いて，規則波に対する観測を実施した。

設置箇所は砕波点より沖側とし，荷台により固定した超音波式水位計にて，機器サンプリング間隔 0.3s，収録サンプリング間隔 0.1s で連続観測を行った。水深は水路床から 0.7m，超音波式水位計を水路床から 1.4m の位置に設置し，波高 0.15m，周期 1.8s の規則波を造波した。

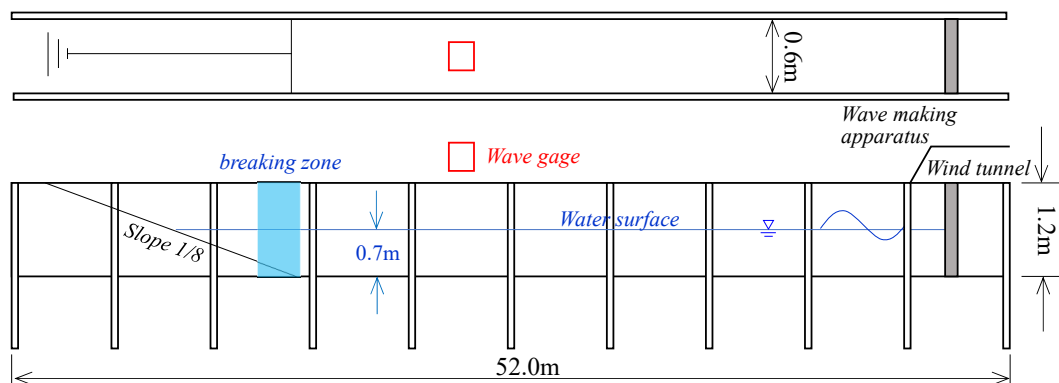


図 2.10 室内実験水路模式図（上段：平面図，下段：断面図）



図 2.11 室内実験実施概要

## (2) 実験方法

断面水路上方に超音波式水位計を設置し、各ケースに対して100波以上を観測するよう、1ケース当たり造波から概ね5分間のデータを水位計にて収録した。なお、観測機器の照射角は、水準器によってその角度を調整し設定した。検討ケースは、予備実験と同様のケースとし、計6ケースで実施した。

実験の実施状況は図2.12に示すとおりである。



図 2.12 撮影画像の一例

## (3) 実験結果

実験水路による観測結果を図2.13および図2.14に示す。また、計測値の一覧を表2.2に示した。

照射角 $0^\circ$ の条件では、規則波の波形を概ね取得できており、ビデオカメラ映像から解析した波高と超音波式水位計から算定した波高の差分は $0.01\text{m}$ 以下であった。照射角 $10^\circ$ および $20^\circ$ の条件でも差分は $0.01\sim 0.02\text{m}$ 内であり、計測精度という点では照射角 $0^\circ$ と比較して大きく劣るものではない。ただし、照射角が $25^\circ$ 以上の条件においては、ノイズによる振幅が急増し、戻り値はあるものの、水面を適切に取得しているとは考えられない結果となった。また、照射角の増加に伴い、波形の取得が困難となる傾向が確認された。これは進行する波の前面を計測するためと考えられ、波峰を取得できていないものと考えられる。

表 2.2 実験計測値 (5波平均値)

実験ケース	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$25^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$
波高計測値 (m)	0.16	0.16	0.17	計測不可	計測不可	計測不可
周期計測値 (s)	1.80	1.80	2.00	計測不可	計測不可	計測不可

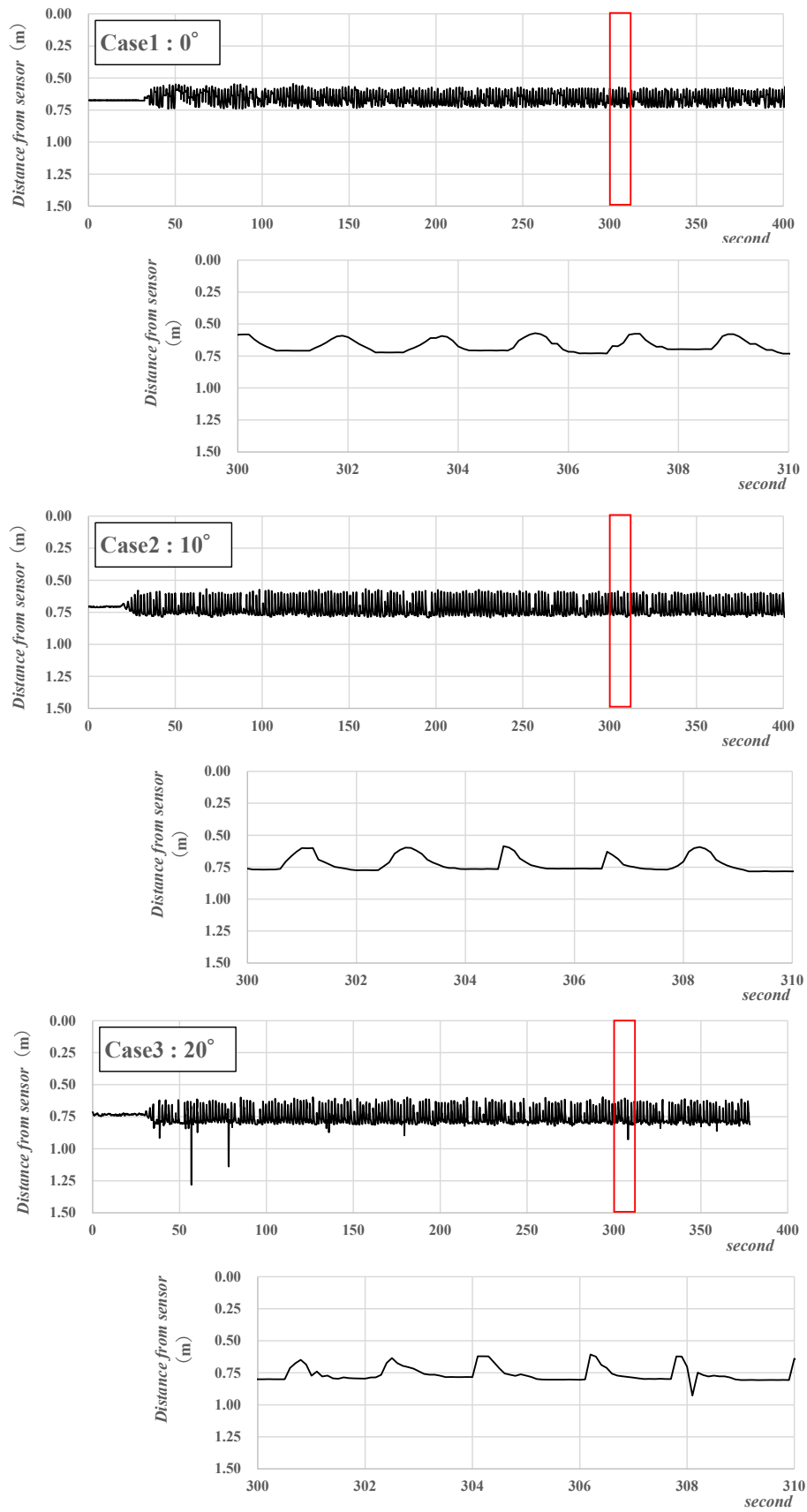


図 2.13 水位変動時系列 (Case1-3)

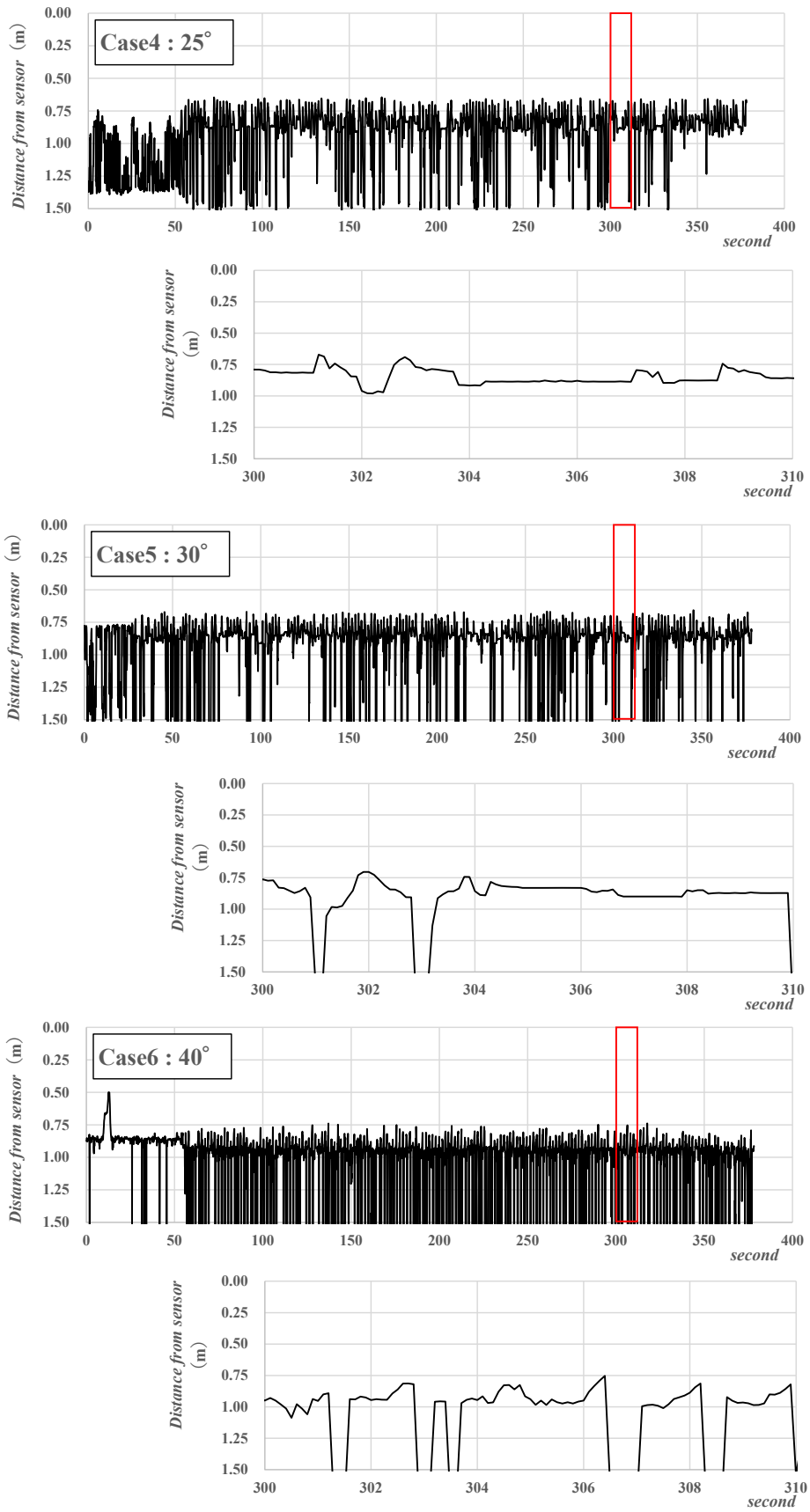


図 2.14 水位変動時系列 (Case4-6)

### 2.5.3 実験結果のまとめ

超音波式水位計に関する室内実験から、遡上波の観測に対しては波峰を適切に捉える、また、砂面高の観測に対しては角度補正が不要となるという観点から、現地に設置する際の超音波式水位計の設置角度は照射角  $0^\circ$  は適切であると考えられる。一方で、本観測で採用した観測機器については、設置角  $20^\circ$  までが波および砂面を良好に観測できる範囲であることが確認できた。また、その時の計測誤差は概ね  $0.01\text{m}$  のオーダーである。

このことから、本観測機器の現地適用時にはある程度の設置後差は許容できるものと考えられ、計測値についても数  $\text{mm}$  のオーダーで計測することが可能である。

## 2.6 現地観測システムの検討

採用した観測機器により、波および地形変化を観測するための観測システムを提案し、以下の通り構築した。観測システムは、堤内地より仮設電源を敷設し、電源供給をしながら図 2.15 に示す通り設置した。

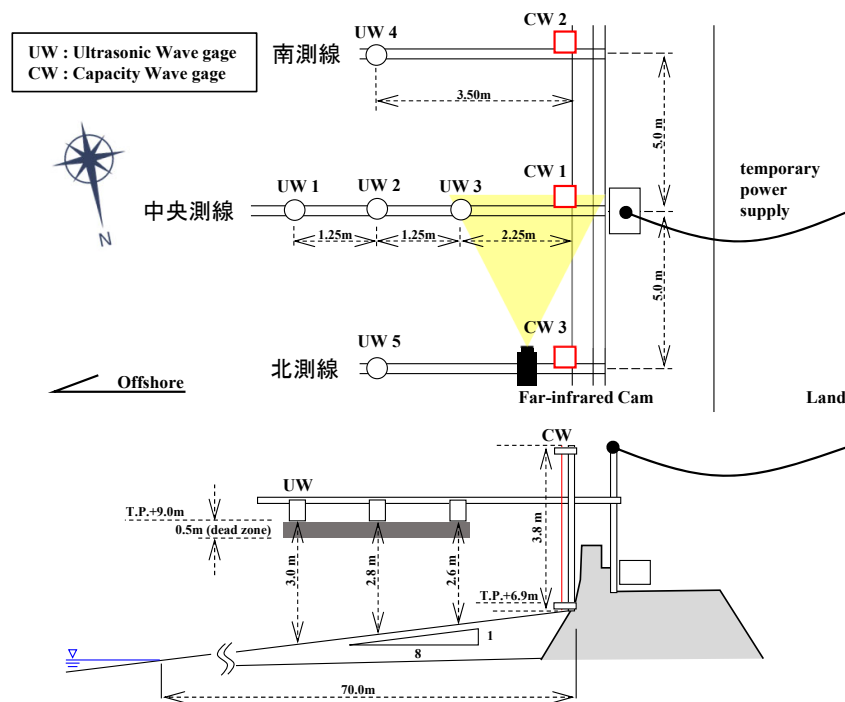


図 2.15 観測機器設置概要図（上段：平面図，下段：断面図）

観測システムの概況を図 2.16 に示す。

観測は沿岸方向に 3 測線を設定し、そのうち中央測線は沖側に観測機器を張り出すことで、岸沖方向の観測を実施した。設置した観測機器は超音波式水位計 5 台（中央測線 3 台、南北測線 1 台/測線）、容量式水位計 3 台（1 台/測線）、遠赤外線カメラ 1 台であり、サンプリング間隔  $0.1\text{s}$  にて連続観測を実施した。



図 2.16 観測機器設置概況

設置点の座標および標高は、測量により計測し、表 2.3 に示すとおりである。

表 2.3 機器設置位置および標高（座標：平面直角座標 VIII 系）

機器	X	Y	標高 (T.P.+m)	備考
CW1	-129937.418	-14997.766	6.93	センサー下面部上端
CW2	-129941.915	-14999.372	6.95	同上
CW3	-129933.075	-14996.205	6.89	同上
UW1	-129938.832	-14994.991	9.15	センサー部
UW2	-129938.403	-14996.171	9.19	同上
UW3	-129938.424	-14997.332	9.21	同上
UW4	-129943.073	-14998.328	9.21	同上
UW5	-129934.152	-14994.088	9.09	同上
Cam	-129933.377	-14996.721	9.28	カメラレンズ中央

## 2.7 観測期間と波の観測状況

現地観測は、2019年9月20日から開始し、同年12月12日まで連続的に観測を実施した。

### 2.7.1 観測期間と検討対象期間の設定

本観測期間中、2019年台風第15号 (Faxai)、第17号 (Tapah)、第18号 (Mitag)、第19号 (Hagibis)、20号 (Neoguri)、21号 (Bualoi) が本州に接近したが、本観測地点まで遡上波が到達したのは、第19号 (Hagibis, 東日本台風) のみであった。

駿河海洋波浪観測所<sup>9</sup>における沖波の日最大有義波高を図 2.17 に示す。

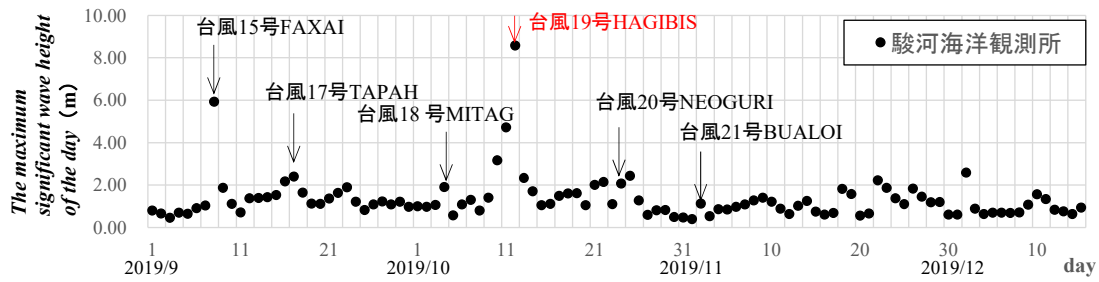


図 2.17 沖波の日最大有義波高

以上を踏まえ、第3章以降の検討においては、令和元年東日本台風に伴う遡上波が確認された期間として、2019年10月11日～12日を対象期間とした。

### 2.7.2 データの欠測状況

本観測では、観測機器駆動のための電源を中部電力柱より仮設電源として分電し、観測を実施していた。中部電力によれば、焼津市の一部において2019年10月12日16:00前後で停電が発生（中部電力ヒアリング結果）しており、その後、観測機器内のバッテリーで一定時間駆動したものの、18:11時点で電源を消失し、観測が中断した。

ただし、電源消失時は波高ピークの時間帯ではあったものの、下げ潮時であり、第4章に示す砂面高の変遷を確認する限り、この時間以降、地形変化に資する有意な波は遡上しなかったものと想定される。

## 2.8 ノイズ除去手法の検討

超音波式の変位計は機器としての構造が簡易であり、可搬性や価格帯の影響もあって様々な計測に利用されている。一方、空中発射型に分類される機器の大多数は室内空間での使用（実験やタンクの水位センサ）を前提としており、現地のような不確実な要因（風浪や降雨など）を多分に含む空間での利用例は数が限られる。また、発生するノイズは供給電力の周期ノイズに起因するもののほか、特に現地で使用した場合の発生例として甲斐<sup>10</sup>にあるように、降雨により発生するノイズも指摘されている。この発生要因は計器のプロブヘッドに表面張力によって雨滴が付着し、信号エラーを起こすというものである。

本観測においても、特に超音波式水位計によって計測したデータには、スパイクノイズが発生しており、検討に当たっては、そのノイズを除去する必要性が生じた。

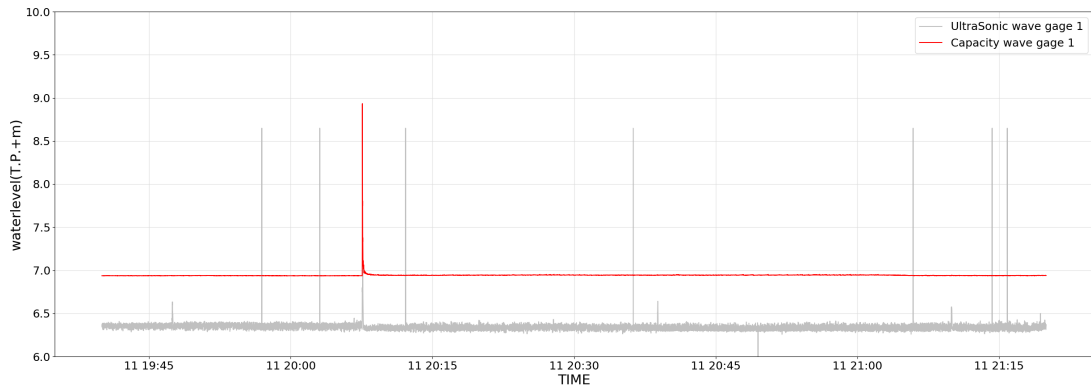


図 2.18 観測値時系列の一例 (UW3, CW1)

### 2.8.1 ノイズ発生要因の検討

ノイズの発生が降雨に伴う雨滴や暴風によるものだと仮定した場合、台風等の暴浪時には多分のノイズを含むこととなる。この発生状況を確認するため、全観測データ（2019/9/20 - 2019/12/11）の 10 分間標準偏差を算定し、近傍の気象データ（静岡空港：降雨量，平均風速）との関係を整理した。

標準偏差と降雨量および平均風速との関係を図 2.19 を示す。

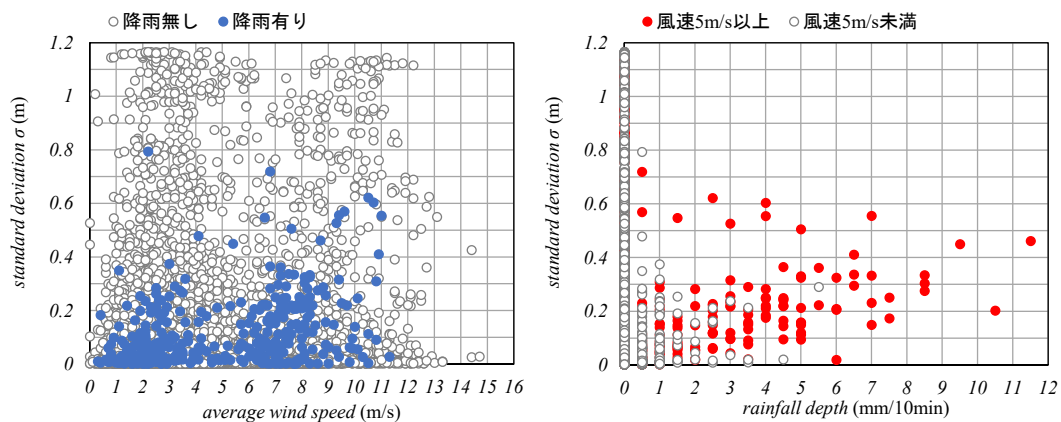


図 2.19 降雨量および平均風速と観測データのバラつきの関係（左：降雨量，右：平均風速）

上図より、ノイズは降雨強度の増加に伴い発生頻度が高くなる傾向および平均風速 5m/s 以上から発生頻度が高くなる傾向が確認された。ただし、これらは台風接近時を抜粋して分析した一例であり、ノイズが数時間継続する場合には、バラつきが大きくなり解析不可であったことから、閾値は参考値である。大きな波の打上げは台風に伴って頻度がますため、本観測の適用に当たっては、台風接近時のような降雨強度および風速が大きな状況を想定する必要がある。これらより、本データを解析するには、同時に発生する一部の観測ノイズ情報の分離が必要となることがわかった。

## 2.8.2 ノイズ除去手法の検討

観測において発生する一部のノイズを除去するため、ノイズ除去のアルゴリズムを以下に提案する。

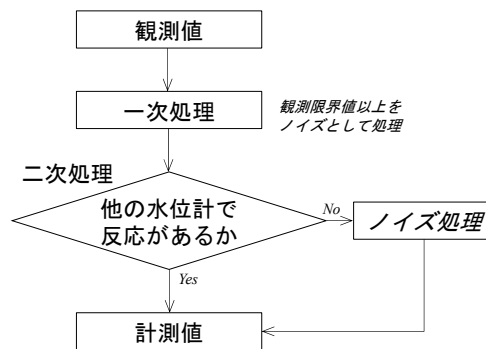


図 2.20 ノイズ処理のフロー

### (1) 一次処理

本観測で使用した超音波式水位計はセンサー部の設置高 (T.P.+9.09 - 9.21m) より下方 0.5m の範囲は計測不可領域の使用である。そのため、理屈上は水位計の観測限界点 (T.P.+8.59 - 8.71m) 以上の値は取得することはできないが、観測データからは頻度は少ないものの、この限界点以上の観測値を示すことがあった。

