

沿岸域の強風による水塊輸送と越波機構の解明

Mechanism of Wave Overtopping and Mass Transport under
the Influence of Strong Winds

2023年2月

稲垣 直人
Naoto INAGAKI

沿岸域の強風による水塊輸送と越波機構の解明

Mechanism of Wave Overtopping and Mass Transport under
the Influence of Strong Winds

2023年2月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科
建設工学専攻 海岸工学研究

稲垣 直人
Naoto INAGAKI

目次

第1章 序論.....	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 研究の目的.....	1
1.3 研究の特徴とインパクト.....	2
1.4 本論文の構成.....	2
第2章 2019年台風15号による福浦海岸での越波災害.....	4
2.1 台風の概要.....	4
2.2 福浦海岸での現地調査の結果と解釈.....	5
2.3 気象-波浪モデルによる波浪追算.....	7
2.3.1 計算モデルの設定.....	7
2.3.2 結果.....	9
2.4 現地調査と波浪追算を踏まえた被害の考察.....	11
2.4.1 気象-波浪モデルの傾向.....	11
2.4.2 波の視点による被害の解明.....	12
2.4.3 東京湾西岸の風の様子.....	12
2.4.4 沿岸域の突風が越波にもたらし得る影響.....	13
2.4.5 水塊の質量輸送としての越波現象.....	14
2.5 本章のまとめ.....	14
第3章 既往研究の整理と本研究の方針.....	16
3.1 風の影響の視点から整理する越波研究の変遷.....	16
3.2 これまでの知見の整理.....	19
3.3 本研究の具体的なアプローチと既往研究における立ち位置.....	19
3.4 本章のまとめ.....	20
第4章 数値計算による検討.....	21
4.1 風-波連成系の数値計算手法.....	21
4.1.1 流れの数値解析手法.....	21

4.1.2	有限体積法の基礎方程式と VOF 法の概念.....	21
4.2	数値モデルの開発	26
4.2.1	Ward et al. (1994)の実験	26
4.2.2	解析条件の整理	27
4.2.3	結果.....	29
4.2.4	風速分布の考察	30
4.2.5	圧力分布と波高変化の考察	31
4.3	福浦海岸におけるモデルの適用.....	32
4.3.1	数値計算の設定	32
4.3.2	不規則波を考慮した越波流量の算定結果と考察	34
4.4	提案した数値モデルについての考察.....	36
4.4.1	相界面の物理過程のモデル化の必要性.....	36
4.4.2	相界面モデルの実装と VOF 法の相性	37
4.4.3	妥当な計算量と安定性を実現する工夫.....	38
4.4.4	さらなる水理実験の必要性	38
4.5	本章のまとめ	38
第 5 章	水理実験による検討.....	40
5.1	実験の概要	40
5.2	実験設定と手法	40
5.2.1	越波流量実験.....	40
5.2.2	PIV 解析	46
5.2.3	質量流量.....	49
5.3	結果.....	49
5.4	考察.....	53
5.4.1	風による水塊輸送.....	53
5.4.2	部分重複波による打ち上げ水塊と越波への影響($H0/L0 = 0.0220$ の考察)	53
5.4.3	砕波位置の変化と越波への影響($H0/L0 = 0.0371$ の考察)	57
5.4.4	砕波形態の変化と越波への影響($H0/L0 = 0.0128$ の考察)	59
5.4.5	間接的な風の影響の各々の寄与について	60
5.4.6	風の効果の定式化の提案.....	61

5.4.6 風の観点からみる福浦海岸の越波災害	62
5.5 本章のまとめ	63
第6章 結論.....	65
参考文献.....	69
研究業績一覧.....	76
謝辞.....	78

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

一般に、海の波が海岸構造物を越え、背後の陸域に浸入することを越波という。日本の場合、護岸を越えるような波は高波、高潮、津波によってもたらされ、このうち高波が護岸設計の基本外力として想定されている。

高波は風によって発達した風波によってもたらされる。遠方で発達した風波がうねりとなって沿岸に来襲することもあれば、強風によって沿岸域で急速に波浪が発達する場合もある。災害をもたらすような波が生じる場合、概して台風のような現象が生じていた。特に、1959年の伊勢湾台風によって、日本の沿岸災害への意識は大きく転換し、集中的な護岸整備が行われた。現在、ほとんどの台風では生活を脅かすような越波被害が生じることは少なくなった。

しかしながら、気候変動により、台風パラメータは変化しており、台風がもたらす沿岸災害の様相も変化しつつある(たとえば、IPCC, 2022)。この一例として、著者は移動速度が遅い台風が波浪場にもたらす影響について、数値モデルを用いて解析した(Inagaki et al., 2020)。

一方で、これまでの気候変動の傾向が継続すると、強度が高く、風の強い台風が発生する可能性が増加するという指摘が少なくない(たとえば、Nakamura et al., 2020)。強い風と波浪によって新たに生じ得る沿岸災害のメカニズムを解明することは、将来の沿岸防災においてますます重要になると考えられる。

1.2 研究の目的

前述した背景を踏まえて、本研究は以下の点を目的とする。

一つは、2019年台風15号が福浦海岸にもたらした実際の水害事例から、本研究で明らかにすべき点を浮き彫りにするまでの過程を丁寧にまとめる。著者が実施した現地調査の結果から、どのような視点が越波現象を捉えるうえで本質的であるかを考察する。

二つ目は、本研究で採用した越波現象を捉える視点について、数値計算と水理実験という複数のアプローチでの検証を図る。数値計算では現象の再現性と計算上の安定性の二軸において適用性の議論を行い、その限界を考察することを志向する。水理実験によるアプロー

チでは既往研究による知見に加え、本研究の数値計算の結果を踏まえて実験を計画する。この時、定性的な解釈を定量的に裏付けることを基本的な立場とし、系統的な実験手法によって、現象の物理的背景の理解をまとめることを試みる。

1.3 研究の特徴とインパクト

前述のように、本研究は、現地調査・数値計算・水理実験という海岸工学・防災工学の分野では主となるアプローチを全て組み合わせる総合的な試みである。また、本研究で取り上げる、風作用下における越波という現象は、流体の問題としては複雑なものである。そのため、実験や数値計算の両面でも十分な検討がなされたとは言い難い。一方で、気候変動の影響という問題や、実際に風の影響によって生じたと考えられる被害が見られることから、本現象の解明はますます重要になってきている。したがって、本研究は、十分な検討がなされていない流体現象を取り上げ、気候変動の影響という現代的な問題と絡めて焦点を当てるという点で、未踏領域に強い学術的なインパクトを与えるものと言える。

一方で、学術面のみにとどまらず、社会や未来への価値も期待できる。本研究では実際の水災害の事例から論理を進め、将来の防災について必要な視点についての提案を行うため、社会的価値と経済的価値を両立するものと言える。気候変動など、環境外力が変化する現在において、社会活動を守るインフラの刷新は不可欠である。本研究のように、変化する環境条件を指摘し、適切な視点を提案することこそ、工学的な防災の目指すところである。

1.4 本論文の構成

本論文は七つの章から構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論であり、研究の背景や目的、期待されるインパクトについて述べた。

第2章では、本研究の契機となった、2019年台風15号による福浦海岸での越波・浸水被害について述べた。被災直後に行った現地調査および、気象-波浪モデルによる波浪追算を行い、災害の特徴を検討した。これらの考察から、本研究で明らかにすべき具体的な問題を導き、解決にあたって前提となる現象の捉え方を明示した。

第3章では、数ある越波現象の既往研究において、風の影響という視点で、その議論の変遷をまとめた。越波に関する研究がどのような目的意識で発展していき、その文脈において風の影響はどのような立場にあったかを述べた。これらの既往研究から、明らかになっていない

点や問題点を挙げ、そのうち本研究で解決を試みることにし、その具体的なアプローチを述べた。また、既往研究に連なる本研究の立ち位置を明確にした。

第4章では、具体的なアプローチの一つとして、数値計算による検討をまとめた。数ある数値計算手法のうち、本研究で採用した手法の特性や、選択理由を詳細に論じた。そして、数値計算と既往実験の比較において、その適用性や限界について丁寧にまとめた。特に適用性については、現象の再現性だけではなく、計算量や安定性の視点からの議論も行った。

第5章では、水理実験による検討をまとめた。第4章で明らかになった数値計算上の課題から、水理実験を通して明らかにすべき事項を再整理し、系統的な実験を計画した。風と越波の実験では、実験水槽のスケールと造波や送風条件の丁寧な検討が特に重要であるため、外力の諸元や校正について丁寧にまとめた。また、PIV解析による流速分布の考察は、既往実験で定性的な議論に終始してしまった現象に対して、定量的な解釈を与えるものである。このように、前述の実験を通して現象における物理現象の基礎的な理解を整理することを試みた。

第6章は結論であり、本研究で得られた成果を総括した。

第 2 章 2019 年台風 15 号による福浦海岸での越波災害

2.1 台風の概要

2019 年 9 月に発生した台風 15 号 Faxai (以降, Faxai と呼称する) は 8 日に非常に強い台風に発達し, その勢力を保ちつつ, 9 日午前 2 時から 3 時にかけて三浦半島を通過し, 東京湾を縦断した. この台風は非常に強い風を伴っており, 特に台風の進行方向右側の千葉県では強風による建物の倒壊, 家屋の損傷, 停電など広範囲にわたって被害が生じた. 本台風は激甚災害に指定され, 一連の台風被害は令和元年房総半島台風と呼ばれている.