これらは観測上の過電圧によるノイズであると見なし、当該数値が観測された時間帯はノイズ発生前のデータより地盤高相当の値を算定し、その値に変換することでノイズ除去を行った。なお、地盤高の値は対象時間から過去 10 分間における計測のうち、下端 (地盤高近傍) の計測値を抽出した平均値と定義した。

### (2) 二次処理

一次処理では全てのノイズを除去することができないため、二次処理として、波は沖から岸に向かって遡上する特性に着目し、超音波式水位計で反応したものの、容量式水位計もしくは他の水位計で波を感知していない値はノイズと判断し、それらの値を一次処理と同様に砂面高相当に変換することでノイズを除去した。

沖側のデータを判断するにあたっての閾値は、遡りの時間：1.5s (実績の遠赤外線カメラの映像から遡上時間を算定) とし、波とノイズの判定 (図 2.21) を行った。

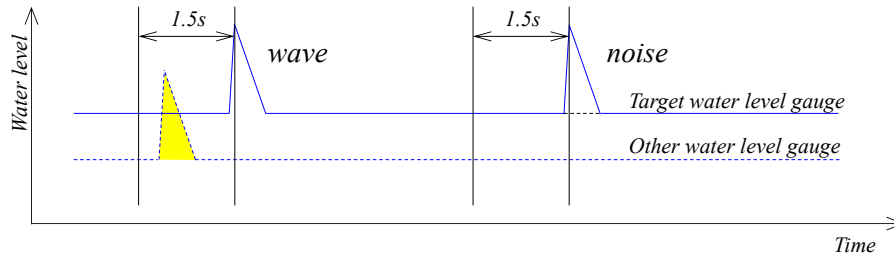


図 2.21 ノイズ処理（二次処理）の考え方

ノイズ処理後の計測値の一例を図 2.22 に示す。

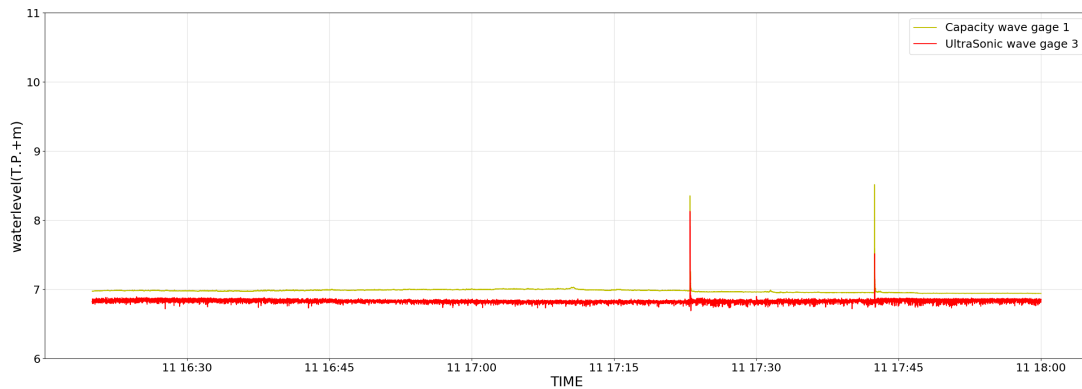


図 2.22 ノイズ処理後の計測値の一例

また、周波数解析による信号特性の概要を 2.23 に示す。

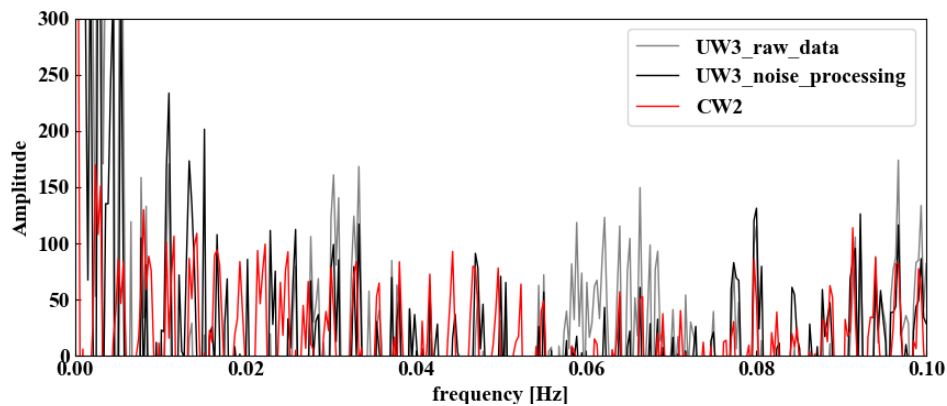


図 2.23 ノイズ処理後の周波数解析結果

上図より、明らかに周期 15 秒程度の周波数帯で観測データのノイズを除去し得ることが確認できる。

観測に伴い発生するスパイクノイズは、特に暴浪時には発生しやすい傾向にあるが、本研究において提案するノイズ処理手法を適用することで機械的にノイズを除去することが可能である。

以上を持って、現地観測システムとし、駿河海岸における連続観測を実施した。

## 2.9 本章のまとめ

第2章では、現地観測システムの構築について検討し、静岡県駿河海岸の特に堤防前面において遡上波と地形変化過程を高密度で観測するための手法開発および観測機器の設置を行った。

本観測において採用した観測機器は、比較的小型かつ安価に実施できる機器として、OMRON社製の超音波式水位計を採用し、その観測精度について室内実験によって確認した。室内実験結果より小型変位センサーは固定床面および水面での相対距離の計測において、0.01m程度以下の誤差で相対距離が計測可能であること、また、照射角 $20^\circ$ までは、波および床面までの相対距離が計測可能であることを示した。

また、遡上波の水位を計測するための比較機器として容量式の水位計を採用し、状態監視のため、近年河川の高度流量観測等で使用される遠赤外線カメラを併せて設置することとした。

本採用機材をもって駿河海岸に観測装置を設置し、2019年9月から12月までの3か月に亘って連続観測を実施した結果、令和元年東日本台風が来襲し、本観測点において遡上波を計測することができた。なお、第4章で詳述の通り、当該観測期間において堤防前面で有意な地形変化が生じた。そのため、以降の検討に資するデータとして、2019年10月11日～12日の観測データを検討対象期間として設定した。

なお、超音波式水位計の観測データにはスパイクノイズを含んでおり、波と地形の計測においては、そのノイズを除去する必要がある。ノイズ除去は機械的に実施することを想定し、一次処理として観測限界点以上の計測値を除去し、二次処理として複数台の観測データより、波の遡上機構を考慮して、ノイズ除去を行うアルゴリズムを提案し、その手法の妥当性を確認した。

## 参考文献

- 1) 島田玄太, 関 克己, 野原威一郎, 小栗保二, 関本恒浩, 水口 優: 汀線近傍におけるストーム時大規模侵食の現地観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 586-590, 2002.
- 2) 猪澤 悠, 田方俊輔, 水口 優: 大規模バーム侵食時における汀線付近の波と侵食の進行過程, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.516-520, 2010.
- 3) 大井川総合土砂管理計画【第一版】, 大井川流砂系協議会, 令和 2 年 6 月.
- 4) 村木義男, 石田直之, 高島和夫: リレーを用いたステップ式水位計と波浪観測塔-苫小牧港の例-, 第 11 回海岸工学講演会論文集, pp.74-80, 1964.
- 5) Fujita I. : Discharge Measurements of Snowmelt Flood by Space-time Image Velocimetry during the Night Using Far-infrared Camera, Water 2017, 9, 269, 2017.
- 6) 猿渡亜由美, 坂川諒太, 大塚淳一, 馬場康之, 久保輝広, 水谷英朗, 二宮順一, 山田朋人, 内山雄介, 森 信人, 渡部靖憲: フェッチ制限下の風波碎波に伴う海面表層の応答, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I-67-I-72, 2018.
- 7) Masaru MIZUGUCHI and Katsumi SEKI : FIELD OBSERVATION OF WAVES AND TOPOGRAPHICAL CHANGE NEAR THE SHORELINE, Asian and Pasific Coasts 2007, CD-ROM, 2007.
- 8) 超音波変異センサー E4PA-N : [https://www.fa.omron.co.jp/data\\_pdf/cat/e4pa-n\\_ds\\_j\\_5\\_6.pdf?id=1467](https://www.fa.omron.co.jp/data_pdf/cat/e4pa-n_ds_j_5_6.pdf?id=1467), 参照 2019-06-28
- 9) 国土交通省 水文水質データベース : <http://www1.river.go.jp/>
- 10) 甲斐憲次: 台風接近時に 30m 鉄塔で観測された強風のスペクトルについて, 日本気象学会機関誌「天気」, 30 巻, pp.1071-1091, 1983.

## 第3章 令和元年東日本台風の概要と遡上波の特性

令和元年東日本台風は、2019年10月10日に日本列島に上陸し、日本各地で甚大な被害をもたらした台風である。別名、令和元年台風第19号、アジア名をHagibisという。

本台風の接近に伴って駿河海岸では第4章にて詳述する通り、短時間で大きな地形変化が生じ、周辺の海岸においても越波被害や異形ブロックの散乱などが確認された。本研究では、令和元年東日本台風を外力条件とした地形変化について検討を進めるため、本章では台風の概要と駿河海岸での波浪の遡上波の特性について詳述する。

### 3.1 本章の概要

令和元年東日本台風は、駿河海岸沿岸で既往最大に匹敵するほどの波高を生起させ、最大波高の生起時間と満潮が重なったことで、沿岸一帯で大規模な越波被害等を生じさせた。本章では、まず令和元年東日本台風の概要について、既往文献等を整理し、被害状況等を取りまとめた。本台風による被害状況は、降雨や風浪被害を含めて、近年、稀に見る規模であり、全国的にその影響は大きかったものと考えられる。高波、高潮被害については、越波被害や護岸の倒壊等も報告されており、駿河湾沿岸では既往最大もしくは、それを超える規模の波高や潮位が観測されるなど、外力の規模は過去と比較して非常に大きなものであった。

本台風に伴う高波浪は約24時間継続し、本観測期間において駿河海岸の堤防付近まで遡上した波は60波確認された。この波の遡上特性について、沖波との比較や堤防前面での打上げ、引き波の状況等を整理した。また、本台風による高波浪は10月12日の深夜帯から明け方にかけて、一度目のピークを迎えている。通常、夜間や暴浪時の状態監視は光源がない限り難しい状況にあるものの、本現地観測においては遠赤外線カメラを設置していたことから、その遡上波形を視覚的に捉えることに成功している。この画像を解析することで、打上げもしくは引き波時の空間波形を把握し、STIVによる遡上波の速度を算定することを試みた。

## 3.2 台風の概要

2019年台風第19号は2019年10月6日3時に南鳥島近海にて台風となり、アジア名「ハギビス (Hagibis)」と命名された。本台風は、平年よりも高い海水温の領域を通過することで急速に発達し、発生から僅か39時間で中心気圧915hPaの「猛烈な勢力」となった。10月10日21時に「非常に強い勢力」に降格の上、中心気圧955hPa、最大風速40m/sで静岡県伊豆半島に上陸した。

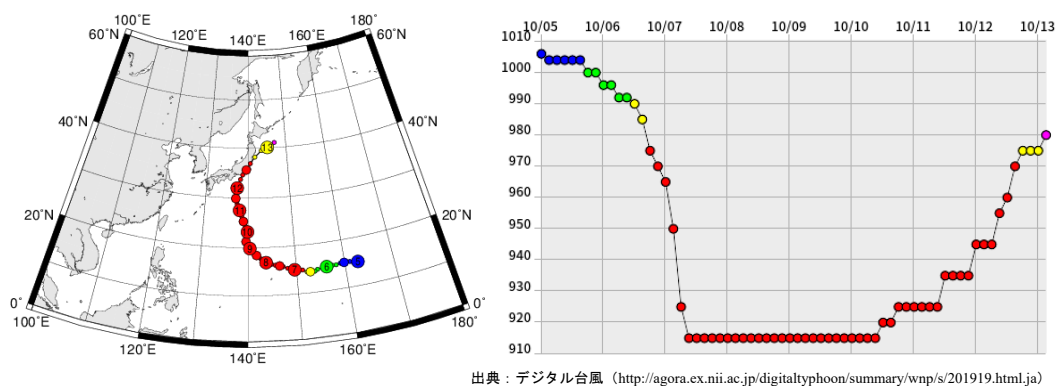


図 3.1 台風経路図 (左) および中心気圧時系列 (右)

本台風は、広範囲に影響を及ぼし、その猛烈な雨と風により東海～関東～東北において甚大な被害をもたらした。降雨については、10月10日から13日までの総降水量が、神奈川県箱根で1,000ミリに達したほか、東日本を中心に17地点で500ミリを超え、6時間降水量で89地点、12時間降水量で120地点、24時間降水量で103地点、48時間降水量では72地点で観測史上1位を更新する大雨となった<sup>1</sup>。

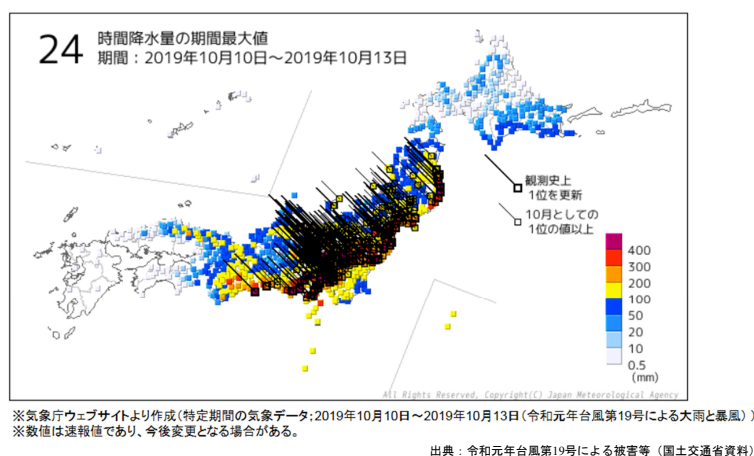


図 3.2 24 時間降水量の期間最大値, 国土交通省資料 (2019)

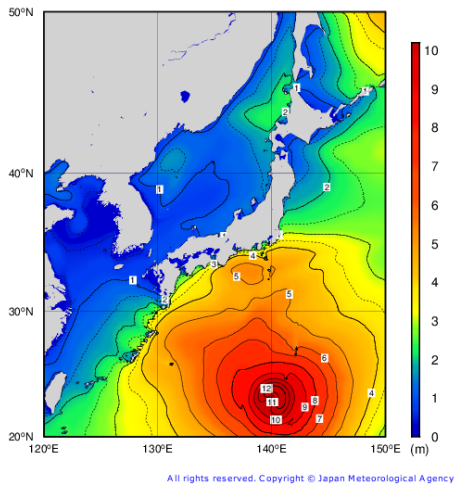
この広範囲での大雨は、大型で非常に強い勢力をもった台風の接近により多量の水蒸気が流れ込み、局所的に前線の強化や地形の効果などによって持続的に上昇流が形成され、記録的な大雨をもたらしたとされる。

この大雨被害により、信濃川水系千曲川で堤防決壊による浸水被害が発生し、北陸新幹線の車両基地が水没したほか、荒川水系越辺川および都幾川、阿武隈川水系阿武隈川、久慈川水系久慈川および里川で堤防が決壊し、人的被害が家屋の浸水等が報告をされている。

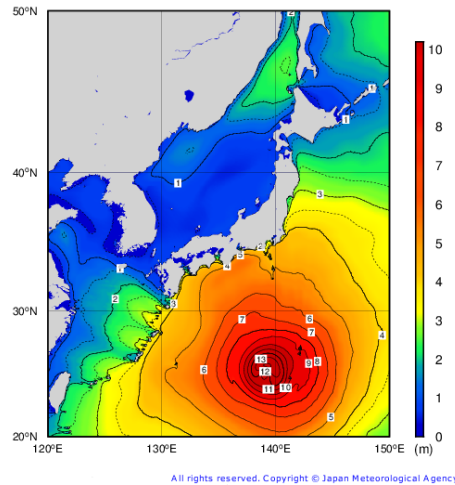
高波、高潮の被害は、本観測地点が位置する駿河海岸において、記録的な高潮、高波を記録しており、駿河海岸の北に位置する清水港や南に位置する焼津漁港では、既往最大の潮位を更新し、特に清水港では吸い上げ効果による水位上昇の約2倍の潮位偏差が発生したことが示唆されている（JEONら<sup>2</sup>）。これらの潮位条件と高波浪により、静岡県駿河海岸で消波ブロックの沈下や有脚式離岸堤の損傷、同清水海岸で消波ブロックの散乱が生じたほか、茨城県の高萩海岸で護岸の崩落、高知県入木海岸で海岸堤防の損傷など、広域での被害が生じた。

図 3.3 および図 3.4 に気象庁が公表する沿岸波浪実況図<sup>3</sup>を示す。

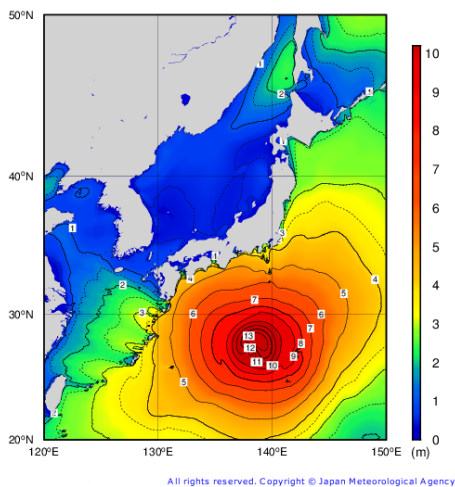
10月10日9時



10月10日21時



10月11日9時



10月11日21時

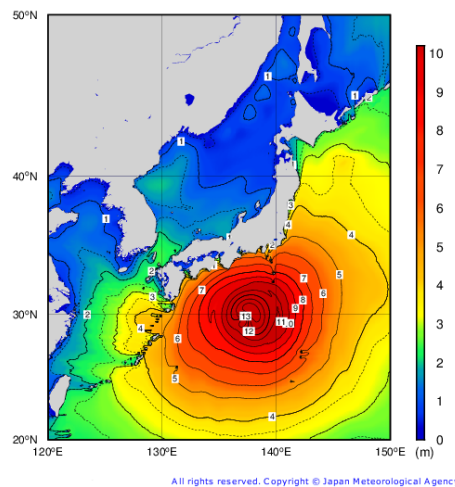
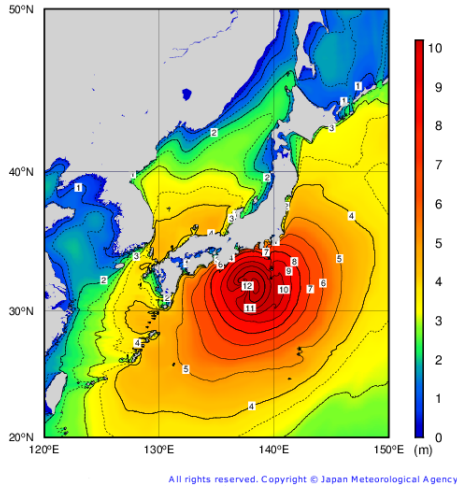
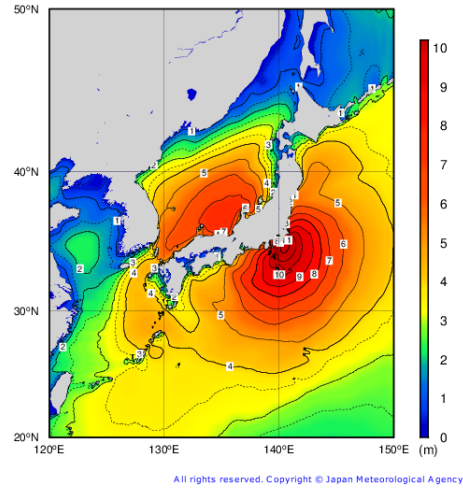


図 3.3 沿岸波浪実況図（10月10日-10月11日）、気象庁資料(2019)

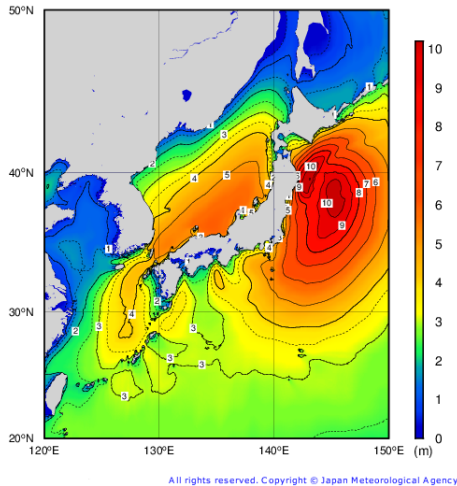
10月12日9時



10月12日21時



10月13日9時



10月13日21時

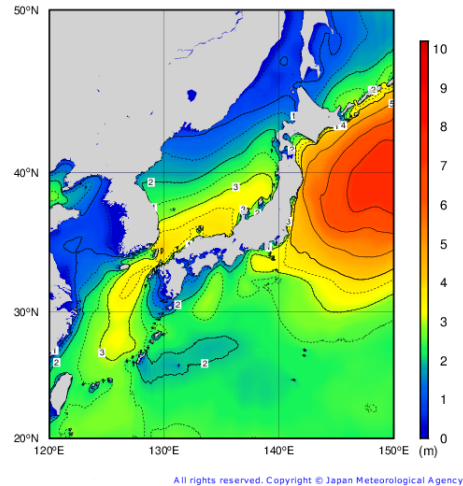


図 3.4 沿岸波浪実況図（10月12日-10月13日），気象庁資料（2019）

特に海岸域における波の特性や被害状況等については，Shimozono et al.<sup>4</sup> に詳しい。

駿河海岸の北部に位置する静岡県清水海岸では，消波堤の異形ブロックの散乱や突堤近傍での侵食により汀線が後退（図 3.5）し，水深が増したことによる越波被害や砂礫の打込み（図 3.6）が報告<sup>5</sup> をされている。また，同調査では，海岸堤防前面の海浜地盤高が台風の通過に伴って大きく低下し，基礎矢板が最大で 1.3m 露出したことも報告（図 3.7）をされている。