図-2.1(a)に気象庁から取得したデータを整理し, 図-2.1(b)には東京湾西岸の様子を示した. 東京湾を通過する 6 時間に渡り, 最大風速 41m/s を維持していたことが分かった. また, Faxai の物理的特性値に注目すると, 強度が高く, かつ風域が小さいことが分かった. 暴風域の最大直径は 190km であり, Hagibis の 650km や 2018 年台風 21 号 Jebi の 370km と比較して小さかった. さらに, 中心気圧が低い状態を維持したので, 圧力勾配が大きくなり, 傾度風が卓越したと考えられる. 東京湾の西側では高波の被害が生じた. 特に, 東京湾西岸に面した横浜市金沢区福浦では越波・越流が生じ, 臨海部の工業団地の機械設備に大規模な浸水の被害をもたらした.

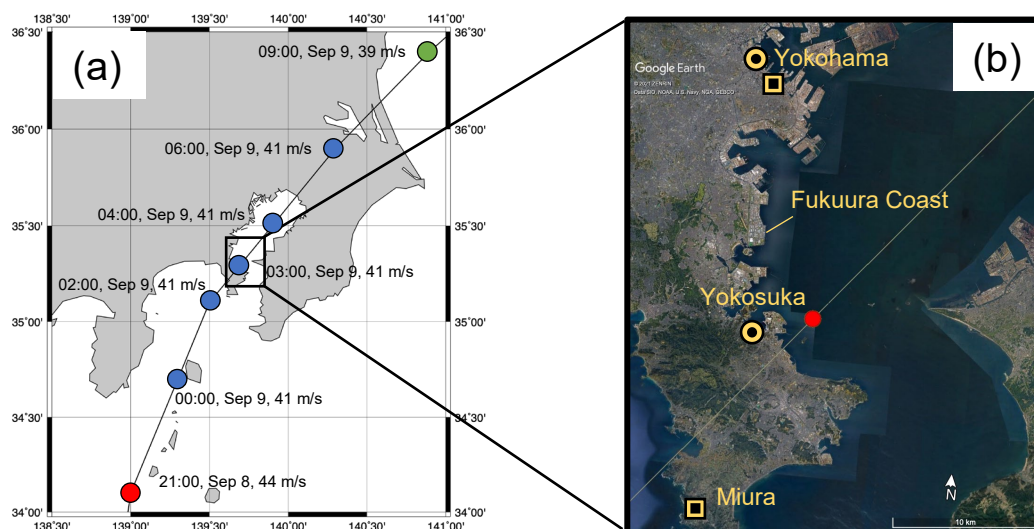


図-2.1 (a) 2019年台風15号(Faxai)の中心経路, 中心気圧および最大風速(データは気象庁より入手した). 中心気圧は色で表され, それぞれ 955 hPa(赤), 960 hPa(青), 970 hPa(緑)となる. (b) 東京湾西岸の衛星写真. 丸型のプロットは検潮所(横浜, 横須賀)の位置, 四角型のプロットはアメダスの観測所(横浜, 三浦)の位置を示している. 福浦海岸はこれらの間に位置している.

2.2 福浦海岸での現地調査の結果と解釈

2019年9月15日に現地調査を行った. 高波によって同地区東側の護岸の一部が決壊し, 後背地域に越波と越流被害が生じた. 浸水高さの計測結果は浸水時の天文潮位に補正した浸水高さを衛星写真に重ねた(図-2.2(a)). 東京湾に面した護岸のうち北側約200mの範囲には決壊が見られなかったが, 南側約900mの護岸は部分的に決壊した. 護岸を超えた水は道路に沿って同地区の奥の方まで運ばれ, 護岸から約300m離れた地点でも4m以上の浸水が確認された.

図-2.2(b)は決壊した護岸の一部を示している. 天端高1.49mのパラペットの上部が抜けるように倒壊した. また, 図-2.2(a)に示すように福浦地区の南側に築山という高さ10m程度の高い丘があり, その斜面を越流が遡上した際の洗掘跡が見られた(図-2.2(c)). また, 築山の頂部では植物の塩枯れ跡が広く散見された(図-2.2(d)). 塩枯れの規模が大きい箇所もあり, ある程度の大きさをもつ水塊の痕跡と見なした. この位置はT.P.+10.7mであり, 同地域で最も高い地点にある痕跡だった. この痕跡により, 越流の遡上が10mを超えたと一部で報じられたが, 遡上跡は斜面の中腹で途切れており, 実際には遡上水塊は築山を越えていない.

国土地理院の数値標高モデルにより護岸近傍の標高は+3m程度である。護岸が決壊したと考えられる9日2時の潮位偏差が約0.8mであったので、波浪の打ち上げ高は最低でも約3.7mを超えていたと考えられる。また、決壊部分の高さを考慮すると、同地区では約3.2m以上の高波が1~2時間程度続いたと言える。これと図-2.2(a)の浸水被害から判断すると、越波流量は $0.042 - 0.083 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ と見積もることができる。久保田らの独自の数値計算モデルでは $0.045 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ と算定されているので、およその見積もりとしては妥当であると考えられる。

図-2.2(b)や図-2.2(c)は非常に大きな威力の越波と越流の被害があったことを示している。特に越流の洗掘跡は、越波した後も大きな質量輸送能力をもった流れが生じていたことを示唆している。以上の現地調査の結果から、福浦地区の護岸の決壊および広範囲の浸水被害は、大きな質量輸送能力をもって押し寄せてきた高波によるものと特徴付けることができる。

以上の被害状況を整理し、その位置関係を図-2.3に示した。

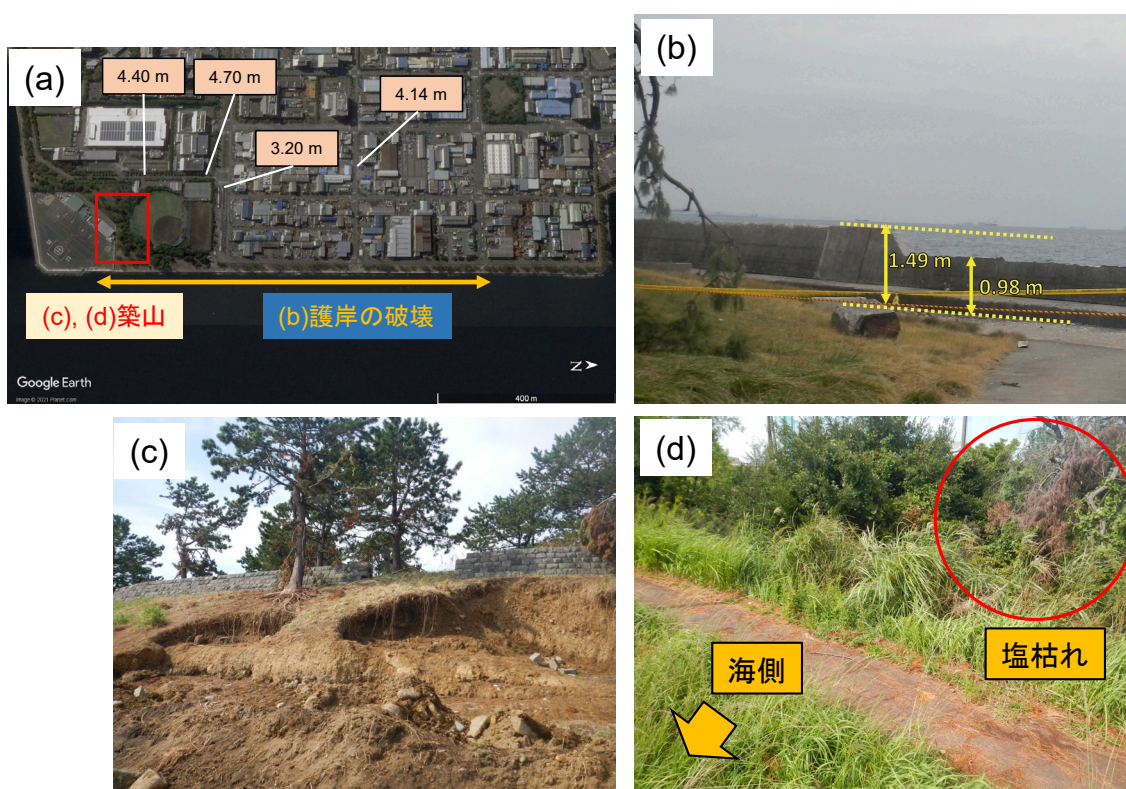


図-2.2 福浦海岸の現地調査の写真。(a) 潮位補正した浸水高 (Google Earth に加筆)。(b) 上部のパラペットが倒壊した直立護岸。(c) 築山の斜面の洗掘の様子。(d) 築山頂部で散見された塩枯れの様子。

広範囲の塩枯れ

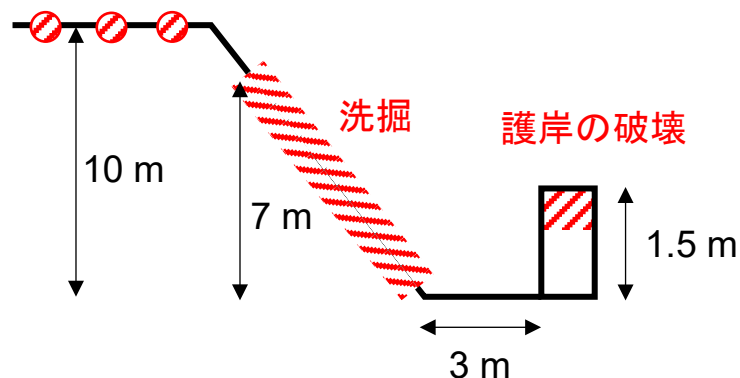


図-2.3 築山と護岸で発見された被害の痕跡の位置関係を示した断面図。

2.3 気象-波浪モデルによる波浪追算

2.3.1 計算モデルの設定

波浪追算には気象庁の提供するメソスケール数値気象モデル(MSM)と第三世代波浪推算モデル SWAN(Simulating WAVes Neashore, Booji et al., 1999)を組み合わせた。MSMにおける台風経路は東京湾を通過する9日午前5時頃まで、観測とほとんど一致したため、MSMから抜き出した風速場を波浪の駆動力として用いることにした。