このように高波浪に伴い堤防前面で砂面の低下が著しく進行すると，堤防自体の安定性を損ない，同時に背後地への越波および砂礫の打上げを助長する可能性もある。

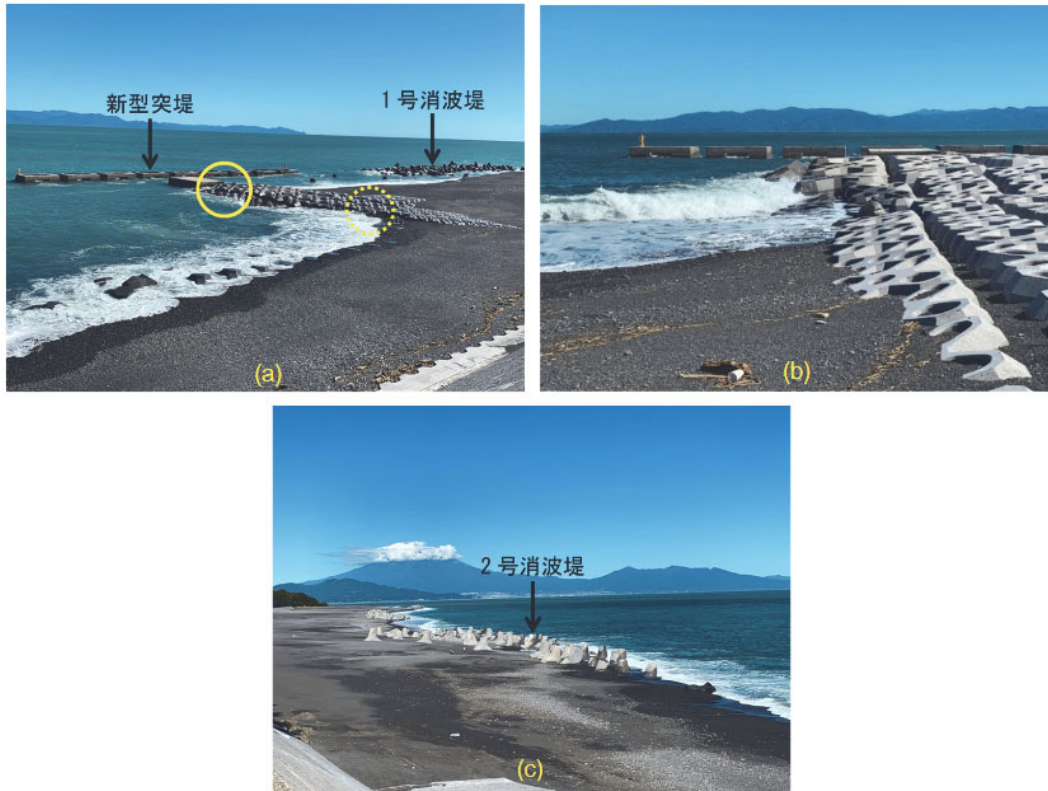


図 3.5 台風来襲直後の 2019 年 10 月 13 日の侵食状況, 藤原 (2020)



図 3.6 台風来襲直後の 2019 年 10 月 13 日の堤防越波状況, 藤原 (2020)



図 3.7 2019 年 12 月 19 日の侵食状況, 藤原 (2020)

### 3.3 遡上波の特性

本節では、令和元年東日本による駿河海岸での遡上波の特性について、観測データより検討した。

#### 3.3.1 打上げ高の算定

駿河海岸での高波被害の主な要因は、既往最大規模の高波浪が満潮と重なって生じたことにあると考えられる。駿河海洋観測所と潮位の関係を 3.8 に示す。

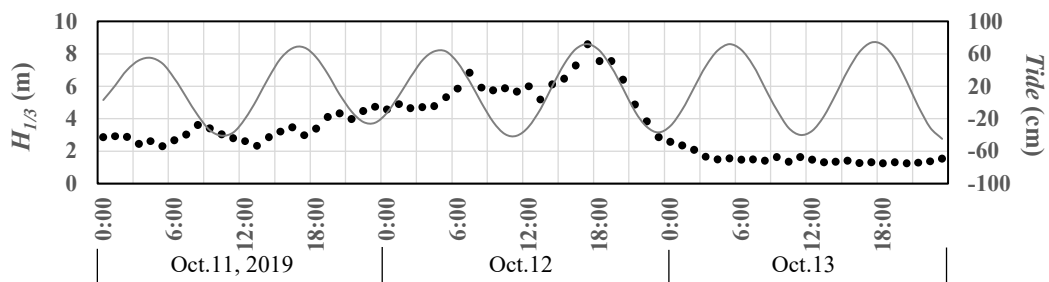


図 3.8 沖波有義波高（駿河海洋）および潮位の変動時系列

本観測期間の内、令和元年東日本台風により観測地点（堤防地点）まで到達した波浪の第一波は 10/11 17:23 に確認された。その後、潮位面の下降に伴い、一時的に遡上波が確認されなくなるが、10/12 の深夜帯から明け方にかけて潮位の上昇期に複数の波が到達す

る。期間中に観測した最大打上高は、堤防での反射の影響を受け T.P.+9.55m (容量式水位計) を記録しており、堤防高 (T.P.+7.90m) を越えた水位が観測された。

図 3.9 は、遠赤外線カメラにより撮影した夜間の波の遡上の状況である。図中、左側が沖、右側が堤防を示す。画像からも判断できる通り、遡上してくる波は外気温に対して明らかに温度が異なることから、その遡上波形を視覚的に捉えることが可能であった。また、図 3.9 に代表される通り、本観測機器は夜間や風雨等の悪天候に左右されず、安定した観測が可能であることが確認された。

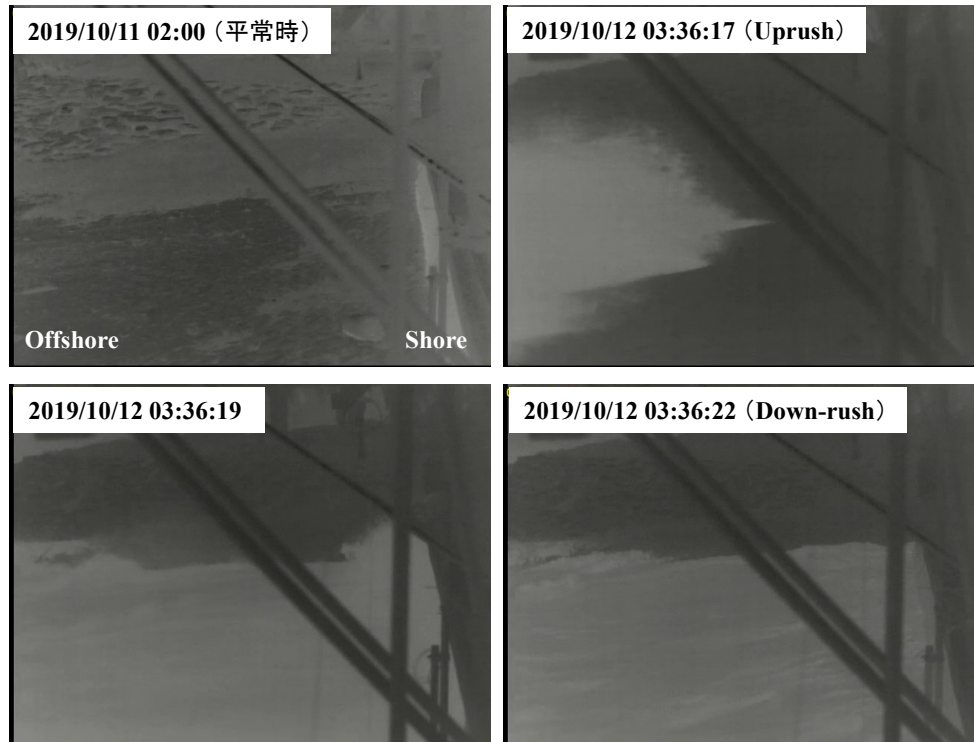


図 3.9 遠赤外線カメラでの遡上波の観測例

本観測期間中、堤防まで遡上した波は遠赤外線カメラの撮影より 60 波を確認した。遠赤外線カメラにより把握した遡上波について、超音波式水位計および容量式波高計の計測データから、個々波の波高および周期をゼロアップクロス法により定義した。個々波の定義の一例を図 3.10 に示す。

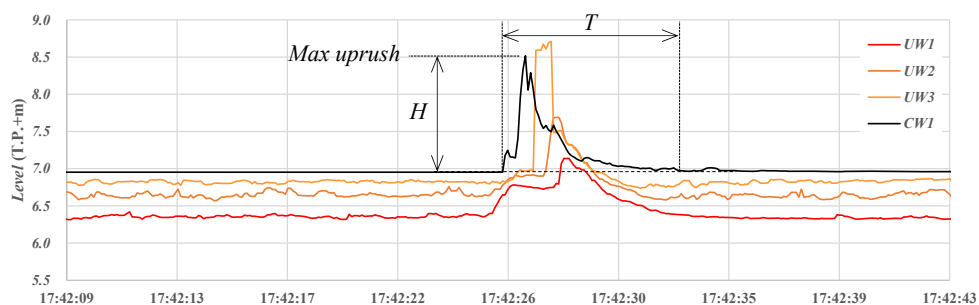


図 3.10 個々波の定義方法

観測された波の打上げ高の一覧を表3.1に示す。なお、表中空欄は観測されていない、もしくは打上げ高の計測が不可だった場合を示している。

表 3.1 観測打上げ高の一覧

No	max uprush height (time, T.P.+m)											
	CW1		UW3		CW2		UW4		CW3		UW5	
1	10/11 17:23:00.0	8.352	10/11 17:23:00.1	8.126	10/11 17:22:59.8	7.814	10/11 17:23:01.5	8.162	10/11 17:23:00.5	7.69	10/11 17:22:59.1	7.399
2	10/11 17:42:26.6	8.514	10/11 17:42:28.0	7.514	10/11 17:42:27.6	7.536	10/11 17:42:28.1	8.158	10/11 17:42:27.0	7.653	10/11 17:42:27.4	7.397
3	10/11 18:46:01.0	7.599	10/11 18:46:02.0	7.554	10/11 18:46:01.0	7.518	10/11 18:46:02.4	7.521				
4	10/11 20:07:35.1	8.933	10/11 20:07:35.1	8.389	10/11 20:07:34.8	8.476	10/11 20:07:35.9	8.132	10/11 20:07:35.1	7.963	10/11 20:07:36.1	7.901
5	10/11 23:55:38.8	7.158	10/11 23:55:39.3	7.087	10/11 23:55:38.4	7.187						
6	10/12 0:15:28.2	8.6	10/12 0:15:28.7	8.473	10/12 0:15:25.9	8.51	10/12 0:15:27.8	8.43	10/12 0:15:27.6	7.747	10/12 0:15:27.2	8.498
7			10/12 1:17:32.1	7.137	10/12 1:17:30.3	7.26	10/12 1:17:30.6	7.11			10/12 1:17:33.2	8.455
8	10/12 2:04:03.4	7.596	10/12 2:04:04.3	7.295	10/12 2:04:04.7	7.214	10/12 2:04:05.0	7.486	10/12 2:04:03.3	7.248	10/12 2:04:04.5	7.012
9	10/12 2:28:04.5	7.409	10/12 2:24:36.4	7.04	10/12 2:28:04.8	7.19						
10	10/12 2:43:42.4	7.916	10/12 2:43:43.3	7.326	10/12 2:43:41.8	7.845	10/12 2:43:42.4	7.806	10/12 2:43:43.3	7.26	10/12 2:43:42.1	7.569
11	10/12 2:49:53.5	8.084	10/12 2:49:54.1	7.517	10/12 2:49:53.4	7.487	10/12 2:49:54.7	7.227	10/12 2:49:54.2	7.167	10/12 2:49:55.1	8.432
12	10/12 2:58:15.1	7.324							10/12 2:58:14.2	7.691		
13	10/12 3:20:28.7	8.288	10/12 3:20:27.4	8.239	10/12 3:20:28.7	7.275	10/12 3:20:27.6	8.449			10/12 3:20:27.2	8.413
14	10/12 3:42:34.9	7.299	10/12 3:42:32.9	7.384			10/12 3:42:33.4	8.499	10/12 3:42:33.6	7.06	10/12 3:42:32.1	7.553
15	10/12 4:00:08.3	8.583	10/12 4:00:07.9	8.318	10/12 4:00:08.7	7.904	10/12 4:00:10.5	8.35	10/12 4:00:09.2	7.57	10/12 4:00:07.9	8.028
16	10/12 4:20:23.0	7.764	10/12 4:20:22.5	7.784	10/12 4:20:24.3	7.176			10/12 4:20:23.3	7.06	10/12 4:20:22.4	8.499
17	10/12 4:41:24.4	8.992	10/12 4:41:24.5	8.385	10/12 4:41:23.8	8.902	10/12 4:41:23.2	8.49	10/12 4:41:25.8	7.244	10/12 4:41:23.3	7.071
18	10/12 5:19:37.5	7.512	10/12 5:19:37.9	7.74	10/12 5:19:37.0	7.577	10/12 5:19:37.6	7.387	10/12 5:19:37.6	7.159	10/12 5:19:35.9	7.762
19	10/12 5:36:48.1	7.701	10/12 5:36:47.4	8.199	10/12 5:36:48.7	7.786	10/12 5:36:47.5	8.499	10/12 5:36:48.6	7.076	10/12 5:36:46.2	8.379
20	10/12 5:40:06.3	9.02	10/12 5:40:10.3	8.381	10/12 5:40:06.2	7.945	10/12 5:40:06.8	8.487	10/12 5:40:06.9	7.382	10/12 5:40:04.4	8.499
21	10/12 5:47:26.9	7.597	10/12 5:47:26.9	7.281	10/12 5:47:25.7	7.878	10/12 5:47:25.2	7.684			10/12 5:47:27.0	8.489
22	10/12 5:50:45.4	8.591	10/12 5:50:45.8	8.473	10/12 5:50:45.2	7.874	10/12 5:50:46.5	7.904	10/12 5:50:45.9	7.383	10/12 5:50:45.6	8.258
23	10/12 5:55:06.5	7.824	10/12 5:55:05.0	8.427	10/12 5:55:06.5	7.65			10/12 5:55:06.1	8.217	10/12 5:55:05.3	8.4
24	10/12 6:37:44.1	7.541	10/12 6:37:44.7	7.463	10/12 6:37:43.6	7.51					10/12 6:37:44.7	8.374
25	10/12 6:51:01.3	7.36	10/12 6:51:02.0	7.204	10/12 6:51:01.5	7.302			10/12 6:51:01.9	7.078	10/12 6:50:59.9	8.273
26	10/12 7:32:51.4	7.476			10/12 7:32:51.1	7.414						
27	10/12 8:00:27.8	7.464	10/12 8:00:26.2	7.539	10/12 8:00:27.1	7.642	10/12 8:00:27.2	8.491				
28	10/12 8:31:58.3	7.415	10/12 8:31:57.2	7.215	10/12 8:31:57.4	7.428	10/12 8:31:56.3	7.57			10/12 8:31:59.0	8.435
29	10/12 10:52:11.6	8.426	10/12 10:52:11.6	8.368	10/12 10:52:11.2	8.394	10/12 10:52:11.9	8.425	10/12 10:52:12.1	7.445	10/12 10:52:14.0	8.481
30	10/12 11:31:56.2	7.595	10/12 11:31:56.9	7.162	10/12 11:31:56.6	7.23	10/12 11:31:55.7	7.837	10/12 11:31:55.8	7.089	10/12 11:31:55.6	8.398
31	10/12 13:14:23.0	7.864	10/12 13:14:23.7	7.765	10/12 13:14:24.3	7.341	10/12 13:14:24.5	7.13	10/12 13:14:22.7	8.107	10/12 13:14:22.7	8.469
32	10/12 14:15:02.3	7.304	10/12 14:15:02.9	7.048	10/12 14:15:02.1	7.405			10/12 14:15:02.3	7.091	10/12 14:15:01.9	7.428
33	10/12 14:19:43.4	7.664	10/12 14:19:44.4	7.174	10/12 14:19:43.4	7.624	10/12 14:19:43.8	7.644	10/12 14:19:45.9	7.095	10/12 14:19:44.2	8.472
34	10/12 14:28:32.6	7.24	10/12 14:28:33.0	7.286	10/12 14:28:31.5	7.954	10/12 14:28:32.4	7.175	10/12 14:28:33.2	7.205	10/12 14:28:31.9	8.483
35	10/12 15:08:46.3	7.286	10/12 15:08:45.1	7.559	10/12 15:08:45.3	8.038	10/12 15:08:44.6	8.379	10/12 15:08:45.6	7.077	10/12 15:08:44.9	8.138
36			10/12 15:57:16.6	7.474			10/12 15:57:15.1	7.439	10/12 15:57:16.3	7.063	10/12 15:57:16.1	7.442
37	10/12 15:57:33.2	7.129	10/12 15:57:31.2	7.101	10/12 15:57:32.6	7.262					10/12 15:57:30.6	8.466
38	10/12 16:00:24.3	7.666	10/12 16:00:25.4	7.77	10/12 16:00:23.8	7.396	10/12 16:00:25.6	8.13	10/12 16:00:25.1	7.151	10/12 16:00:22.7	7.273
39	10/12 16:06:55.6	7.807	10/12 16:06:55.7	8.331	10/12 16:06:56.8	7.772	10/12 16:06:58.2	7.655			10/12 16:06:56.7	8.485
40			10/12 16:17:57.4	7.151	10/12 16:17:57.0	7.289	10/12 16:17:58.0	7.13			10/12 16:17:56.0	8.445
41	10/12 16:33:34.8	10.559	10/12 16:33:35.8	8.425	10/12 16:33:34.8	9.911	10/12 16:33:36.1	8.479	10/12 16:33:35.4	10.132	10/12 16:33:35.6	8.493
42	10/12 16:44:01.8	9.553	10/12 16:44:01.2	8.427	10/12 16:44:01.7	8.888	10/12 16:44:02.7	8.336	10/12 16:44:01.8	8.68	10/12 16:44:02.1	8.497
43	10/12 17:10:39.7	7.997	10/12 17:10:41.5	8.322	10/12 17:10:41.0	7.562	10/12 17:10:42.4	8.47	10/12 17:10:40.2	8.788	10/12 17:10:39.1	8.497
44	10/12 17:12:21.6	7.509	10/12 17:12:20.7	7.513	10/12 17:12:21.3	7.243	10/12 17:12:20.6	8.452	10/12 17:12:22.0	7.153	10/12 17:12:23.2	8.469
45	10/12 17:19:00.6	8.124	10/12 17:19:00.8	8	10/12 17:19:00.9	8.145	10/12 17:19:00.1	8.498			10/12 17:18:59.9	8.493
46			10/12 17:29:30.9	7.068	10/12 17:29:32.6	7.423	10/12 17:29:32.3	7.816			10/12 17:29:31.5	8.488
47	10/12 17:32:08.2	7.367	10/12 17:32:06.6	8.407	10/12 17:32:07.7	7.044	10/12 17:32:06.9	8.49	10/12 17:32:08.8	7.535	10/12 17:32:08.7	8.498
48	10/12 17:34:02.0	9.232	10/12 17:34:03.2	8.5	10/12 17:34:01.7	9.532	10/12 17:34:05.6	8.438	10/12 17:34:02.2	10.342	10/12 17:34:01.2	8.487
49	10/12 17:34:42.5	8.511	10/12 17:34:42.7	8.26	10/12 17:34:41.7	8.446	10/12 17:34:42.2	8.497			10/12 17:34:45.7	8.488
50	10/12 17:36:45.0	7.724	10/12 17:36:45.9	7.643	10/12 17:36:44.9	8.409	10/12 17:36:43.8	8.322	10/12 17:36:45.5	8.297	10/12 17:36:48.7	8.5
51	10/12 17:37:25.0	7.339	10/12 17:37:23.4	8.274	10/12 17:37:24.0	7.937	10/12 17:37:25.3	8.116			10/12 17:37:23.2	8.428
52			10/12 17:38:35.5	8.321			10/12 17:38:35.3	7.072			10/12 17:38:35.8	8.454
53	10/12 17:41:05.5	7.641	10/12 17:41:04.9	8.036	10/12 17:41:04.7	7.98	10/12 17:41:04.9	8.179			10/12 17:41:07.9	8.291
54	10/12 17:42:32.6	7.588	10/12 17:42:31.8	8.489	10/12 17:42:33.1	7.391					10/12 17:42:31.6	8.382
55	10/12 17:44:22.6	7.668	10/12 17:44:23.3	7.308	10/12 17:44:21.6	7.499	10/12 17:44:22.7	7.529	10/12 17:44:22.4	10.489	10/12 17:44:21.3	8.479
56	10/12 17:49:27.4	9.17	10/12 17:49:28.5	8.492	10/12 17:49:27.4	9.202	10/12 17:49:27.6	8.427			10/12 17:49:27.9	8.489
57			10/12 17:56:50.8	8.393	10/12 17:56:43.0	7.009						
58	10/12 17:58:14.0	7.136	10/12 17:58:16.5	8.498	10/12 17:58:13.6	7.18					10/12 17:58:15.7	8.487
59			10/12 18:02:58.8	8.471	10/12 17:58:13.6	7.18					10/12 18:02:58.0	8.499
60	10/12 18:05:59.5	9.081	10/12 18:06:00.9	8.47	10/12 18:05:59.7	8.655	10/12 18:06:01.1	8.44			10/12 18:06:00.7	8.45

次いで、打上げ高と沖波の関係について整理する。

堤防地点で計測した打上げ高と沖波の間に相関関係があれば、沖波を外力条件として、堤防前面の地形変化について議論をできることとなる。

例えば、波の打上げ高については、加藤ら<sup>6</sup>が国土交通省が運用する「うちあげ高予測システム」を用いて本観測結果と予測値の検証を実施している。このシステムでは、中村ら<sup>7</sup>の改良仮想勾配法および海底勾配 1/30 に対応する方法、加藤ら<sup>8</sup>が検討した海底勾配 1/100 に対応する方法、不規則波の打上げ実験の結果から得られた近似式（以下、玉田ら<sup>9</sup>の式）で計算することが可能であり、駿河海岸での東日本台風時の打上げ高を計算している。

計算結果は図 3.11 に示すとおりであり、玉田らの式（上位 2%）による推算値が観測値とほぼ一致することを示している。

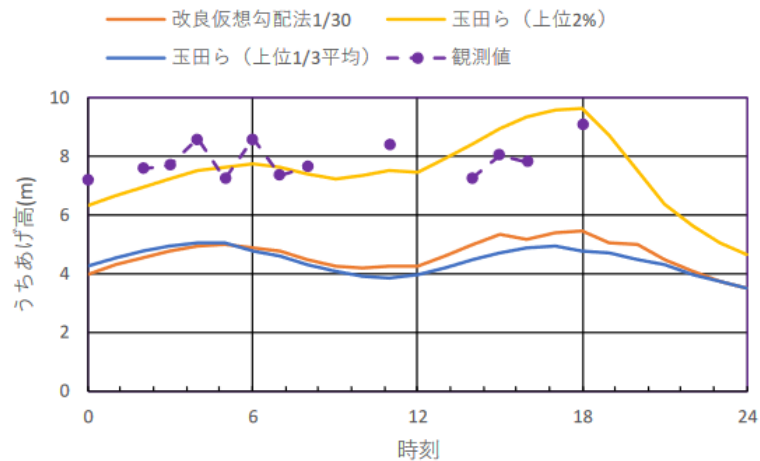


図 3.11 推算値と観測値の比較（駿河海岸，10月12日），加藤ら（2020）

なお、うちあげ高予測システムの外力条件は、沖波波高と対応する観測点近傍の波浪変形テーブルに対応して算定されており、本検討結果から沖波とうちあげ高の間に一定程度の相関性を有していることが示唆される。

### 3.3.2 遡上波の挙動

東日本台風により遡上してきた波について、その遡上特性を把握することを目的に、観測データの整理及び遠赤外線カメラによる撮影動画から STIV (Space-Time Image Velocity) による解析を実施した。

#### (1) 遡上形態の把握

堤防護岸前面での局所洗掘の発生要因には、越波した波のもどり流れが滝状に落ち込むことで進行する過程<sup>10</sup>も示されている。このため、遡上波による地形変化について議論するためには、遡上形態を把握することは非常に重要である。

本項では、本研究において取り扱う堤防前面の洗掘現象について、その水理条件を把握するため、遠赤外線カメラによる撮影動画より、遡上した 60 波の空間波形について整理した。本観測期間中に観測された遡上波の遡上の模式図を図 3.12 に示す。

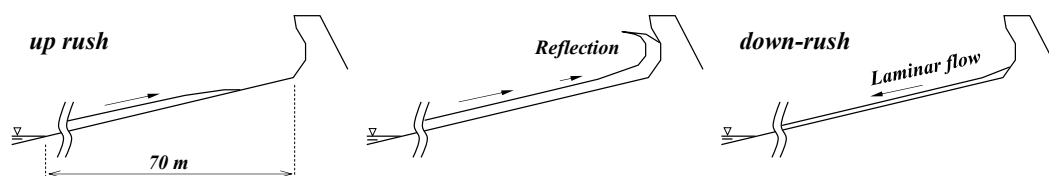


図 3.12 本研究において観測された遡上波形の模式図



図 3.13 遡上波観測結果の一例

上図に示される通り、本観測地点は堤防から汀線まで約 70m の距離を有しており、波は遡上してきた後、堤防の波返し工によって反射（砕波）する。この時、飛沫は堤内側へ一部侵入するものの、波返し工があることで、堤内側から堤外への戻り流れは生じない。砕波後には浅い水深で波が引いていく状況が確認でき、本検討対象期間を通じて、生じる地形変化は波の遡上によって生じたものと仮定できる。

## (2) 遡上速度の算定

遠赤外線カメラによって撮影した動画より、任意時間の画像を切り出し、6点の測量既知点を付加することで画像の幾何変換を行い、STIVの考え方に基づき遡上波の遡上速度の算定を試みた。

STIVはFujita<sup>11</sup>により提案された非接触の流速算定手法であり、動画映像の任意方向に検査線を設定し、検査線上の輝度値を時間軸方向に積み重ねた時空間画像(Space-Time Image: STI画像)に生じる縞模様の傾きから平均流速を求める手法である。これは、水面における波紋(遠赤外線カメラで捉える場合は水温)の移流を時間方向に画像を重ねることで捉え、その速度を評価するものである。

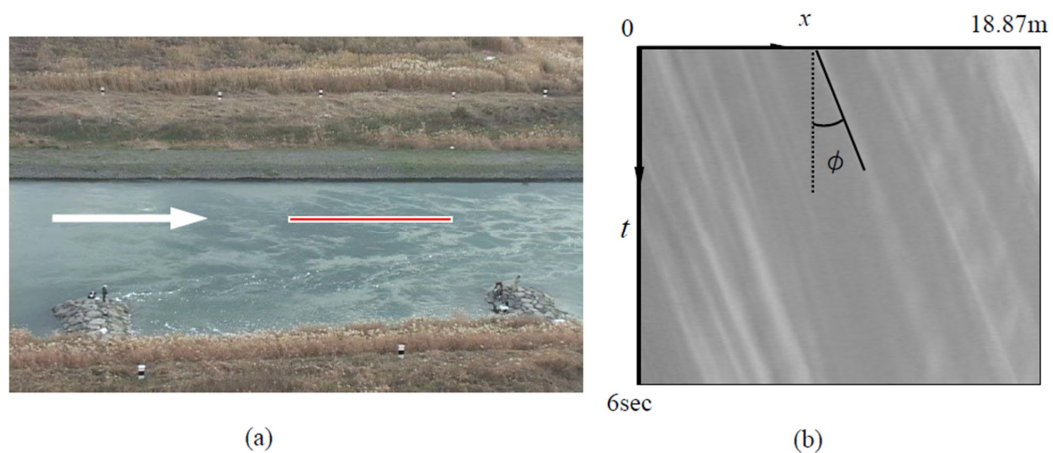


図 3.14 River surface flow image of the Uji River; (a) oblique-angled image and a searching line (b) space-time expression of brightness distribution on the searching line indicated in (a)., Fujita et al.(2007)

河川観測の分野においては流量観測のための表面流速の算定に用いられる事例が多く報告(例えば<sup>14</sup>など)されているが、海岸の遡上波に対して使用された事例は筆者の知る限り存在しない。

本項では、新たな解析手法の試みとして、波の遡上流速を算定することを目的にSTIVの考えに基づく解析を実施し、遡上波の状況の可視化を行った。

解析は取得画像に対して、堤防に直交する岸沖方向に検査線(図 3.15)を設け、取得画像のフレームレート 30Hz に対して、取得コマ画像に対して解析する。これにより、up rush および down-rush 時の遡上波速度を算定した。



図 3.15 晴天時の遠赤外線カメラの画像例と検査線（図中、赤線）

解析は、まず画像の幾何変換として、小林ら<sup>13</sup>を参考に、写真座標と空間座標の関係をとり、三次元射影変換式 (Direct Linear Transformation : DLT) により変換することで行う。三次元射影変換式は以下の通りである。

$$x = \frac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (3.1)$$

$$y = \frac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \quad (3.2)$$

ここで、 $(x, y)$  が写真座標、 $(X, Y, Z)$  が空間座標である。また、 $A, B, C$  が係数であり、未知数 11 個であるため、6 点以上の標定点の座標を両座標で与えれば、最小二乗法により係数値を決定することができる。

上式に対して、共線条件式<sup>15</sup>をもとに三次元射影変換を行う。

$$x = -c \frac{a_{11}(X_1 - X_0) + a_{12}(Y_1 - Y_0) + a_{13}(Z_1 - Z_0)}{a_{31}(X_1 - X_0) + a_{32}(Y_1 - Y_0) + a_{33}(Z_1 - Z_0)} \quad (3.3)$$

$$y = -c \frac{a_{21}(X_1 - X_0) + a_{22}(Y_1 - Y_0) + a_{23}(Z_1 - Z_0)}{a_{31}(X_1 - X_0) + a_{32}(Y_1 - Y_0) + a_{33}(Z_1 - Z_0)} \quad (3.4)$$

ここで、 $X_1, Y_1, Z_1$  : 対象物 p の地上座標、 $X_0, Y_0, Z_0$  : 投影中心（レンズ中心）の地上座標、 $c$  : 焦点距離であり、 $a_{ij}$  : カメラ角度に関する係数は式 (3.5) となる。

$$\begin{aligned}
a_{11} &= \cos \phi \cos \kappa \\
a_{12} &= -\cos \phi \cos \kappa \\
a_{13} &= \sin \phi \\
a_{21} &= \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa \\
a_{22} &= \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa \\
a_{23} &= -\sin \omega \cos \phi \\
a_{31} &= \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\
a_{32} &= \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\
a_{33} &= \cos \omega \cos \phi
\end{aligned} \tag{3.5}$$

なお、撮影方向を基準面にとることで  $\kappa$  を 0 と置くことができる。

これらの関係式より、撮影画角内の測量既知点 6 点から、三次元射影変換を実施し、検査線位置において波の遡上の先端を捉えた STI 画像を生成の上、その傾きによって、遡上波の遡上速度を算定した。

解析結果の一例として異なる時間帯における STI 画像を図 3.16 に示す。

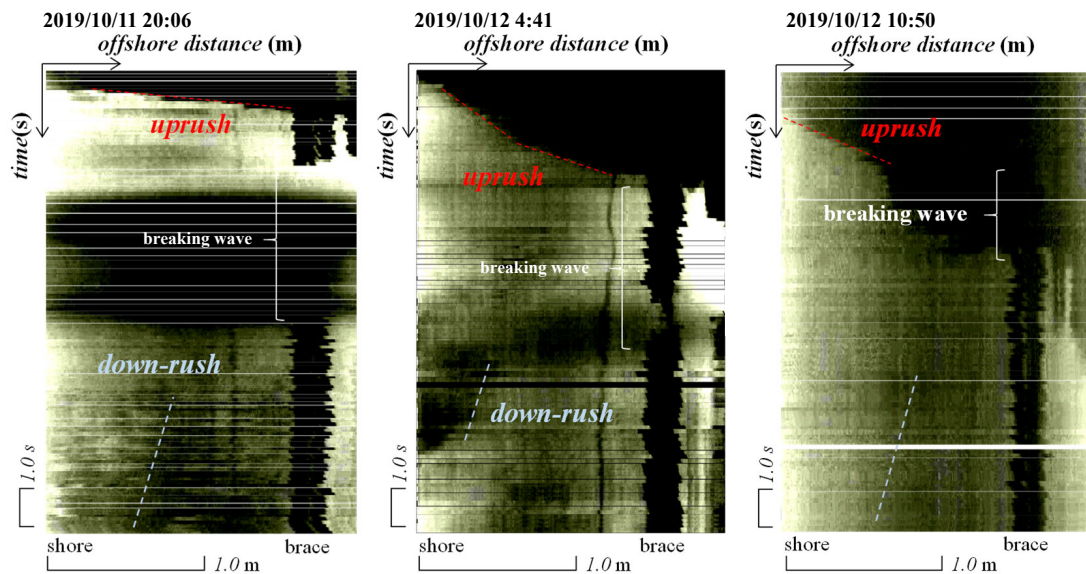


図 3.16 STIV 解析結果の一例

図 3.16 はコントラスト比を上げ、温度 (gray カラーマップ) の差を明瞭化している。なお、図中には観測機器を固定した単管が映り込むため、この領域は解析対象外の領域とした。

本研究では、STI 画像における白色帯が水面、黒色帯が砂面を示すこととなり、図中に生じる白色帯、黒色帯の境界部が遡上波の先端を示すこととなる。また、図中の破線は、水面の有無による明暗差から出現する模様 (遡上波先端部の時空間的な移動が模様として

出現)をトレースしたものであり、解析では明暗境界を画像上から画素毎に探查し、最小二乗法によって、傾き  $\phi$  を算定した。

遡上波速度の特性を把握することを目的に、観測された全 60 波に対して、STIV により算定した遡上波の流速と容量式水位計の観測打上げ高との関係 (図 3.17) を整理した。

また、図中には、Neelamani<sup>16</sup> により整理された一様斜面上での up rush, down-rush 速度の関係式を示す。なお、 $\xi_0$  は、surf similarity parameter であり、 $\xi_0 = \tan \theta / (H/L_0)^{1/2}$  である。算定に当たっては、CW1 で計測した打上げ高より、図 3.11 によりその適合性が高かった玉田らの式 (上位 2%) の関係式より入射波波高  $H$  を見積もった。

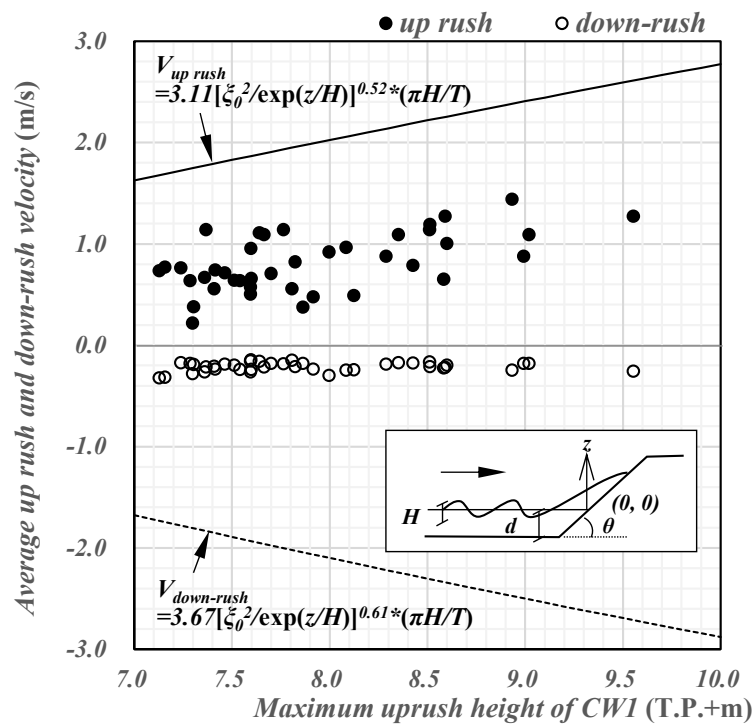


図 3.17 観測打上げ高と区間平均遡上速度 (岸向きが正) の関係

同図より、up rush 時の遡上速度は Neelamani の関係式と同程度の勾配で、観測打上げ高が大きくなるにつれ、遡上波速度が速くなる傾向が確認できる。この絶対値の差は、斜面上の粗度の影響等によるものと考えられる。一方、down-rush 時の速度は関係式とは一致せず、ほぼ一定の値を示すことが確認できる。これは、up rush 時には遡上波のエネルギーの大きさに伴い、遡上波の速度と打上げ高に比例関係があるのに対し、堤防地点で反射した際にエネルギーを逸散した後の down-rush の流れは、砂面勾配なりに薄層流で流れることに起因するものと考えられる。すなわち、堤防による反射後の down-rush 時の速度は砂面勾配が支配的であることを示唆する。

浅野ら<sup>17</sup>によれば、遡上時に岸向きに運ばれた水塊は、引き波時には薄層状の流れとなって戻ることが指摘されており、その際に浸透の影響を考慮する必要性も指摘されてい

るものの、本研究において示した down-rush 時の一定速度は浅野らの仮定と同様、現地のデータからも上記の仮説を検証することができたものと考えられる。

### 3.4 本章のまとめ

第3章では、本研究の対象外力とした令和元年東日本台風の概要について述べ、現地観測において計測したデータより遡上波の特性について詳述した。

令和元年東日本台風は、その降雨、風浪、高潮、高波等により、東海～関東～東北の広範囲で大規模な災害をもたらした。特に高波、高潮では、静岡県駿河海岸近傍の焼津漁港において既往最大潮位を更新し、清水海岸では異形ブロックの散乱や越波被害が確認をされた。静岡県駿河海岸においても駿河海洋観測所において既往最大規模の高波浪が生起し、その波が満潮と重なることで堤防近傍まで高波浪が遡上したことを示した。

この遡上波の特性を捉えるため、遠赤外線カメラの映像を整理した。

遠赤外線カメラは近年、河川の高度流量観測においてその有用性が認知されつつあるが、海岸・海洋分野での適用例がほとんどなかったことから、波浪観測への適用性の確認を併せて実施している。通常、台風に伴う高波浪時は降雨や風浪によって、光学カメラでの視認性は低く、高波浪時の状況を視覚的に確認することは難しかった。また、夜間に高波浪が来襲する可能性もあり、光学カメラでの観測には限界があったのに対し、遠赤外線カメラは物体からの放射熱を観測するため、遡上波の水温と気温の差があることで、本台風時の遡上波形をカメラによって捉えることができた。夜間の画像も鮮明に撮影できていたことを踏まえると、遠赤外線カメラへの現地観測の適用性は高いと判断できた。

この撮影映像より台風による遡上波は、当該観測地点で60波確認され、その時の超音波および容量式水位計の計測データからゼロクロスアップ法により個々波の諸元を算定した。また、遡上時の空間波形より、遡上—反射—引き波の一連の状況が確認され、水塊としての越波被害は生じていないことが確認された。

遠赤外線カメラの画像解析より、STIVによる遡上波速度の算定を試み、その適用性を検証したとともに、画角内の遡上波の up rush 時および down-rush 時の遡上速度を算定した結果、up rush 時の遡上速度は、最大打上げ高と比例して大きくなる傾向にあるが、down-rush 時の遡上速度は打上げ高に寄らず、ほぼ一定の値を示すことが分かった。これは、遡上時に有していた波のエネルギーが海岸堤防地点での反射によって逸散し、その後、砂面勾配なりに薄層流で流れる過程が想定され、堤防により反射した後の down-rush 時の流れは砂面勾配に規定されることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 令和元年台風第 19 号による被害等, 国土交通省資料, 令和元年 11 月 22 日.
- 2) JEON jonghyeok, 富田孝史, 中村友昭, 堀池昌生, 市野智一: 清水港および焼津漁港における台風 Hagibis による高潮・高波被害に関する現地調査, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76, No.2, pp. I.983-I.988, 2020.
- 3) 台風第 19 号による大雨, 暴風等, 災害をもたらした気象事例, 気象庁, 令和元年 10 月 15 日.
- 4) Takenori Shimozono, Yoshimitsu Tajima, Kenzou Kumagai, Taro Arikawa, Yukinobu Oda, Yoshinori Shigihara, Nobuhito Mori and Takayuki Suzuki : Coastal impacts of super typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka areas, Japan, Coastal Engineering Journal, Volume 62, Issue2, 2020.
- 5) 藤原健史, 大石一貴, 宇多高明: 台風 19 号時の高波浪による清水海岸の侵食と越波被害, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 76, No.2, pp. I.318-I.323, 2020.
- 6) 加藤史訓, 福原直樹: 現地観測による 2019 年台風 19 号接近時のうちあげ高予測の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76, No.2, pp. I.841-I.846, 2020.
- 7) 中村 充, 佐々木泰雄, 山田譲二: 複合断面における波の打上げに関する研究, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp.309-312, 1972.
- 8) 加藤史訓, 笹岡信吾, 諏訪義雄, 山本浩之, 松藤絵理子, 上原謙太郎, 富田雄一郎: 現地観測によるうちあげ高算定方法の検証, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.711-715, 2010.
- 9) 玉田 崇, 間瀬 肇, 安田誠宏: 複合断面に対する波の不規則性を考慮した打上げ高算定法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.936-940, 2009.
- 10) 野口賢二, 佐藤慎司, 田中茂信: 津波遡上による護岸越波および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.296-300, 1997.
- 11) Fujita I. : Discharge Measurements of Snowmelt Flood by Space-Time Image Velocimetry during the Night Using Far-Infrared Camera, Water 2017, 9, 269, 2017.

- 12) Ichiro FUJITA, Hideki WATANABE, Ryota TSUBAKI : Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique : The space-time image Velocimetry (STIV), International journal of river basin management , 5 (2) : pp. 105-114, 2007.
- 13) 小林範之, 渡邊明英, 野谷靖浩, 藤田一郎 : 画像解析による河川流速計測の適用性向上と効率化に向けた撮影・標定技術の開発, 河川技術論文集, 第 21 巻, 2015.
- 14) 渡辺 健, 大森嘉郎, 藤田一郎, 井口真生子, 長谷川誠 : STIV 方による流量観測の不確かさ評価, 河川技術論文集, 第 27 巻, pp. 7-12, 2021.
- 15) 津留宏介, 村井俊治 : デジタル写真測量の基礎～デジカメで三次元計測をするには～, 社団法人 日本測量協会, 2011.
- 16) S.Neelamani : Subareal wave pressures, layer thicknesses, run-up and run-down velocity on sea walls, Indian Journal of Marine Sciences, Vol.34(3), September 2005, pp.299-309, 2005.
- 17) 浅野敏之, 米永敏之 : 前浜砂層内の浸透流を考慮した波打ち帯の漂砂の解析, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp.511-515, 2000.

## Appendix 遠赤外線カメラによる遡上波の算定

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 1*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 2*



*Wave No. 3*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 4*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 5*



*Wave No. 6*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 7*

*up rush*

*down-rush*

00:00:16:26



00:00:19:27



*Wave No. 8*

00:00:53:00



00:00:55:29



*Wave No. 9*

00:00:51:17



00:00:54:10



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 10*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 11*



*Wave No. 12*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 13*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 14*



*Wave No. 15*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 16*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 17*



*Wave No. 18*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 19*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 20*



*Wave No. 21*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

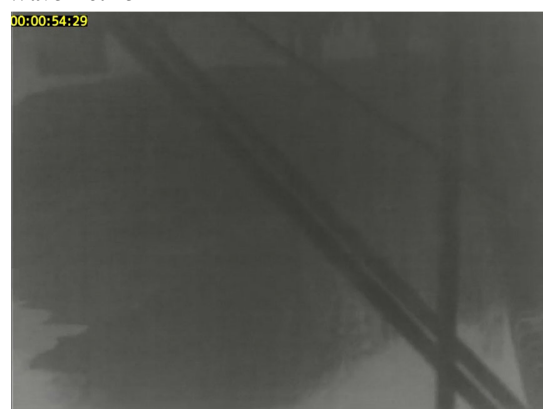
*Wave No. 22*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 23*



*Wave No. 24*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

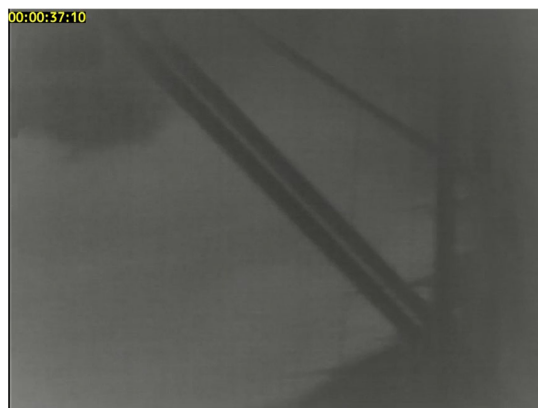
*Wave No. 25*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 26*



*Wave No. 27*



遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 28*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 29*



*Wave No. 30*



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 31*

*up rush*

*down- rush*



*Wave No. 32*

※コントラスト比変更



*Wave No. 33*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 34*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 35*

※コントラスト比変更



*Wave No. 36*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 37*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 38*

※コントラスト比変更



*Wave No. 39*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 40*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 41*

※コントラスト比変更



*Wave No. 42*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 43*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 44*

※コントラスト比変更



*Wave No. 45*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 46*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 47*

※コントラスト比変更



*Wave No. 48*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 49*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 50*

※コントラスト比変更



*Wave No. 51*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 52*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 53*

※コントラスト比変更



*Wave No. 54*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 55*

*up rush*

*down- rush*



*Wave No. 56*

※コントラスト比変更



*Wave No. 57*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

遠赤外線カメラによる遡上波の計測

*Wave No. 58*

*up rush*

*down-rush*



*Wave No. 59*

※コントラスト比変更



*Wave No. 60*

※コントラスト比変更



※コントラスト比変更

## 第4章 高波浪時における堤防前面の地形変化過程

本章では、令和元年東日本台風により生じた駿河海岸の堤防前面での地形変化について、その三次元的な変化傾向を観測結果から明らかにするとともに、時空間的な進行過程について詳述する。

### 4.1 本章の概要

令和元年東日本台風による堤防前面の地形変化過程を明らかにすることを目的に、台風前後の現地確認および測量を実施し、地形変化状況を確認した。また、超音波式水位計の特性（砂面露出時には砂面鉛直位置を、遡上波が存在する時には水面変動を観測することが可能）を利用して、地形変化の時間的发展を評価した。

台風後の現地状況より、観測地点周辺の砂浜に生育していた樹木は倒木し、堤防上には砂浜に由来すると考えられる砂利が打ち上げられているなど、前章に示す通り大きな外力が来襲したことを確認した。また、観測地点周辺の砂面は20-50cm程度低下しており、沿岸方向に勾配を持って砂面低下が生じていた。すなわち、岸沖方向、沿岸方向に一樣な勾配を持った海岸に対して高波浪が作用し、三次元的な地形変化の挙動を示したことを示唆している。

この地形変化について、面的に配置した5基の超音波式水位計のデータから、遡上波前後の砂面高を算定し、地形変化の時間的な進行過程を評価した。地形変化は、潮位の上下降に応じた遡上波の到達数により、その傾向が変化するが、沿岸方向に一樣で岸沖方向で砂面勾配が急勾配化する時間帯と、侵食が一気に進行し、沿岸方向で勾配を持ちながら、岸沖方向で緩勾配化する時間帯があり、特に高波浪の後半において三次元的な挙動が進行したものと考えられた。

この時の地形変化過程を詳細に分析することで、第5章で詳述する波、流れと地形変化の関係に対する検討の基礎データを整理するものである。

## 4.2 台風前後の現地状況

台風前後の地形変化状況として、台風接近前（2019/9/11）および台風通過後（2019/10/15）の海岸状況は、図 4.1 および図 4.2 に示すとおりであり、観測機器周辺においては特に北側において極端な砂面の低下が確認され、観測機器下部に繁茂していた海岸植生もフラッシュされていた。観測機器下面では、表層部の細かな砂利が輸送されており、設置時と比較してやや粗粒化しているような傾向が確認された。図 4.1 の状況より、南測線、中央測線位置で 20cm、北測線位置においては 50cm 程度の砂面低下が生じていることが確認できる。