SWANでは、風波の発生から消滅までの一連の過程をエネルギー収支の視点から追跡する。波のエネルギー $E(f_\sigma, \theta)$ は、それ自体に周波数分布が存在するが、SWANでは、これを相対周波数 f_σ で除した作用エネルギー密度 $N(f_\sigma, \theta)$ を基礎方程式に用いる(式-2.1)。このため、SWANなどのモデルは位相平均モデルと称されることもある。一般に、作用エネルギー密度を用いることにより、計算効率は著しく向上するが、複雑な地形への適用性が低下する。

$$N(f_\sigma, \theta) = \frac{E(f_\sigma, \theta)}{f_\sigma} \quad (2.1)$$

エネルギー分布はJONSWAPスペクトルなどの典型的なスペクトル分布を仮定し、周波数および方向分散性を含めた空間分布を計算できる。深水域で潮流の影響がない場合、エネルギーの伝播は移流方程式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} E + \frac{\partial}{\partial x} (c_x E) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y E) = S(f_\sigma, \theta; x, y, t) \quad (2.2)$$

ここで、 c_x および c_y は群速度の各方向成分を表す。風波の生成と消滅に関するエネルギーの増減はソース項 $S(f_\sigma, \theta; x, y, t)$ で表現する。式-2.2を浅海域まで拡張すると、浅水変形の影響を考慮する必要がある。

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial f_\sigma} (c_{f_\sigma} N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S(f_\sigma, \theta; x, y, t)}{f_\sigma} \quad (2.3)$$

ここで、左辺第4項は浅水変形による周波数バンドの推移、左辺第5項は潮流や水深変化による屈折の影響を表している。右辺はソース項で、波の生成と消滅過程に加え、非線形相互作用の影響も含める必要がある。SWANではソース項について、素過程の影響を重ね合わせている。

$$S(f_\sigma, \theta) = S_{inp}(f_\sigma, \theta) + S_{brk}(f_\sigma, \theta) + S_{frc}(f_\sigma, \theta) + S_{wcp}(f_\sigma, \theta) + S_{nl3}(f_\sigma, \theta) + S_{nl4}(f_\sigma, \theta) \quad (2.4)$$

ただし、 S_{inp} は風によるエネルギー供給、 S_{brk} は浅海域での砕波、 S_{frc} は海底での摩擦、 S_{wcp} は白波砕波(ホワイトキャッピング)、 S_{nl3} は3波相互作用、 S_{nl4} は4波相互作用を表す。SWANでは式-2.2, 2.3, 2.4が基礎方程式として実装され、作用平衡方程式(action balance equation)と呼ばれる。

SWANでは波の発達や伝播の各素過程について様々な物理設定が可能である。本計算で用いた設定を表-2.1にまとめた。風波の発達についてはKomenモデルを採用した。計算領域にはネスティングを行い、最も細かい計算格子は0.002度である。また、SWANの計算は7日9時から9日9時まで行い、外湾からのうねりの影響を考慮した。

表-2.1 気象一波浪モデルの計算設定

気象データ

MSM	9/7 9:00 ~ 9/9 9:00 JST	格子間隔: 0.05 x 0.0625度 データ空間領域: N22.4, E120 ~ N47.6, E150
-----	-------------------------	--

SWANの計算設定

SWAN v 41.20	波浪発達モデル: Komen 方向分割数: 36 周波数分割数: 25	ドメイン1	計算領域	0.02 x 0.02度 N25, E138 ~ N38, E146
			地形データ	0.004度 GEBCO 2019
			タイムステップ	300秒
		ドメイン2	計算領域	0.005 x 0.005度 N33.7, E138.9 ~ N35.85, E140.6
			地形データ	0.004度 GEBCO 2019
			タイムステップ	120秒
		ドメイン3	計算領域	0.002 x 0.002度 N25, E138 ~ N38, E146
			地形データ	内閣府中央防災会議 90mメッシュデータ
			タイムステップ	60秒

2.3.2 結果

8日の18時からFaxaiが東京湾を通過する9日6時頃までの約12時間の有義波高の観測値と計算結果を比較した。東京港の観測値は東京都港湾局より取得し、第二海堡の観測地はNOWPHASのもの、Suzuki et al. (2020)より引用した超音波式波高計による観測値を組み合わせた。両方とも、有義波高がピークとなるタイミングは1時間以内の違いに収まっていることが分かった。一方で、有義波高のピーク値は観測値を1.0 m程度過小評価した。第二海堡の計算値は二つのピークを再現しているが、二つ目のピークも過小評価の傾向が見られた。福浦海岸の有義波高の変化(図-2.4(d))は観測データがないため、計算値のみをプロットした。