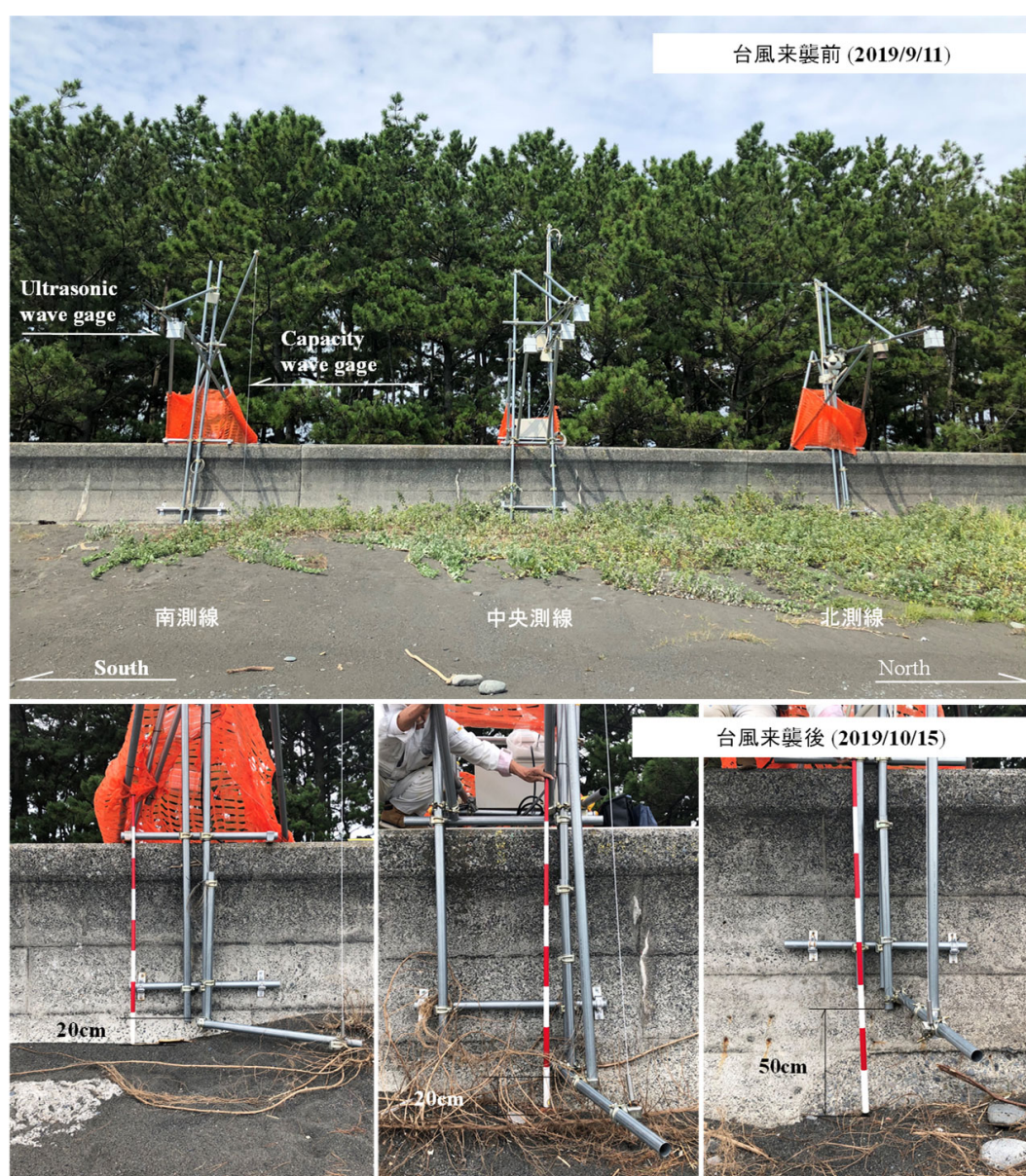


図 4.1 台風前後の地形変化状況



図 4.2 台風後の海岸状況

台風後の前浜の状況は図 4.3 および図 4.4 に示すとおり、ほぼ一様な勾配の砂面が形成されていることが確認できる。また、北側の写真より堤防の痕跡（コンクリート表面の色の差）から、大きく砂面が低下した様子が確認できる。南側には、堤防から砂浜にせり出した護岸が配置されており、そのすぐ沖側に消波ブロック済みの消波堤が設置されている。このことから南側では波の消波効果および沿岸漂砂の遮断により、侵食はしにくい形状であったが、北側では消波機能を有する構造物はなく、沿岸方向の漂砂の供給も期待できないため、著しい砂面の低下が生じたものと考えられる。



図 4.3 前浜の状況（観測点沖より北側を臨む）



図 4.4 前浜の状況（観測点沖より南側を臨む）

また、観測地点周辺では、砂浜に生えていた樹木が倒木（図 4.5）し、周辺の砂面高も低下していた。



図 4.5 樹木の倒木状況

観測機器の堤内側においては、堤防天端上に大量の砂利が打ち上げられている状況（図 4.6）が確認された。背後地には砂利の供給源はなく、19号通過後の砂浜の構成材料（表層）が、砂利であることを踏まえると、波浪によってうちあげられたことが想定される。



図 4.6 台風通過後の堤防天端状況

### 4.3 砂面高の算定

本観測システムにおいて採用した超音波式水位計は、砂面露出時には砂面鉛直位置を、遡上波が存在する時には水面変動を観測することが可能である。すなわち、一波の前後で地形高を算定することにより、(計測誤差を含むものの)一波ごとの砂面変化高を評価することが可能となる。

本研究では砂面高の算定として、超音波式水位計の計測結果より、波を計測した時間の前後5秒間の計測値の平均値をとることで砂面高と定義した。

観測値の時系列の一例および砂面高の定義の概念を図 4.7 に示す。

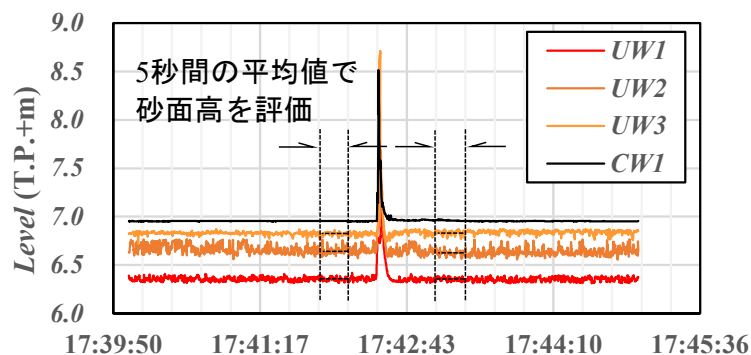


図 4.7 超音波水位計からの砂面高の算定例

算定した各観測地点の砂面高より、高波浪前後での地形の空間分布を岸沖方向（図 4.8）および沿岸方向（図 4.9）でそれぞれ算定した。なお、岸沖方向では堤防地点を原点とし、岸向きを正、沿岸方向では中央測線を原点とし、北向きを正としている。台風後の 2019 年 10 月 24 日には RTK-GNSS による測量を実施しており、計測結果を同図中に併せて付記し、参考に平成 15 年時の周辺地形の（測線 No.14）の岸沖方向の測量成果を示す。

図中の超音波式水位計から算定した高波浪後の断面地形と測量値はほぼ一致をしており、砂面高の算定は妥当であると判断できる。

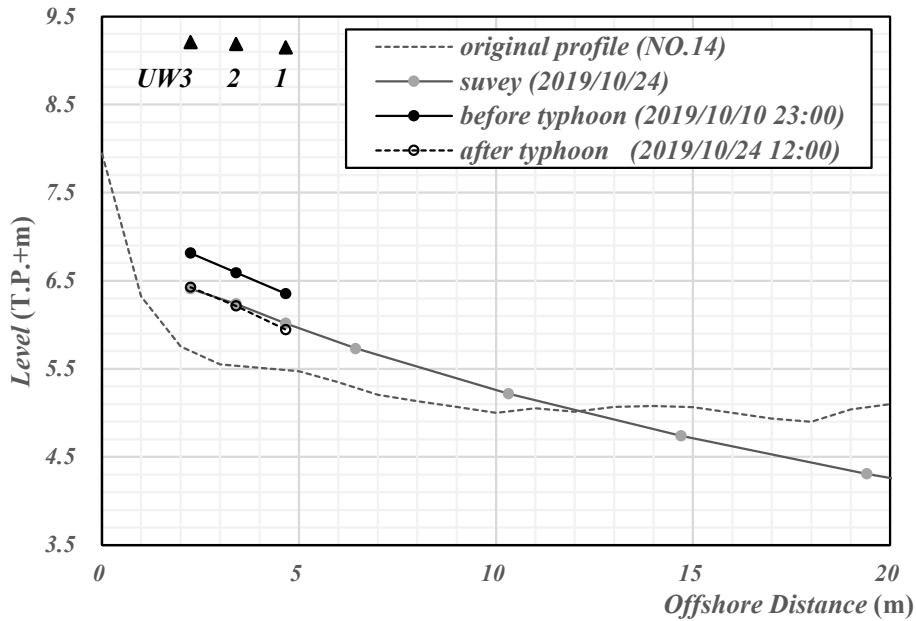


図 4.8 東日本台風前後の岸沖断面図（岸向きを正）

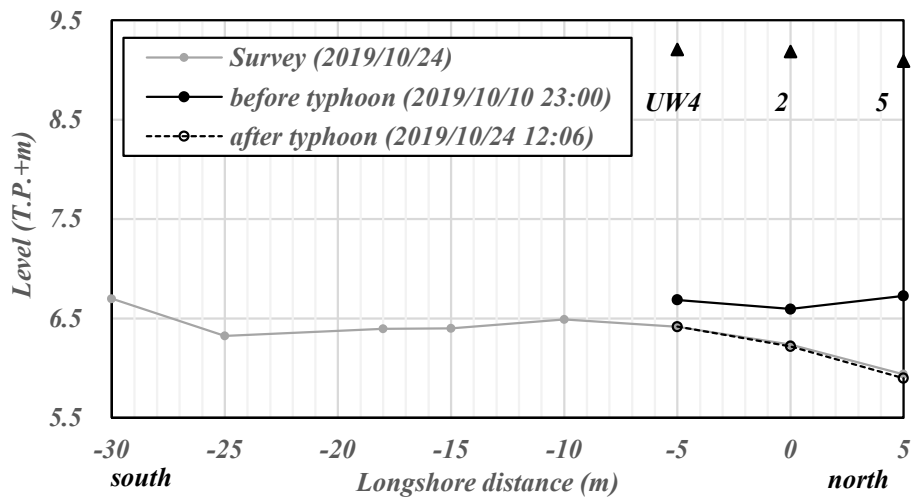


図 4.9 東日本台風前後の沿岸断面図（北向きを正）

図 4.8 より、岸沖方向では平成 15 年以降、堤防前面で砂利の堆積による砂面高の上昇が進行していたが、台風後には砂面が一様に低下している傾向が確認できる。また、図 4.9 より、沿岸方向では南測線および中央測線ではほぼ一様に砂面低下していたのに対し、北測線は他測線に比べ、明らかに砂面低下が進行していることが確認できる。なお、この傾向は、図 4.3 でも述べた通り、北に向かうに従って、低下量が大きくなっていったものと推察される。

この傾向から、高波浪後には沿岸方向に勾配を持つこととなり、高波浪前の地形に対して、三次元的な侵食が生じていたことが明らかである。

## 4.4 三次元的な地形変化の進行過程

本節では、計測データより高波浪中の堤防前面における時空間的な地形変化の進行過程について検討した。なお、岸沖方向および沿岸方向のそれぞれの地形変化過程より、三次元的な地形変化過程について言及する。

### 4.4.1 砂面の時間変化

堤防前面において生じた三次元的な地形変化について、遡上してきた波により地形変化が生じたと仮定し、波の通過後の砂面高（図 4.7 における波形観測後の砂面高）を算定し、砂面変動の時系列を作成した。砂面変動時系列を図 4.10 に示す。なお、第 2 章で詳述した通り、10/12 18:11 時点で観測が一時中断したが、図中では、電源復旧後の 10/24 12:00 時点の観測点の高さと線を結んでいる。この高さの推移より 10/12 18:11 時点で形成された地形によって侵食はほぼ終了していることが確認でき、本観測の観測時間で十分に地形変化傾向を把握できるものと考えた。

この差面高の時間変化より、低下の進行速度には時間的な差異があることが確認できる。砂面変動時系列より、明らかに外力である遡上波の到達数により進行過程に差異が生じる傾向が確認できる。すなわち、より岸側まで波が遡上しやすい条件となる満潮時に遡上波数が多くなり、砂面の低下が進行、潮位が下がる際には遡上波の数が少なくなり、砂面の変動の感度は悪くなる。

以上より、本研究では、この進行速度に応じて地形変化過程を 4 つのステージに区分した。なお、砂面低下が進行する過程において、St.2 では、最も岸側に設置される UW3 を除く、超音波式水位計においてほぼ様な速度で砂面低下が確認される。一方、St.4 においては、St.2 と比較して砂面低下の速度が早いのに加え、UW3、UW5 では、明らかに他の超音波水位計とは異なり、満潮に近い時間帯において、一気に砂面の低下が進むことが確認できる。

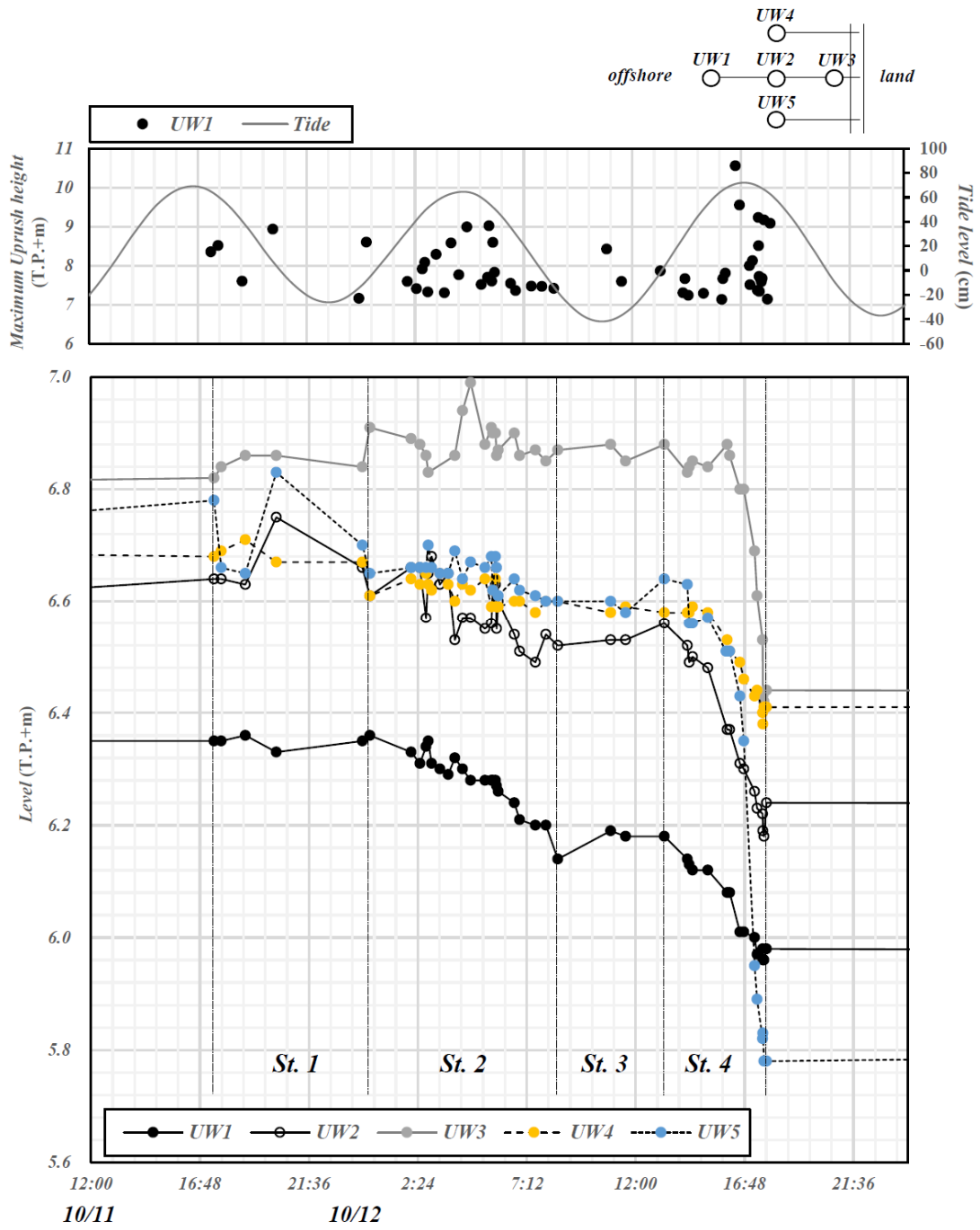


图 4.10 砂面変動時系列

#### 4.4.2 砂面の空間変化

設定したステージ間の地形変化状況を確認するため、断面地形および沿岸地形の空間的な変化を整理した。断面地形図を図 4.11 に示す。

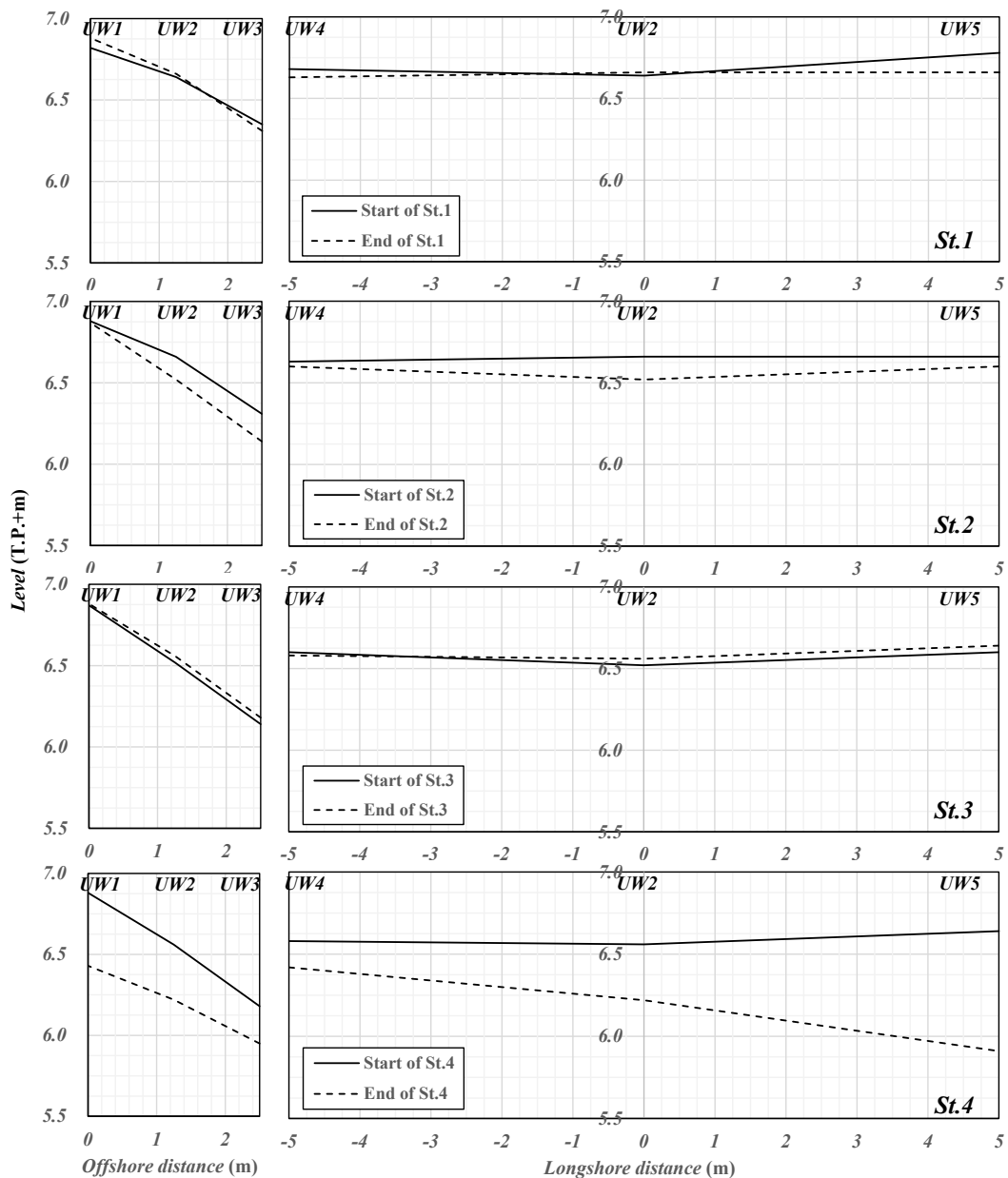


図 4.11 各ステージにおける断面地形図（左：岸沖方向，右：沿岸方向）

断面地形図より、St.1 および St.3 は、ほとんど変化が生じない区間であり、空間的な差も小さい。一方、St.2 および St.4 では砂面低下が進行する時間帯であり、ステージ終了後の地形は St.2 で急勾配化、St.4 で緩勾配化する傾向にある。また、St.1 から St.3 にかけては中央測線の最も岸側の計測点である UW1 について、ほぼ砂面の高さは変わらないが、St.4 の時間帯において一気に進行した。一般に、高波浪後の砂面勾配はバームの侵食等に

伴って、緩勾配化することが示唆されている<sup>例えば1</sup>が、堤防前面においても外力の到達状況に応じて、砂面勾配は一時的に急勾配化したのち、緩勾配化する進行過程があるものと考えられる。

以上より、地形変化の状況から各ステージの特徴を表4.1にまとめる。

表 4.1 地形変化の特徴

区分	波数	岸沖方向	沿岸方向
St. 1	6	ほとんど変化は生じない	ほとんど変化は生じない
St. 2	20	沖側で徐々に砂面低下が進行、急勾配化	中央測線で徐々に砂面低下
St. 3	3	ほとんど変化は生じない	ほとんど変化は生じない
St. 4	31	岸側を含め一気に砂面低下が進行し、緩勾配化	全体で砂面低下が進行、特に北測線で顕著に砂面低下

## 4.5 本章のまとめ

第4章では、高波浪時における海岸堤防前面での地形変化の過程を明らかにすることを目的に、令和元年東日本台風による駿河海岸での地形変化挙動について、観測データより詳細な分析を行った。

第3章において詳述した遡上波の条件により、駿河海岸の観測地点では約24時間のうちに20 - 50cmの砂面低下が確認され、その形状は沿岸方向に勾配を持つなど、高波浪後には三次元的な地形を形成していることが確認された。

この地形変化の進行過程を評価するため、超音波式水位計から一波ごとに遡上前後の砂面高を定義し、その砂面高の時間、空間変化を整理した。本期間中においては、潮位の上下降により、砂面低下の進行速度に差異が生じていたことから、地形変化を4つのステージに区分し、各ステージの特徴を把握した。

まず、地形変化過程は満潮時に遡上波が堤防地点まで遡上しやすい条件により生じることが明らかであった。これは駿河海岸において飛砂による地形変化の影響は小さいことを示唆するものでもある。また、侵食が進行するSt.2およびSt.4においては、潮位面の高い時に遡上波が堤防近傍まで到達しやすくなることで進行するが、その進行過程は一様に砂面低下が進行する期間(St.2)と、沿岸方向に勾配を持つような三次元的な地形変化が生じるような期間(St.4)があることが確認された。

また、区分したステージ後に形成される岸沖方向の砂面勾配は、St.2で一時的に急勾配化、St.4で岸側を含む計測点で一気に砂面低下が進行し、緩勾配化する傾向があった。

## 参考文献

- 1) 岡本 弘, 田方俊輔, 水口 優 : 高波浪時における汀線付近の地形変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) , Vol.67, No.2, pp.I-74-I-80, 2011.