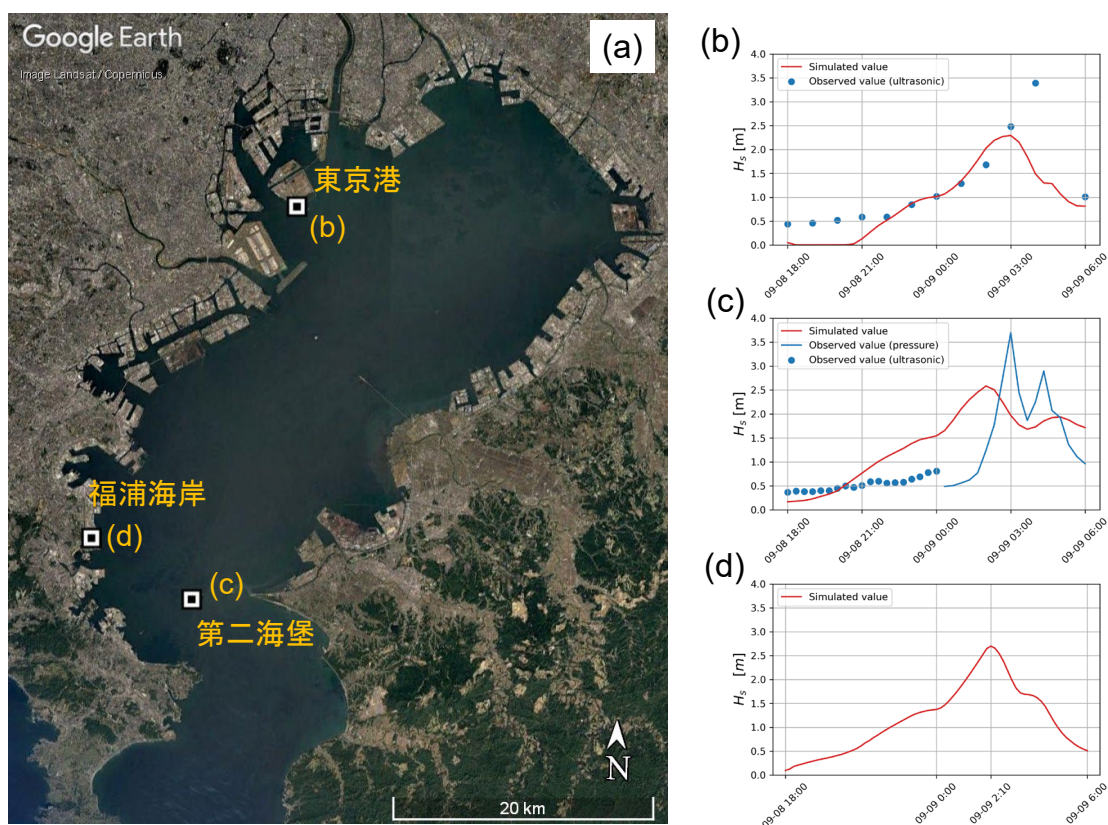


図-2.4 波浪観測所における有義波高の観測値と、数値モデルで求めた計算値の比較。(a) 波浪観測地点と福浦海岸の位置を衛星写真に示した(Google Earth に加筆)。(b) 東京港での比較。観測値は一時間毎で、東京都港湾局より取得した。(c) 第二海堡での比較。水圧式波高計による観測値は20分毎で、NOWPHASより取得した。(d) 福浦海岸での有義波高の計算値の時間変化。

福浦地区で有義波高が大きくなる9日2時から3時にかけて、MSMから得られる風速場を図-2.5に、SWANで計算した波浪場を図-2.6にまとめた。福浦海岸には、9日2時頃に強い東風(海風)が吹いていたことが分かった。また、波浪に注目すると、9日2時から2時30分にかけて湾奥から高まる波と湾口から回り込んできた波が福浦海岸に近づいていく様子が観察された。

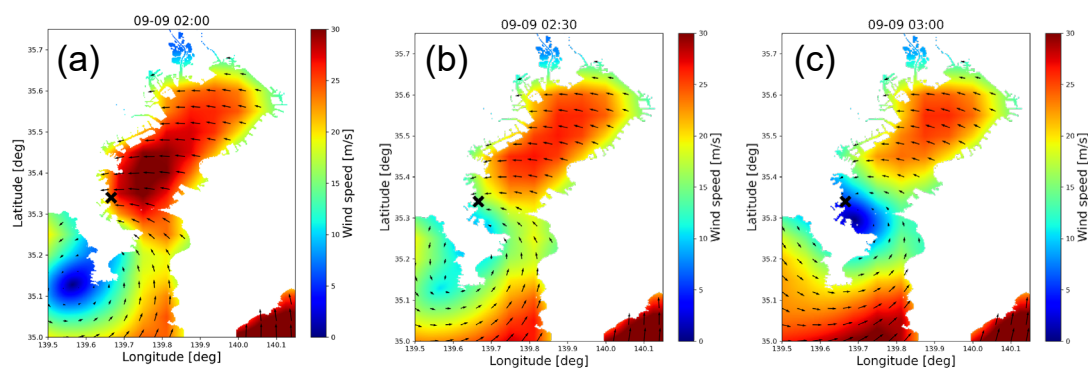


図-2.5 (a)-(c) MSM から取得した台風通過時の東京湾近傍の風速分布.