## 第5章 三次元的な地形変化と波，流れの関係

本章では，高波浪時において海岸堤防前面で生じる三次元的な地形変化と外力としての波，流れの関係について議論する．

### 5.1 本章の概要

第5章では，第4章において区分した地形変化のステージを基に，特に砂面の低下が進行した St.2 および St.4 について，波と地形変化の関係として，高波浪後に形成される砂面勾配と沖波の関係を，また，流れと地形変化の関係として，既往の漂砂量モデルでの比較を行い，地形変化と波，流れの定量的な関係を明らかにすることを試みた．

まず，地形変化の過程として，各ステージで形成される砂面勾配に着目し，その勾配と直前の沖波の関係について検討した．砂面勾配は沖波の増大に伴って急勾配化する傾向が St.1 から St.3 にかけて一部確認できたものの，St.4 では，この関係が成立せず，外力との単純な比較では現象を説明し得ないことがわかった．

次いで，岸沖漂砂量のモデルについて，遡上波と漂砂量の間を調べ，St.2 では岸沖漂砂量モデルとの間に良好な関係が確認できたことから，一様に砂面の低下が進行する状況下では既往モデルの妥当性を説明することができた．一方，三次元的な地形変化過程を呈する St.4 においては，既往モデルとの間には相関性がなく，岸沖方向の漂砂移動ではやはり現象を説明できないことが確認できた．

上記を踏まえ，三次元的な地形変化の進行過程を把握するため，遠赤外線カメラにより撮影した動画から，STIV による沿岸方向への流れの可視化を行い，各ステージでの遡上波の挙動を評価した結果，St.4 において down-rush 時の流れが沿岸方向に卓越する傾向を確認した．この時の流れの変化過程を動画により推察すると堤防際に繁茂していた海浜植生がフラッシュしたことで，その地点の砂面が低下し，その低下した砂面に沿って沿岸方向の流れが卓越することで，局所的に侵食が進行した変化過程を明らかにした．

海浜植生はこれまで飛砂の抑制や海岸環境の形成，保全に寄与すると考えられ，また，植生があることで侵食への抵抗となることが指摘されていたが，流出するほどの外力が生じた際には，海浜植生が侵食を助長する可能性があることを指摘した．

これらを踏まえ，岸沖および沿岸方向での遡上波速度を条件とした Shields 数の概念に基づく簡易な漂砂量モデルを提案し，現地データとの比較からその有用性を確認した．

## 5.2 岸沖方向の砂面勾配と波の関係

遡上域の海岸侵食を特徴づける一つの指標として砂面勾配がある。既往研究より高波浪による侵食終了時には、平衡地形として緩勾配斜面が形成されることが示唆されており、前浜に形成されるバームも侵食され、岸沖方向に一様な砂面勾配が形成されることがわかっている。また、波による地形変化は、既往研究によれば、主に非碎波で遡上する長周期波が寄与していることが示唆されており、岡本ら<sup>1</sup>は、高波浪終了後に形成される地形勾配に着目し、平衡勾配の形成条件について現地観測データと比較の上、波形勾配と波高粒径比の関数との相関性を示唆している。また、村上ら<sup>2</sup>は模型実験から非碎波遡上域の波と地形変化の関係について考察し、非碎波で遡上する波によっても平衡勾配が形成されること、遡上域においては高波浪初期の岸沖漂砂量によって、急勾配化もしくは緩勾配化の傾向が決まること等を示唆した上で、平衡勾配に関する経験式を提案している。すなわち、物理的な解釈に一部課題はあるものの、沖波の条件より汀線近傍の砂面勾配を説明し得ることを示唆している。

ここでは、令和元年東日本台風による駿河海岸での地形変化の過程を明らかにすることを目的に、沖波と砂面勾配の関係に着目し、侵食の進行に伴い形成される砂面勾配と直前の沖波の関係について検討した。遡上波来襲後の岸沖方向の砂面勾配  $\tan \beta$  を一波ごとに算定し、この砂面勾配は当該時間に作用した波により形成された平衡勾配であると仮定した上で、沖波と比較した。ただし、本観測地点直近の駿河海洋観測所では、周期が公表されていないため、代替として、静岡御前崎沖の NOWPHAS<sup>3</sup> (20 分間隔の波浪データ) を参照している。なお、駿河海洋観測所と御前崎 NOWPHAS の関係として同時刻帯の有義波の比較結果は図 5.1 の通りであり、概ね同様の傾向があるものと考えられる。

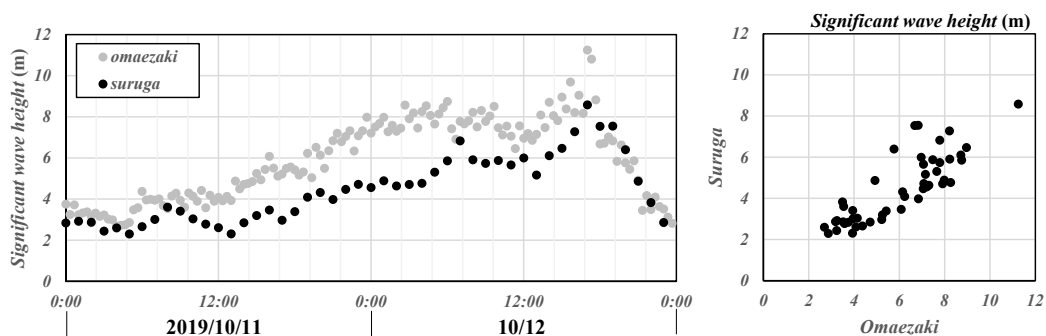


図 5.1 駿河海洋観測所と御前崎 NOWPHAS の関係

ここでは、御前崎 NOWPHAS の沖波条件を外力として砂面勾配との関係を論ずる。

高波浪後に海浜に形成される平衡勾配を規定する 1 つの支配要因である沖波の疑似波形勾配  $H_0/gT^2$  と地形勾配の関係を図 5.2 に、もう一つのパラメータとして粒径・波高比  $D_{50}/H_0$  の関係を図 5.3 に示す。なお、代表粒径  $D_{50}$  は当該地点近傍の粒径調査結果を参考に、1.00mm とした。また、同図中には砂面勾配の時間的な発展を矢印で示している。

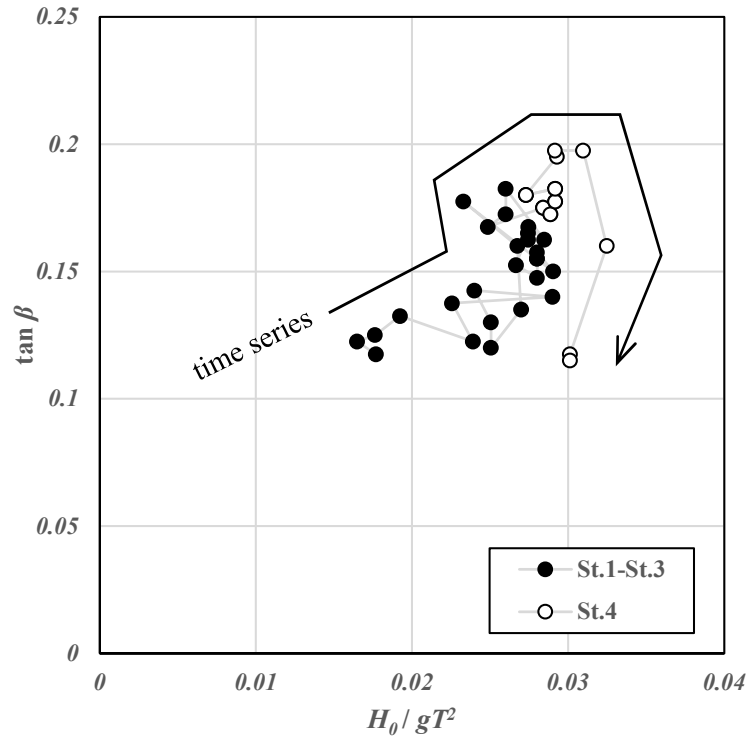


図 5.2 砂面勾配と疑似沖波波形勾配の関係

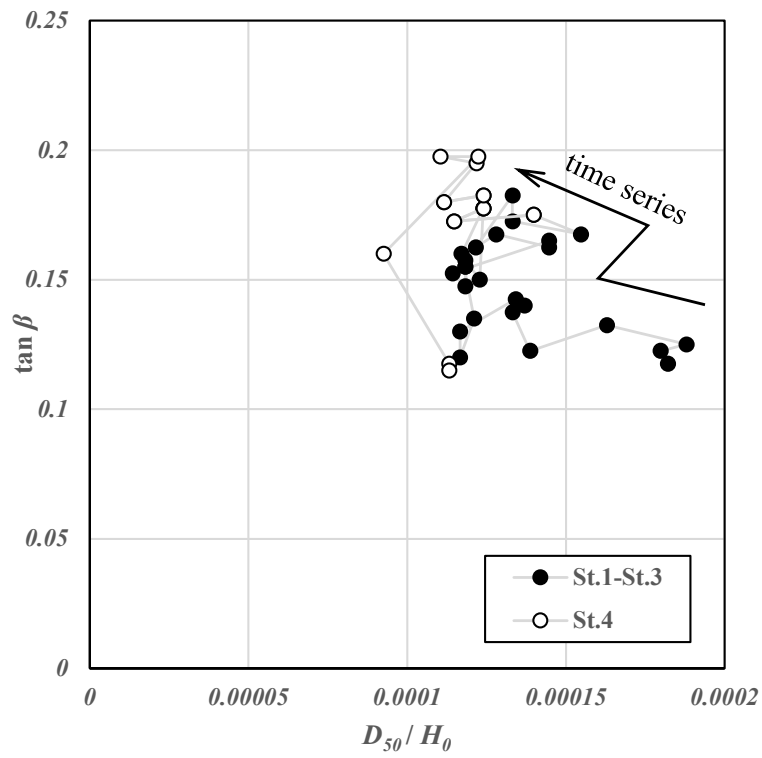


図 5.3 砂面勾配と粒径・波高比の関係

図 5.2 から、特に St.1 から St.3 の時間においてバラつきは大きいものの、沖波の波形勾配が大きくなるにつれ、形成される砂面勾配は急勾配化する傾向が確認できる。一方で、St.4 においては、波形勾配に依存せず、砂面勾配が緩勾配化することとなる。

図 5.3 からは、St.1 から St.3 において粒径・波高比が小さくなる（沖波波高が大きくなる）と砂面勾配が大きくなる一方で、St.4 では沖波条件に寄らず、一気に緩勾配化するという傾向がある。ただし、データはバラついており、傾向はあるものの、明瞭な相関関係は確認できない。

また、汀線付近の地形変化は、砕波せず遡上する長周期波成分が寄与していることが複数の既往研究<sup>例えば5,6</sup>において、指摘されている。

そのため、上記検討のうち、長周期波成分の寄与を評価するため、本田ら<sup>7</sup>を参考に、沖波の観測結果より以下に示す 2 次の関係式 (5.1) を用いて長周期波の波高を見積もった。

$$H_L = a(H_s T_s)^2 + b(H_s T_s) + c \quad (5.1)$$

ここで、 $H_L$ ：長周期波高、 $H_s$ ：有義波高、 $T_s$ ：有義波周期であり、 $a, b, c$ ：回帰係数である。式 5.1 に対し、NOWPHAS の 4 年分（2005～2008）の波浪観測結果からの検証より、以下に示す回帰係数が提案されている。

表 5.1 回帰係数，本田ら（2013）より抜粋

観測点	$a(\times 10^{-5})$	$b(\times 10^{-3})$	$c(\times 10^{-2})$
御前崎	3.058	4.088	3.784

本研究でも上記提案値を採用し、静岡御前崎沖の観測結果より長周期波高を算定の上、砂面勾配と長周期波の疑似波形勾配  $H_L/gT^2$  および粒径・長周期波高比  $D_{50}/H_L$  との関係それぞれ整理した。

長周期波の疑似波形勾配との関係を図 5.4 に、粒径・長周期波高比との関係を図 5.5 に示す。

算定結果より長周期波の諸量に対しても砂面勾配の応答は、有義波を用いた場合の関係と概ね同様の傾向であった。駿河海岸は沖合に向けて急峻な地形であり、波の変形に対しては大きな影響は出にくいため、沖波での評価がある程度可能であると考えられる。ただし、データはややバラつき、その関係性は明瞭なものではなかった。これは、本検討での地形変化は自然海浜での遡上現象ではなく、地形変化過程に堤防での反射の影響を含むことが関係すると考えられる。

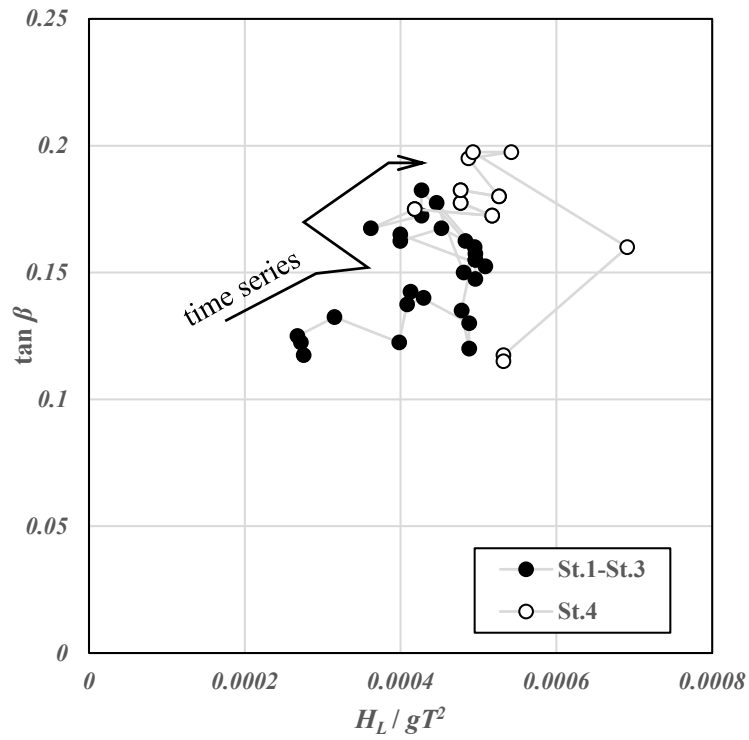


図 5.4 砂面勾配と疑似長周期波形勾配の関係

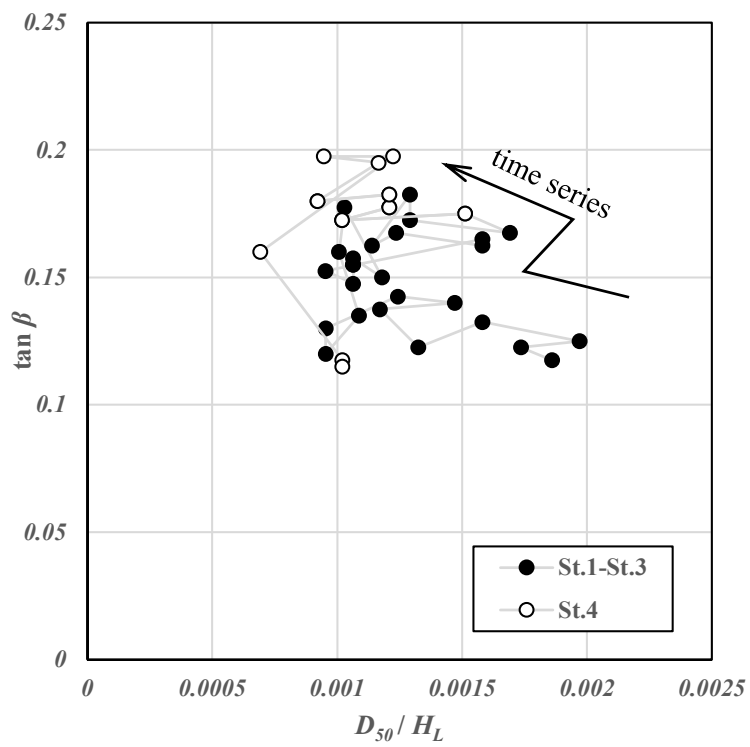


図 5.5 砂面勾配と粒径・長周期波高比の関係

続いて、Sunamura<sup>4</sup>を参考に、次元解析により算定された波と周期、底質粒径の関数（以下、砂村の関係式と称す）と砂面勾配の関係について、検討した。

砂村の関係式を式(5.2)に示す。

$$\tan\beta = \gamma \left( \frac{H_B}{T\sqrt{gD_{50}}} \right)^{-0.5} \quad (5.2)$$

ここで、 $\gamma$ ：係数（0.12）、 $H_B$ ：碎波波高であるが、本研究においては碎波波高の代わりに、波の代表値として沖波有義波高  $H_0$  および長周期波の波高  $H_L$  を用いた。

なお、岡本ら<sup>1</sup>により提案された長周期波との関係式（以下、岡本らの提案値と称す）は、式(5.3)のとおりである。

$$\tan\beta = 0.00028 \left( \frac{H_B}{T\sqrt{gD_{50}}} \right)^{-3.6} \quad (5.3)$$

波浪条件に静岡御前崎沖の有義波高および推定した長周期波の波高を用いた場合の砂村の関係式との比較を図5.6に示す。なお、図中には岡本らの提案値を併せて示す。

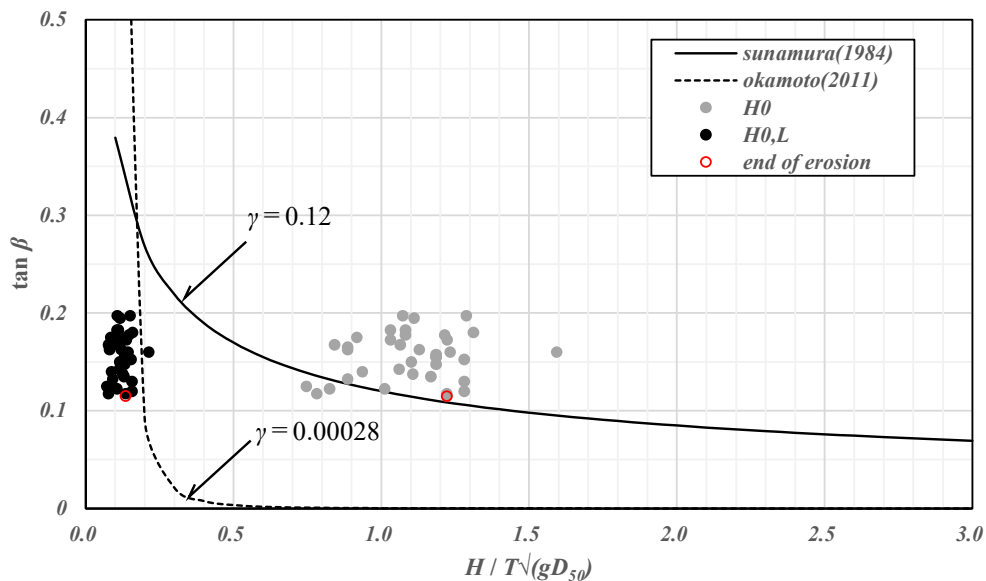


図 5.6 砂面勾配と砂村の関係式

高波浪（一波ごと）に対して形成される砂面勾配は、全体的に砂村の関係式より大きく算定されるが、地形変化（侵食）の終了時に形成される砂面勾配（図中、赤丸）は、砂村の関係式の値とほぼ一致する。このことは、最大遡上点付近で形成される地形勾配は、概ね直前の波の波浪条件により規定される可能性を示唆している。一方、長周期波の波高を用いた場合の関係は、岡本らが提案する傾向とは一致するが、値はバラつく結果となった。

以上より、高波浪に伴い進行する岸沖方向の砂面勾配の変化は、St.1 から St.3 にかけて、沖波の増大に伴い、急勾配化する傾向が確認された。一方で、St.4 の過程においては、こ

の関係は成立せず、沖波の波高規模によらずに緩勾配化する傾向となった。このことから、St.4 の三次元的な地形変化は、岸沖方向の仮定に基づく沖波の条件では説明し得ない現象であったことが明らかとなった。

### 5.3 岸沖漂砂量モデルの検証

遡上域における地形変化の過程は、波と流れおよび漂砂の移動が相互に関係し、進行するものと考えられる。そのため、本項では、現地での計測データから見積もった岸沖漂砂量と漂砂量モデルにより算定した計算値を比較し、流れと地形変化の関係について定量的な検討を行った。

高波浪時における遡上域付近での砂の移動は、第3章でも詳述したとおり、比較的浅い水深の流れで輸送されることから、準定常的な掃流砂が支配的であると考えられる。そのため、この岸沖漂砂量について、山口<sup>8</sup>らを参考に、Shields 数の考え方にに基づき、砂面勾配の影響を考慮したせん断応力と摩擦力の比をとることで、式(5.4)を整理した。

$$\psi_m = \frac{\frac{1}{2}\rho f U^2 \frac{\pi}{4} d_{50}^2 \mp \rho s g \sin \beta \frac{\pi}{6} d_{50}^3}{\rho s g \mu \cos \beta \frac{\pi}{6} d_{50}^3} \quad (5.4)$$

ここで、 $\psi_m$ ：斜面勾配の影響を考慮した Shields 数、 $\rho$ ：水粒子の密度、 $f$ ：波による底面摩擦係数、 $\mu$ ：底質の動摩擦係数、 $d_{50}$ ：中央粒径、 $\beta$ ：遡上域の勾配のなす角、 $U$ ：水粒子の速度、 $s$ ：水中比重、 $g$ ：重力加速度である。式(5.4)を整理すると式(5.5)となる。

$$\psi_m = \frac{3f}{4\mu \cos \beta} \left( \frac{U^2}{sgd_{50}} \mp \frac{4 \sin \beta}{3f} \right) \quad (5.5)$$

上式のうち、 $\beta \ll 1$  とみなし、砂の動き易さを表現するパラメータとして Nielsen<sup>9</sup> を参考に斜面勾配の効果を取り入れた修正 mobility number  $\Psi_u$ 、 $\Psi_d$  を式(5.6)のように定義する。

$$\begin{aligned} \Psi_u &\equiv \frac{U_u^2}{sgd_{50}} - \frac{4}{3f}\beta \\ \Psi_d &\equiv \frac{U_d^2}{sgd_{50}} + \frac{4}{3f}\beta \end{aligned} \quad (5.6)$$

上式中、添字の  $u$  は up rush を、 $d$  は down-rush をそれぞれ示す。水粒子の速度  $U$  には、第3章で算定した up rush, down-rush 時の遡上速度を用いて算定した。

ここで、掃流砂量モデルとして従来の考えに倣い、式(5.6)の3/2乗によって、up rushとdown-rushの継続時間を考慮することで個々波による岸沖漂砂量モデルを式(5.7)のように定式化した。

$$q_x = \alpha (T_u \Psi_u^{1.5} - T_d \Psi_d^{1.5}) \quad (5.7)$$

ここで、 $\alpha$ ：係数 ( $m^2/s$ )、 $T$ ：周期 (波浪観測値の継続時間であり、添字  $u$  は up rush の継続時間を、 $d$  は down-rush の継続時間を示す； $s$ )、 $q_x$ ：一波毎の単位幅あたりの岸沖漂砂量 ( $m^3/s$ ) である。