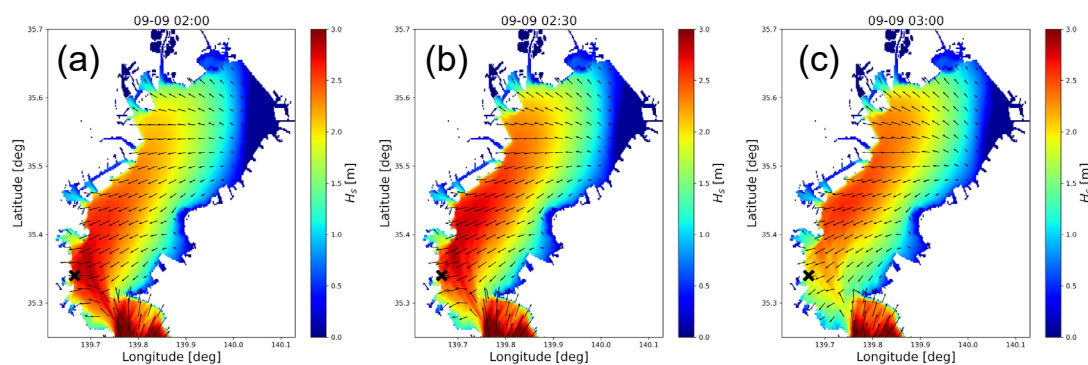


図-2.6 (a)-(c) SWAN による台風通過時の東京湾の有義波高分布の再現計算の結果.

2.4 現地調査と波浪追算を踏まえた被害の考察

2.4.1 気象-波浪モデルの傾向

観測値との比較から、波浪追算に用いた気象-波浪モデルは、有義波高がピークとなるタイミングや、二つのピークなどの基本的な振る舞いについては再現性が見られたものの、有義波高の最大値については約 1.0 m と大きく過小評価することが分かった。この傾向を踏まえると、福浦海岸でも同様に、波高の影響を過小評価している可能性がある。計算値での最大有義波高は 2.7 m となったが、これは前節で述べた現地調査で確認されたような被害を生じさせた波としては十分な規模ではない。実際には、より大きな波が継続的に福浦海岸に來襲したと考えるのが妥当である。

2.4.2 波の視点による被害の解明

福浦海岸に限らない、東京湾の広域的な被害調査は Suzuki et al. (2020) に詳しく、これによると被害は非常に限定された地域に集中していることが分かった。これについて、Tamura et al. (2021) は、海底地形が湾口からのうねりに対して周波数フィルターのよう作用し、特定の方向成分をもつうねりが特定の地域に押し寄せたと説明している。これによると、福浦海岸における波はうねりと風波の共存系となり、実質的に越波を引き起こしたのはうねりの方だということになる(図-2.3(d)の二つのピークの高い方)。このような波の視点による説明は、確かに被害のプロセスを説明しているものの、2017年台風21号(Lan)など、類似の経路となったものでは越波の同地域に越波の被害はないことを考えると、強度などの Faxai の特異性に注目する必要がある。さらに、現地調査で確認された被害の一部、たとえば、丘頂部のスポット的な塩枯れなどは波の視点のみでは説明ができない。

2.4.3 東京湾西岸の風の様子

図-2.4 では、福浦海岸における最大の風速が、海岸に直交する方向に吹いており、波に影響した可能性が考えられる。MSM の風速場は 1 時間平均風速であり、数値計算による福浦海岸での風速の最大値は 30 m/s 程度である。一方で、Faxai は強い風が特徴であり、同時間帯の最大風速は 41 m/s であることに注意する必要がある。

瞬間的な風の影響の評価として、東京湾西岸の AMeDAS の観測地点で得られた風速データを風配図として図-2.5 にまとめた。選択した三浦と横浜の観測地点は福浦を挟む位置にある(図-2.1(b)参照)。データは台風最接近時のものとして、9日0時から6時の10分間平均風速と10分間最大瞬間風速を取得した。三浦では平均風速に加えて、最大瞬間風速でも東風が卓越しており、41.7 m/s となることが分かった。横浜では東北東の風が卓越しており、最大瞬間風速は 31.3 – 36.5 m/s となった。このように、最大瞬間風速の分布においても東方向の風の頻度が大きく、越波現象が時間スケールの短い現象であることを踏まえると、風速の影響としては最大瞬間風速を考慮するのが妥当であると言える。