また、実測の漂砂量は、観測データから想定した一波毎の断面地形の差分より、砂の連続式から算定した。

砂の連続式は、任意領域において式(5.8)で表現される。なお、岸沖方向は沖向きを正、沿岸方向は北向きを正とする。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) \quad (5.8)$$

ここで、 $q$ ：岸沖漂砂量 ( $m^2$ )、 $z$ ：鉛直方向の高さ ( $m$ )、 $\lambda$ ：空隙率であり、添え字の  $x$  は岸沖方向、 $y$  は沿岸方向を示す。式(5.8)を後退差分により空間方向に離散化することで、式(5.9)を得る。

$$\frac{z_i^n - z_i^{n-1}}{\Delta t} = \frac{1}{(1-\lambda)} \left( \frac{q_{x,i}^n - q_{x,i-1}^n}{x_i - x_{i-1}} + \frac{q_{y,i}^n - q_{y,i-1}^n}{y_i - y_{i-1}} \right) \quad (5.9)$$

このうち、沿岸方向を無視し、式5.9より複数台の水位計から算定した地盤高の差分より、一波当たりの岸沖漂砂量を算定した。なお、岸沖方向の岸側端部は堤防地点とし、通過量をゼロとした。また、沖側端部での通過漂砂量として評価した。

岸沖漂砂量モデルと一波当たりの岸沖漂砂量の関係を図5.7に示す。ただし、平均粒径  $d_{50}$  は実績の調査結果を基に 1.00 mm とし、水中比重  $s=1.65$  とした。底面摩擦係数  $f$  は、Puelo・Holland<sup>10</sup>より遡上域での値として 0.02 とした。図5.11より、特に砂面低下が進んだ St.2 および St.4 では、岸沖漂砂量モデルと計測値から算定した岸沖漂砂量に正の比例関係が見られた。その相関性は、St.2 で良好であるが、St.4 ではバラつきが大きい。係数  $\alpha$  および相関係数を表5.2に整理する。

以上より、St.2では実測の岸沖漂砂量と岸沖漂砂量モデルの間に良好な相関関係があり、沿岸方向で一様に砂面が低下する時間帯においては、漂砂の移動を岸沖方向で評価することが可能であることが示された。一方、St.4については、実測値とモデルによる計算値の相関性は低く、岸沖漂砂の移動では、三次元的な地形変化過程を説明し得ないことが確認できた。

表 5.2 係数値と相関係数（岸沖漂砂量モデル）

区分	$\alpha$	相関係数
St.1	$0.4 \times 10^{-4}$	0.226
St.2	$6.0 \times 10^{-4}$	0.652
St.3	$-0.6 \times 10^{-4}$	0.458
St.4	$2.0 \times 10^{-4}$	0.303
St.1-4	$2.0 \times 10^{-4}$	0.361

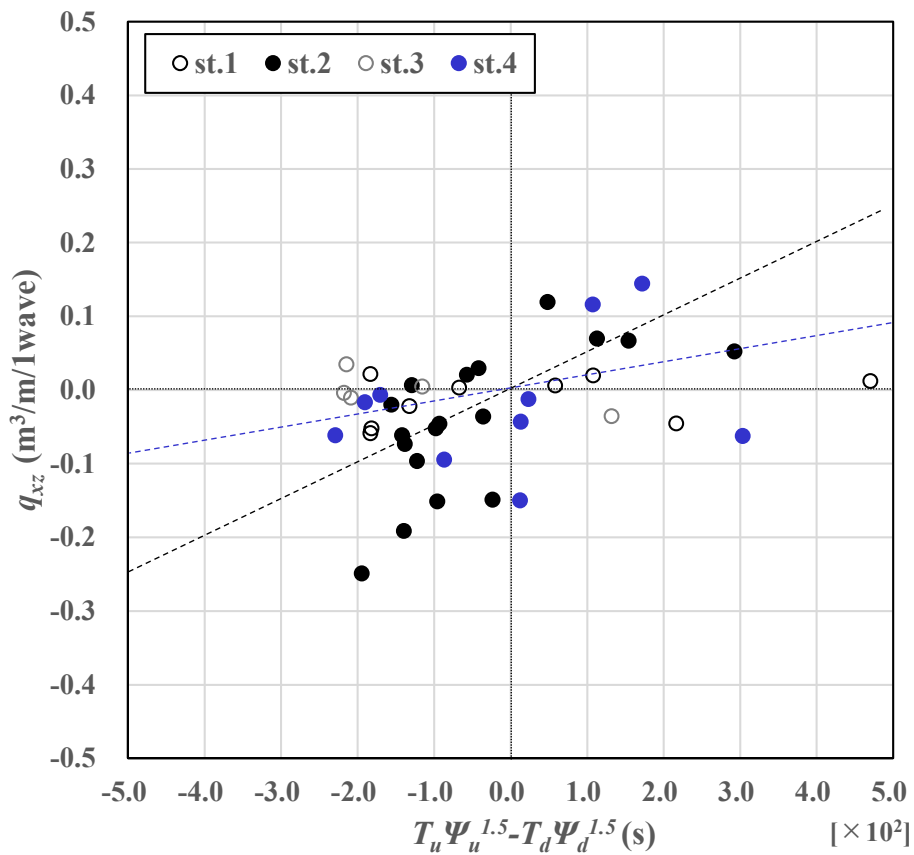


図 5.7 岸沖漂砂量モデルと一波当たりの岸沖漂砂量の関係

## 5.4 流れと地形変化の関係

砂面勾配の変化，岸沖漂砂量に基づく検討では，St.2において地形変化と波，流れの間に良好な関係が認められたものの，地形変化の三次元性が強まる St.4においては，その過程を十分に説明し得ないことがわかった。

そのため，各ステージにおける流れの状況の差について確認をするため up rush, down-rush 時の遡上波を第 3 章にて詳述した STIV を用い，沿岸方向について画像解析を行うこ

とで、地形変化との関係について検討した。

解析は、遠赤外線カメラの撮影画角に対して、新たに沿岸方向の測線を設置し、任意の検査線として図 5.8 のとおり設定した。



図 5.8 晴天時の遠赤外線カメラの画像例と検査線 (図中、赤線が岸沖方向、水色線が沿岸方向の検査線を示す)

解析結果として、各ステージにおいて同程度の打上げ高 (CW1 の観測結果より波高 1.5-2.0m 程度) を観測した波の時空間画像を図 5.9 から図 5.12 に示す。

また、沿岸方向の解析結果は up rush 時の波によって一時的に画像内の水域の占有率が大きくなり、解析上の誤差が生じることから、down-rush 時の結果のみを記載した。

解析結果より沿岸方向では、St.1-St.3 にかけて、概ね down-rush 時に一様の縦模様が出現することがわかる。これは傾き  $\phi$  が十分に小さく、沿岸方向の流れ成分がほぼ生じていないということを意味する。対して、St.4 では、明らかに斜め方向の縞模様が出現し、傾き  $\phi$  を持つことから、沿岸方向、すなわち南から北方向への流れが卓越していることがわかる。

St.1 から St.3 と比較して St.4 では明らかに down-rush 時の沿岸方向の流れが卓越しており、この間に生じた三次元的な地形変化の挙動に対して、影響しているものと考えられる。つまり、down-rush 時の流れと地形変化の関係が相互に影響することが示唆されるものである。

**St. 1 : 2019/10/11 20:06**

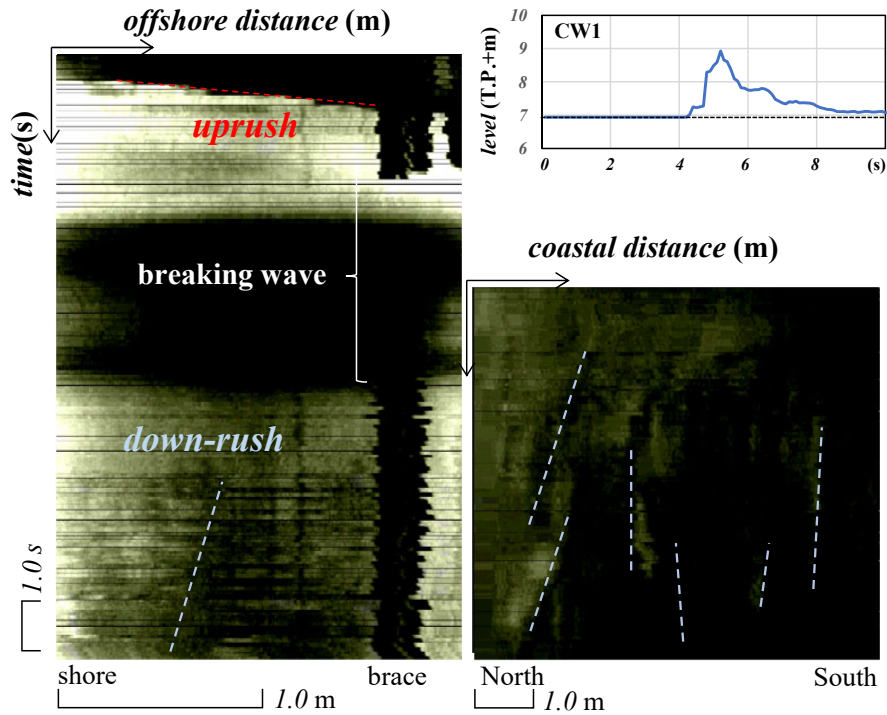


図 5.9 検査線における時空間画像 (St.1, コントラスト比 1.9 倍)

**St. 2 : 2019/10/12 4:41**

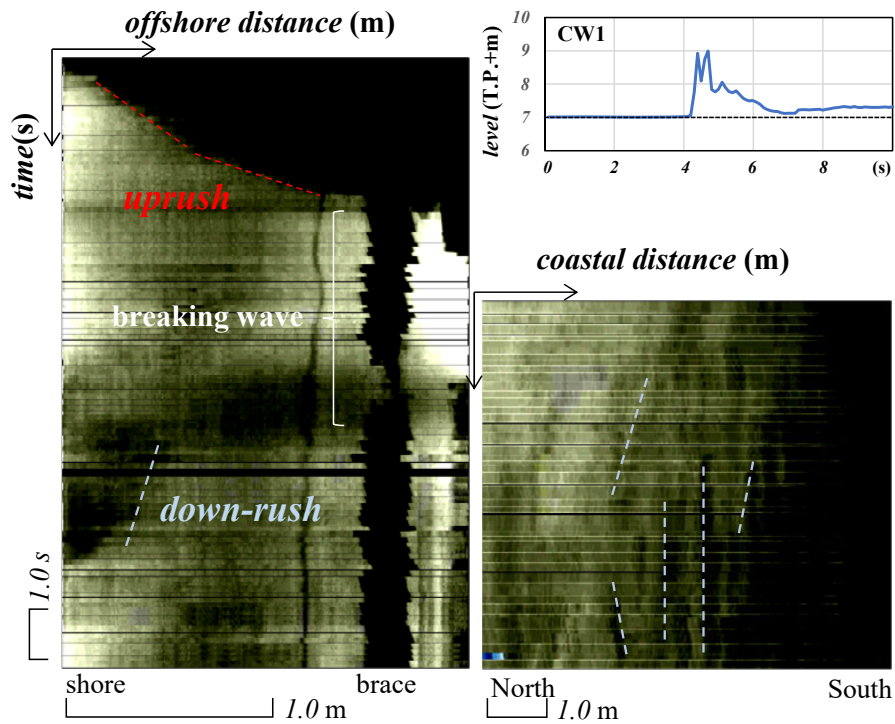


図 5.10 検査線における時空間画像 (St.2, コントラスト比 1.9 倍)

**St. 3 : 2019/10/12 10:50**

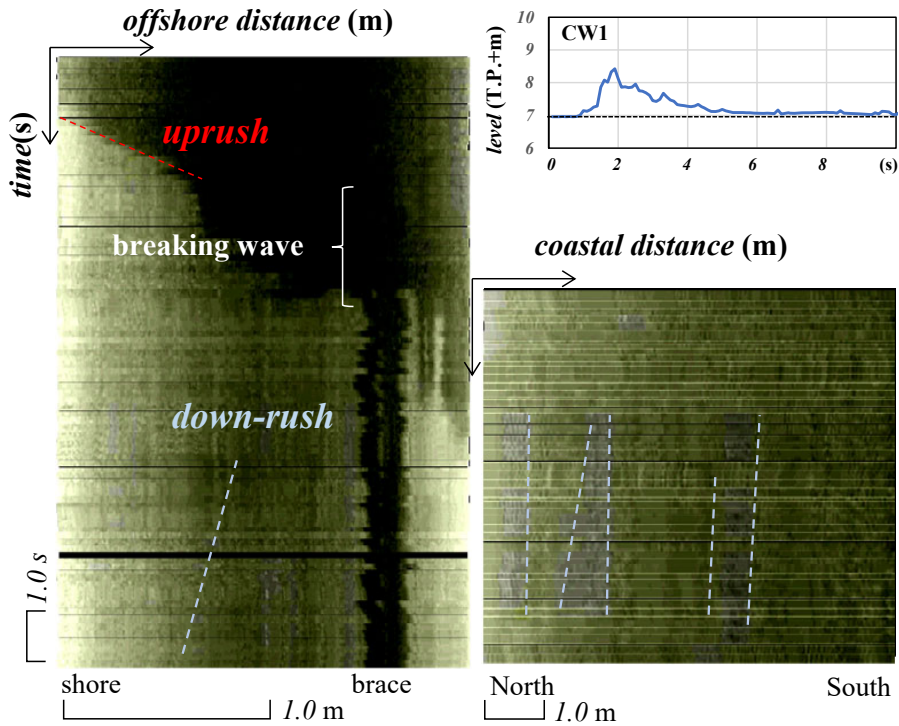


図 5.11 検査線における時空間画像 (St.3, コントラスト比 1.9 倍)

**St. 4 : 2019/10/12 17:34**

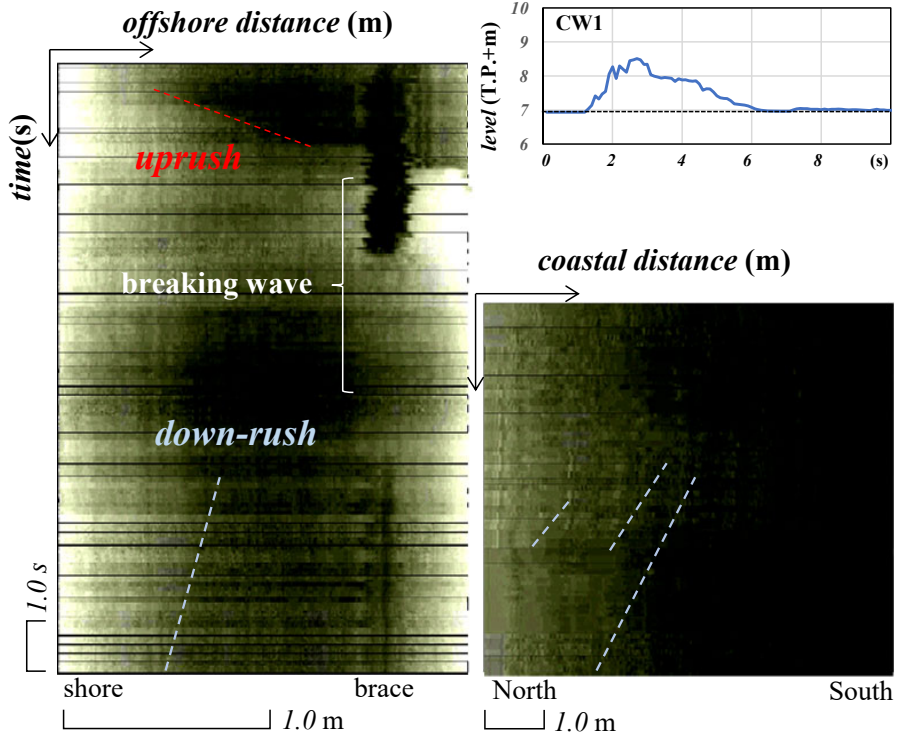


図 5.12 検査線における時空間画像 (St.4, コントラスト比 1.9 倍)

## 5.5 三次元的な地形変化の進行過程について

駿河海岸を例とした高波浪時における堤防前面での三次元的な地形変化過程について、特に沿岸方向の流れが卓越した St.4 に着目し、その時の遠赤外線カメラの画像から進行過程の整理を行った。

まず、堤防付近の波の遡上について、前浜が存在する海岸においては、up rush 時には沿岸方向の影響は小さく、ほぼ一様に遡上する。対して、down-rush 時には、砂面の微地形なりに流れるため、地形の影響を受けて、沿岸方向への流れが卓越する場合も認められる。この詳細な過程については、第3章の appendix を参照されたい。

地形変化について、本観測では St.4 において、ある時刻を持って特に中央測線岸側に位置する UW3 および北測線の UW5 で急激な砂面の低下が生じた。この時の遠赤外線カメラの動画を確認すると、波の遡上によって堤防前面に繁茂していた海浜植生がフラッシュされたことが確認された。(St.4 での撮影動画では、地表面温度差が小さく、遠赤外線カメラから詳細な地被判読ができなかったため、St.3 における撮影動画と高波浪後の現地状況の比較より、St.4 で海浜植生のフラッシュが生じていたと判断した)

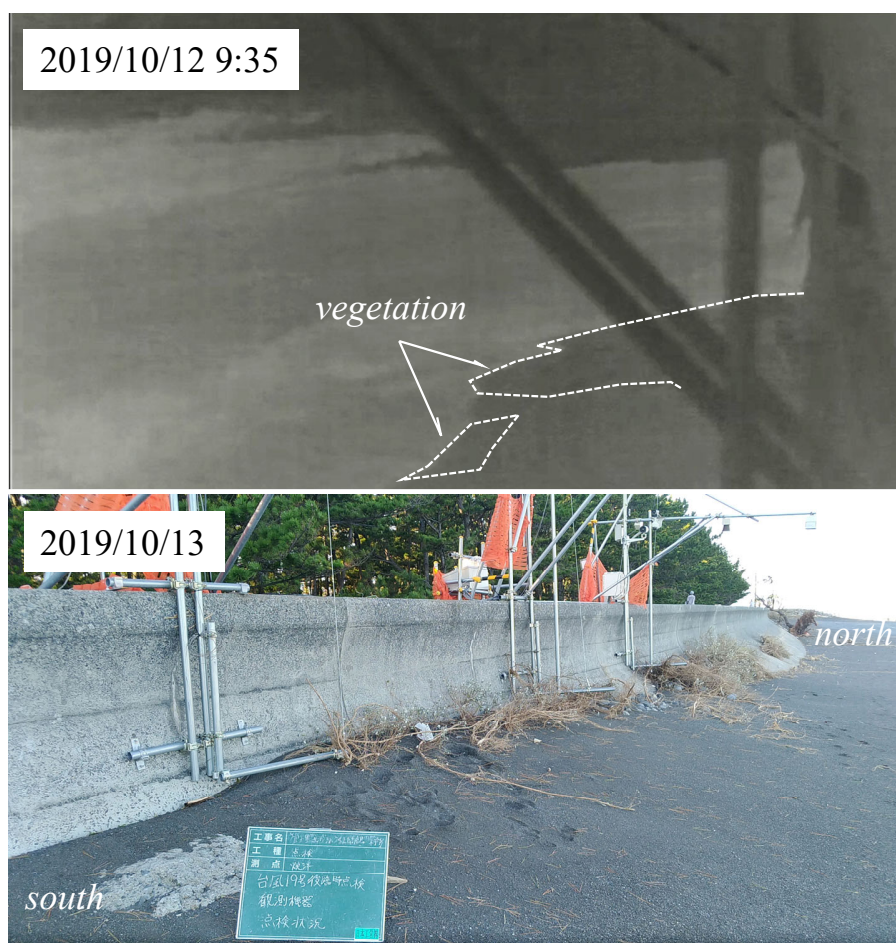


図 5.13 海浜植生の存在状況

原野ら<sup>11</sup>の研究では、海浜植生の現地サンプリング調査と高流速下における海浜植生の耐侵食性評価に関する水理実験が実施されており、全国的な海浜植生の根量密度は地表から10cmまでの範囲にある場合が多く、その深さ以上に砂面の低下が進むと、侵食が急激に進行することが示唆されており、本観測で確認された現象と同様の傾向がある。

以上より、駿河海岸で生じた高波浪時の三次元的な地形変化は、遡上波によって、海浜植生がフラッシュされ、一気に砂面が低下し、沿岸方向に勾配を持つことで、沿岸方向の流れが加速され、海岸侵食三次元的な地形変化が進行したものと考えられる。

また、この時のフラッシュの機構については、未だ検討の余地があるものの、植生域沿いに遡上するエッジ波によって侵食が進行した過程も想定し得る。

一般に、海浜植生は飛砂の捕捉効果<sup>12</sup>や海岸環境の形成、保全に資するとともに、侵食に対する抵抗の効果を有すると考えられているが、一方で本現地観測では、一度フラッシュされると侵食が急激に進む、もしくは侵食を助長するという傾向が確認された。このことは、海岸管理上、非常に重要な現象であり、特に堤防前面など構造物周辺は、常時の波浪が到達しないため、海浜植生が繁茂し固定化しやすい傾向にある。その中で植生をフラッシュするほどの侵食が生じ、堤防前面の砂面の低下が急激に進行すると、局所洗掘が生じ、堤防の倒壊等のリスクが高まることが現象論として示唆される。

## 5.6 地形変化モデルの検討

このような複雑に、かつ三次元的に進行する堤防前面の波による地形変化について、遡上波を与条件とした簡易な地形変化モデルについて検討する。検討するモデルは前項において、その適用を確認した岸沖漂砂量モデルを基本に、沿岸方向への引き波の影響を考慮することで算定した。

### 5.6.1 実測漂砂量の算定

三次元的な地形変化の挙動を簡易に取り扱うため、図5.14のような面的に一様な断面の変化と仮定し、現象を単純化した上で、取得した計測データより、任意点Aにおける実測の漂砂量 $q_{obs}$ を算定した。

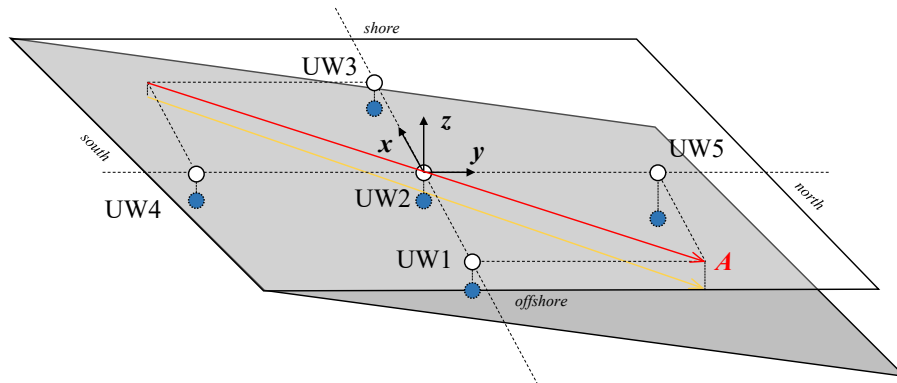


図 5.14 海浜断面変形の模式図

このとき、平面形は単純な一次式 (5.10) で表現可能である。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (5.10)$$

上記の係数 ( $a, b, c, d$ ) は、砂面高を算定する瞬間値について、同時刻の想定砂面高により最小二乗法で算定した。

この平面形の評価点における  $z$  の差分値から、砂の連続式 (5.8) より、堤防に対して斜め方向 (図 5.14 中の赤線もしくは橙線) の漂砂量を算定し、端点  $A$  での実測の漂砂量  $q_{obs}$  を算定した。

### 5.6.2 漂砂量モデルの検討

本研究では、遠赤外線カメラによる画像解析から、岸沖方向および沿岸方向でそれぞれ流速を算定している。

そのため、遡上波の流速および岸沖、沿岸方向の砂面勾配を条件とし、斜面勾配を考慮した修正 mobility number である式 (5.6) を沿岸方向に拡張した上で、遡上域先端における漂砂量モデルを式 (5.11) および式 (5.12) として提案する。

$$\Psi'_u \equiv \frac{U_{u,s}^2}{sgd_{50}} - \frac{4}{3f} \beta_s \quad (5.11)$$

$$\Psi'_d \equiv \frac{U_{d,s}^2}{sgd_{50}} + \frac{4}{3f} \beta_s + \frac{U_{d,c}^2}{sgd_{50}} + \frac{4}{3f} \beta_c \quad (5.12)$$

ここで、添字の  $s$  は岸沖方向、 $c$  は沿岸方向を示しており、前節で確認した通り up rush 時には沿岸方向の影響は小さいため、式 (5.11) においては、沿岸方向成分を無視をしている。また、式 (5.12) の解釈について、右辺の第 1 項および 2 項が岸沖方向に輸送される漂

砂量，第3項および4項が沿岸方向に輸送される漂砂量に対応しており，沿岸方向に流速が小さく勾配を持たない場合はゼロとなる。

以上より，漂砂量モデルを式(5.13)と定義した。

$$q_{model} = \alpha \left( T_u \Psi_u^{1.5} - T_d \Psi_d^{1.5} \right) \quad (5.13)$$

### 5.6.3 実測漂砂量と漂砂量モデルの関係

実測漂砂量  $q_{obs}$  と漂砂量モデルによる漂砂量  $q_{model}$  の関係を図 5.15 に示す。なお，沿岸方向の砂面勾配は UW4, UW2, UW5 の計測値より砂面高の評価時間に対してそれぞれ算定した。また，係数  $\alpha$  および相関係数を表 5.3 に示す。

表 5.3 より，岸沖漂砂量モデル（表 5.2）と比較し，令和元年東日本台風により生じた駿河海岸での三次元的な地形変化過程を精度良く評価することが可能となったものと考えられる。

以上より，高波浪時における堤防前面の三次元的な地形変化の動態について，植生のフラッシュに伴う流れの偏りから生じる過程を明らかにしたとともに，堤防前面における漂砂量モデルを提案し，実測値との比較からその妥当性を検証した。

表 5.3 係数値と相関係数（漂砂量モデル）

区分	$\alpha$	相関係数
St.1	$8.0 \times 10^{-4}$	0.438
St.2	$15.0 \times 10^{-4}$	0.586
St.3	$6.0 \times 10^{-4}$	0.583
St.4	$12.0 \times 10^{-4}$	0.768
St.1-4	$11.0 \times 10^{-4}$	0.626

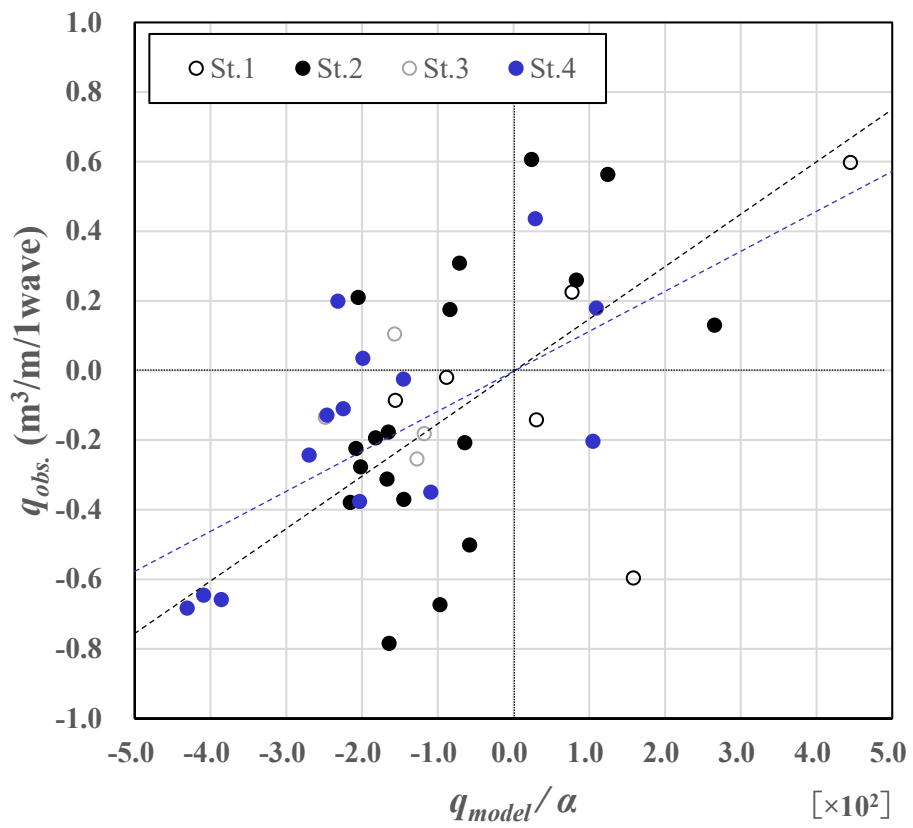


図 5.15 漂砂量モデルと実測漂砂量の関係

## 5.7 本章のまとめ

第5章では、三次元的な地形変化と波、流れの関係を整理することを目的に、砂面勾配と沖波の関係、実測の漂砂量と漂砂量モデルを介した遡上波の流れとの関係を検討し、流れの可視化を行うことで三次元的な地形変化の過程について考察した。

砂面勾配と沖波の関係について、遡上波ごとに算定した砂面勾配と、その間に作用した沖波を用いて疑似波形勾配や波高・粒径比との比較を行った結果、砂面低下が生じない St.1 および St.3 と一様に砂面の低下が進行する St.2 のステージにおいては、沖波の増大に伴い砂面勾配が急勾配化する傾向が確認された。一方で、地形変化の三次元性が強まる St.4 の過程においては、この関係は成立せず、沖波の波高規模によらずに緩勾配化する傾向となった。このことから、St.4 の三次元的な地形変化は、岸沖方向の仮定に基づく沖波の条件では説明し得ない現象であったことが明らかとなった。

次いで、観測データより算定した実測の岸沖漂砂量と掃流砂に基づく岸沖漂砂量モデルとの関係を整理した結果、上記と同様に一様な砂面低下が進行した St.2 で両者の間に良好な相関関係を確認した。これは、沿岸方向に一様に侵食が進行する場合には、地形変化に対して沿岸漂砂の影響は小さく、岸沖漂砂が卓越することに起因していると考えられる。対して、St.4 では、実測値とモデルによる計算値との間の相関性は相対的に低く、岸沖漂砂の移動では三次元的な地形変化の現象は説明し得ないことを明らかとした。

三次元的な地形変化の進行については、岸沖漂砂の移動では説明できないことが上記より明らかとなったため、遠赤外線カメラによる撮影動画より、特に引き波時の沿岸方向への流れの可視化を行い、不均衡な砂面の低下が生じた時間帯前後の状況について検討した。各ステージで up rush, down-rush 時の流れを算定した結果、St.4 では明らかに沿岸方向（南から北）の流れが卓越することが確認できた。この時の海岸の状況を詳細に確認した結果、波の遡上によって堤防前面に繁茂していた海浜植生がフラッシュされ、低下した砂面に沿って沿岸方向の down-rush 時の流れが加速されることで、三次元的な地形変化が生じるメカニズムを明らかにした。

また、岸沖漂砂量モデルに対して、堤防前面での波の遡上過程を考慮し、沿岸方向の影響を追加することで漂砂量モデルを構築し、実測値との比較を行った。本研究において構築した漂砂量モデルでは、三次元過程を概ね説明できることを確認したものの、植生のフラッシュの起因については、課題が残る。

一般に、海浜植生は飛砂の捕捉効果や海岸環境の形成、保全に資するとともに、侵食に対する抵抗の効果の有すると考えられているが、本研究成果では、海浜植生は一度フラッシュされると侵食が急激に進むというリスクを有していることを示唆しており、今後の海岸管理のあり方について、一考の余地を残すものとなった。

## 参考文献

- 1) 岡本 弘, 田方俊輔, 水口 優 : 高波浪時における汀線付近の地形変化について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I.74-I.80, 2011.
- 2) 村上翔汰, 水口 優, 金子 祐, 小柳雄揮, 仲澤祐土, 野本 聖 : 非碎波遡上域における平衡勾配と漂砂量に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I.535-I.540, 2015.
- 3) リアルタイムナウファス 国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網, <https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>.
- 4) T. Sunamura : Quantitative predictions of beach-face slopes, Geological Society of America Bulletin, Vol.2, pp.242-245, 1984.
- 5) 内野敬太, 山口隼人, 関 克己, 水口 優 : 大規模侵食時における汀線近傍の漂砂量・地形変化・波浪特性, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 446-450, 2004.
- 6) 加藤一正, 柳嶋慎一, 栗山善昭, 磯上知良 : 荒天時のバーム地形の侵食—長周期波に着目した現地観測—, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 354-358, 1989.
- 7) 本田隆英, 羽角華奈子, 伊藤一教, 織田幸伸 : 全国沿岸を対象とした長周期波と有義波の相関関係に関する一考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp.I.640-I.645, 2013.
- 8) 山口隼人, 堤 浩司, 鈴村 聡, 関 克己, 水口 優 : 高波浪時における遡上域付近の波の特性と岸沖漂砂量について, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 496-500, 2007.
- 9) Nielsen : Coastal Bottom Boundary Layer and Sediment Transport, Advanced on Ocean Engineering, Vol.4, World Scientific, pp.95-128, 1992.
- 10) Puelo, J. A. and K. T. Holland : Estimating swash zone friction coefficients on sandy beach, Coastal Eng, Vol.43, pp.25-40, 2001.
- 11) 原野 崇, 浜口耕平, 加藤史訓, 伊藤幸義 : 津波越流時を想定した植生を有する地盤の耐侵食性の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I.379-I.384, 2017.
- 12) 加藤史訓, 佐藤慎司 : 砂浜海岸の植生群落と地形変化の現地調査, 海岸工学論文集, 第 45 巻, 1998.

## 第6章 結論

近年、気候変動に伴う異常気象等に伴い、台風の激甚化、高波浪による被害等が多発している。特に海岸堤防は高潮や高波から陸地を守る最後の砦として、昭和34年の伊勢湾台風による大災害を契機に全国で整備が進められてきたが、近年の台風による高潮、高波で堤防護岸の被災や越波被害、海岸侵食の進行等も各地で報告をされている。

海岸堤防前面の局所的な侵食は、基礎工の露出に伴い、破堤のリスクが高まることに加え、堤防内部の土砂の吸出しに伴う沈下など、安定性に大きな影響を与える現象である。

ここで、このような侵食の機構は土砂の移動、すなわち漂砂によりもたらされると考えられる。漂砂は土砂移動の方向から、主として高波浪等に起因して短期的かつ大規模に移動する岸沖漂砂と、常時波浪や沿岸流によって常時輸送される沿岸漂砂に大別される。一般に海岸域における海岸侵食として問題視されるのは後者であり、河川を含む流砂系のバランスが崩れることで長期的かつ不可逆に生じる現象として、工学的にアプローチされることが多い。一方、岸沖漂砂に起因する短期地形変化について、高波浪により沖に輸送された材料は、高波浪後に岸方向に輸送され海浜断面が回復するため、実務上の汀線の維持という観点からは軽視されてしまうことが多いのが現状である。

しなしながら本章の冒頭で述べた海岸堤防前面での短期的な地形変化は、岸沖方向の漂砂により侵食され、短期的に構造物の安定性に対して高リスクな現象を呈するなど、その影響は非常に大きなものである。また、前浜と波浪規模の関係から、十分に浜幅が確保されている海岸に対して想定以上の高波浪が来襲し、堤防際まで遡上すると、通常、波の遡上の頻度が低い領域においては不可逆的な変化を生じさせることとなる。

このような高波浪に伴う短期地形変化の現象理解は、特に治水安全性への影響が大きい堤防際においても工学上極めて重要であるが、既往研究では実験や最大侵食深等を指標とした議論に留まっており、その動態を把握した例は筆者の知る限りほとんど存在しない。

本研究では、上記のような背景のもと、2019年10月に発生した令和元年東日本台風の高波浪を対象として、静岡県駿河海岸において生じた三次元性を有する地形変化現象について、現地に設置した現地観測機器からその動態について議論した。

各章より得られた結論を以下に示す。

## 現地観測システムの検討（第2章）

第2章では、本研究において実施した静岡県駿河海岸における現地観測システムについて、その手法の開発と観測機器の精度検証等を実施した。

現地観測は現地スケールで生じる波と地形変化の現象を、面的かつ高頻度で計測することを目的とし、超音波式水位計5基、容量式水位計3基を配置し、サンプリング間隔0.1sで連続観測するシステムを構築した。なお、本観測における超音波式水位計は、砂面露出時には砂面の鉛直位置を、遡上波が存在するときには水面変動を計測できる特性を利用するが、その計測精度について実内造波水路を用いた実験からセンサーの照射角 $20^\circ$ まで計測可能であり、誤差が0.01m以下であることを確認した。加えて、観測システムには近年、河川の高度流量観測において使用される遠赤外線カメラを採用し、その適用を現地にて確認した。検証の結果、遠赤外線カメラは放射熱を計測するため、外気温に対して明らかに温度が異なる遡上波を捉えることが可能であることがわかった。

観測結果の処理方法として、取得したデータよりスパイクノイズを除去するアルゴリズムを提案し、その妥当性を確認した。

## 令和元年東日本台風の概要と遡上波の特性（第3章）

第3章では、現地において観測し検討対象期間として設定した令和元年東日本台風の概要をまとめるとともに、駿河海岸へ遡上した波の特性について述べた。

令和元年東日本台風は、日本各地で大雨、風浪、高潮、高波被害等の大規模な被害を生じさせた。観測地点が位置する駿河海岸では、沖合の観測所で既往最大に匹敵する有義波高を観測し、その高波浪が満潮と重なることで観測地点周辺でも高波浪に伴う遡上波が確認された。

遠赤外線カメラより遡上波の波形を解析し、STIVを用いた up rush, down-rush 時の遡上波速度を算定した。遡上波速度は、up rush 時には打上げ高と比例して速くなるのに対し、反射後の down-rush 時の速度は打上げ高の規模によらず、ほぼ一定となることを明らかにした。これは、遡上波が堤防で反射しエネルギーを逸散した上で、砂面勾配なりに薄層流で流れることによるものと推定した。

## 高波浪時における堤防前面の地形変化過程（第4章）

第4章では、超音波式水位計から算定した砂面高の時空間的な挙動を整理し、堤防前面で生じた三次元的な地形変化過程について述べた。

駿河海岸では高波浪が継続した約 24 時間で、20 - 50cm の砂面低下が確認された。この砂面低下のうち、潮位が低い時間帯では遡上波が観測地点まで到達しないため、侵食はほぼ生じない (St.1, St.3) 時間帯がある一方で、潮位が高い時間では砂面低下が進行するなど、時間的な変化から地形変化の進行過程を 4 つのステージに区分した。ただし、侵食が進行する時間においても一様に砂面低下するステージ (St.2) と沿岸方向に勾配を持って砂面低下が三次元的に進行するステージ (St.4) に区分した。

また、空間的な地形情報より、前者の様に砂面低下するステージでは地形が急勾配化し、後者の砂面低下が三次元的に進行するステージでは緩勾配化することが明らかとなった。

### 三次元的な地形変化と波，流れの関係（第 5 章）

第 5 章では、地形変化と波，流れの関係について，検討した。

地形変化の過程として，各ステージで形成される砂面勾配に着目し，その勾配と直前の沖波の関係について検討した。砂面勾配は沖波の増大に伴って急勾配化する傾向が St.1 から St.3 にかけて一部確認できたものの，St.4 では，この関係が成立せず，外力との単純な比較では説明し得ない現象であることがわかった。

次いで，岸沖漂砂量のモデルについて，遡上波と岸沖漂砂量の間を関係を検討し，St.2 では，岸沖漂砂量モデルとの間に良好な関係が確認でき，一様に砂面の低下が進行する状況下では既往モデルの妥当性を説明することができた。一方，三次元的な変化過程を有する St.4 においては，既往モデルとの間には相関性がなく，岸沖方向の漂砂移動ではやはり現象を説明できないことが確認できた。

上記を踏まえ，三次元的な地形変化の進行過程を把握するため，遠赤外線カメラにより撮影した動画から，down-rush 時の沿岸方向の流れの可視化を行い，各ステージでの流れを評価した結果，他のステージと比較して St.4 において明らかに沿岸方向に流れが卓越する傾向を確認した。この時の流れの変化過程を動画により分析すると堤防際に繁茂していた海浜植生がフラッシュしたことで，その地点の砂面が低下し，その低下した砂面に沿って沿岸方向の流れが卓越することで，局所的に三次元的な侵食が進行した変化過程を明らかにした。また，沿岸方向への流れを考慮した漂砂量モデルを構築し，そのモデルの妥当性について，現地データとの比較から検証した。本研究において構築した漂砂量モデルは現象を概ね表現することが可能である一方，三次元的な流れが生じるきっかけ（海浜植生のフラッシュ）についての物理的な解釈については，課題が残る。

海浜植生はこれまで飛砂の抑制や海岸環境の形成，保全に寄与すると考えられ，また，植生があることで侵食への抵抗となることが指摘されていたが，流出するほどの外力が生じた際には，海浜植生が侵食を助長する可能性があることを指摘した。

## 本研究から得られた知見と今後の展望

本研究では、高波浪時において堤防前面で生じた三次元的な地形変化について、駿河海岸での観測結果を事例に、海浜植生の流出に伴い侵食が加速されるメカニズムを明らかにした。また、提案した遡上波の沿岸方向への流れを考慮した漂砂量モデルと実測の漂砂量との関係について、良好な相関関係を持つことを示した。

これらの結論は、海浜植生のあり方について、議論するための一つのきっかけになるものと考えられる。しかし、植生の流出要因や力学的な機構については十分に検証できているとは言えず、今後の検討課題であると認識している。また、本研究は駿河海岸での事例を参考に一般論として検討をしているが、一つのイベントとして議論しているに過ぎず、他の海岸での検証データの蓄積によって詳細な検討に発展していけるものとする。

なお、本研究では、遠赤外線カメラを利用した新たな観測手法の導入について検証し、その撮影画像から STIV による流れの可視化についても言及をした。新たな観測手法は、海岸管理の省力化や効率化につながる可能性も高く、一般的な技術として普及するよう他の海岸においても観測事例等を集積していきたい。

最後に、本研究が今後の海岸管理の一助になることを期待し、論文として取りまとめる。

# 研究業績

## 論文（学位論文関連）

本研究に関する論文として、以下に示す論文を執筆した。

- (1) 福原直樹，加藤史訓，田方俊輔，水戸佳祐：うちあげ高観測に対する超音波式水位計の現地適用性の検証，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 76, No. 2, pp. I.678-I.683, 2020.
- (2) 田方俊輔，泉 典洋：駿河海岸における令和元年東日本台風時の海岸堤防前面での波と地形変化過程，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 77, No. 2, pp. I.337-I.342, 2021.
- (3) 田方俊輔，泉 典洋：高波浪時における堤防近傍の地形変化の三次元性について，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 78, No. 2,（掲載決定），2022.

## 論文（その他）

また、本研究と並行し、以下に示す研究を実施した。参考に以下を付記する。

- (1) 西口亮太，田方俊輔，陰山建太郎，泉 典洋，関根正人：河川流の逆解析・データ同化に関する基礎的研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vol. 76, No. 1, pp. I.30-I.41, 2020.
- (2) 田方俊輔，西口亮太，秋田麗子，陰山建太郎：釜無川における光学衛星を活用した河道管理手法の一考察，河川技術論文集，第 27 巻，2021
- (3) 田方俊輔，砂原健汰，鳥居謙一，五十嵐竜行，伊佐真幸，安里 隆，中園幸樹：サンゴ礁海岸における砂浜形成促進に関する対策工の現地実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 77, No. 2, pp. I.655-I.660, 2021.

## 学会発表等

### 学位論文関連

- (1) 田方俊輔, 泉 典洋: 「駿河海岸における令和元年東日本台風時の海岸堤防前面での波と地形変化過程」土木学会, 第 68 回海岸工学講演会, オンライン, 2021 年 11 月.
- (2) 田方俊輔, 泉 典洋: 「高波浪時における堤防近傍の地形変化の三次元性について」土木学会, 第 47 回海洋開発シンポジウム, オンライン, 2022 年 6 月.

### その他

- (1) 田方俊輔, 西口亮太, 秋田麗子, 陰山建太郎: 「釜無川における光学衛星を活用した河道管理手法の一考察」土木学会水工学委員会, 2021 年度河川技術に関するシンポジウム, オンライン, 2021 年 6 月.

## 謝辞

本研究は筆者が社会人と並行して、北海道大学在学中に研究したものであり、その内容を博士論文として取りまとめたものです。本研究の遂行にあたっては、多くの方にご指導、多大なるご支援を頂きました。

はじめに、本研究を進める上で、終始に亘り懇切丁寧なご指導、ご助言を賜りました北海道大学工学研究院教授の泉 典洋先生に深く感謝を申し上げます。泉先生には、社会人博士課程への入学の後押しを頂くとともに、在学中は公私に亘り、時に楽しく、時に厳しく、心のこもったご指導を頂きました。

また、本研究の副査をお引き受けいただきました北海道大学工学研究院 渡部靖憲教授には、海岸工学の観点から、北海道大学工学研究院 岩崎理樹准教授には、土砂水理学の観点から、研究を進めるにあたっての有用なご助言を多々賜りました。

並びに、本研究で使用したデータは国土交通省国土技術政策総合研究所 河川研究部 海岸研究室より貸与いただいたものであり、特に第2章の観測システムの検討に当たっては、加藤史訓海岸研究室長、福原直樹博士と活発な議論をさせて頂きました。本研究において実施した現地観測においては、有限会社中央工測の小栗保二氏、有限会社L.J.の蛭田啓久氏、株式会社インフラレッドの扇野大輔氏、有限会社ヨコミチ電機の塩澤駿斗氏に多大なるご協力を頂きました。

博士後期課程への進学については、筆者が所属する日本工営株式会社の皆様からも多大なるご支援を賜りました。特に進学の推薦を頂いた松田寛志本部長、陰山建太郎センター長代理、研究の実施に際しては、日本工営株式会社 河川部の壇 鉄也氏、西口亮太課長からご助言を頂くとともに、日々の業務においては、秋田麗子シニアスペシャリスト、萩原 崇部長、清水隆博課長をはじめとする河川部の皆様より多大なるご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

なお、筆者の研究に関する心構えや考え方は中央大学名誉教授の水口 優先生の教えがあったからこそと思います。中央大学の学部時代、あまりにも堕落した生活を送っていた筆者に勉強の面白さを教えて頂きました。ここに記して、改めて感謝を申し上げます。

末筆となりますが、ご指導、ご助言いただきました方々に深く感謝を申し上げますとともに、進学を理解し協力いただいた両親、また、日々の生活を支えてくれた妻 友美、子 明日美に感謝し、謝辞といたします。

2022年8月

田方 俊輔