以上を踏まえると、気象-波浪モデルにおいて、風速場や波浪場の形状が比較的良好に再現できているにもかかわらず有義波高を過小に算定した原因として、MSM のような時間平均的な風速場では捉えられない瞬間的な風が高波の波高および越波現象に影響した可能性が挙げられる。

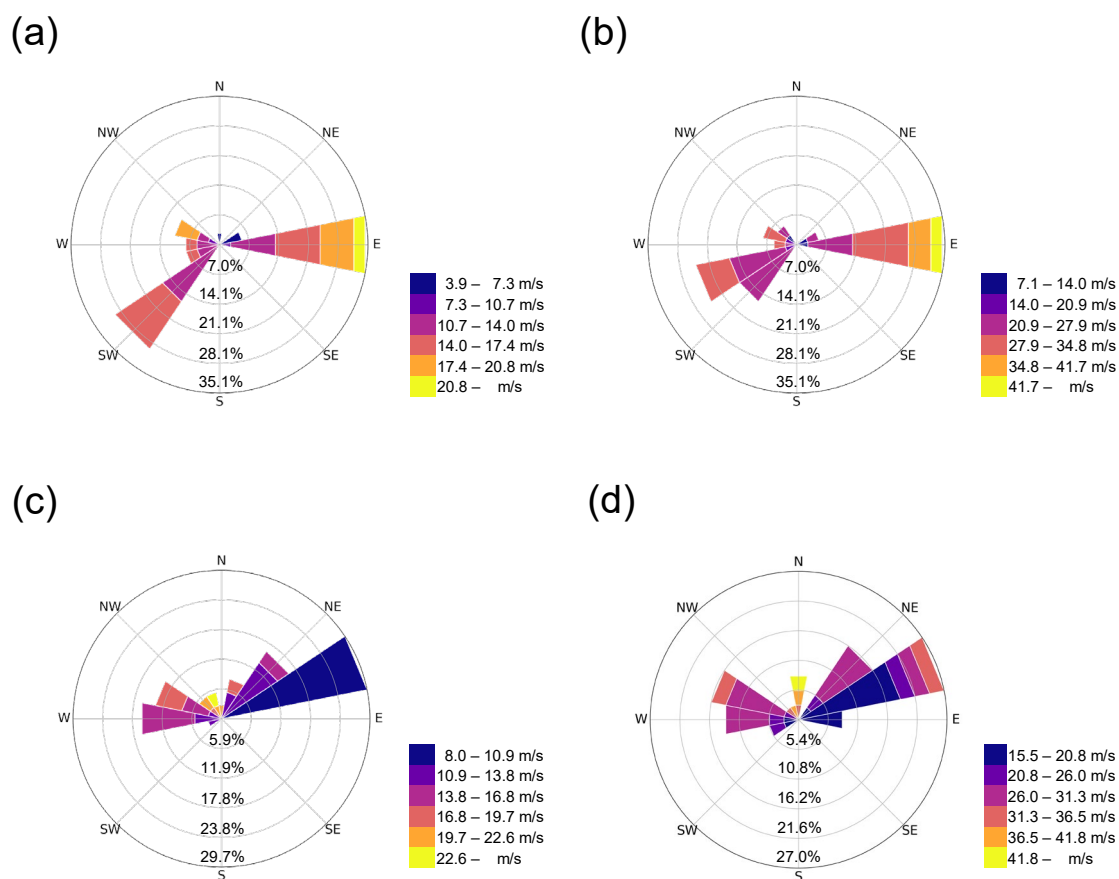


図-2.5 アメダス観測地における台風通過時の風配図. (a) 10 分間平均風 (三浦), (b) 10 分間最大瞬間風 (三浦), (c) 10 分間平均風 (横浜), (d) 10 分間最大瞬間風 (横浜).

2.4.4 沿岸域の突風が越波にもたらし得る影響

現地調査の結果から、台風に伴う沿岸域の瞬間的な強風や突風が越波被害を強める過程として、次のものが挙げられる。

(a) 打ち上げ高の増加 (間接的な影響)

一般に、風が波に輸送するエネルギーをもって波高が高まる。したがって、越波し得ない程度の高波に強風が作用することで、越波を引き起こす波高に成長した可能性が考えられる。これは風が越波現象に及ぼす間接的な影響と言える。

(b) 水塊・飛沫の輸送(直接的な影響)

築山の斜面を大きく抉った遡上跡や、福浦地区の奥まで浸水したことを踏まえると、越波水塊は強風によって大きな質量輸送力を維持していたと考えられる。したがって、護岸の周囲では打ち上がった越波水塊が、水塊や飛沫として風に輸送される現象が生じる可能性がある。築山頂部でスポット的な塩枯れが広く発見されたことも、同様のプロセスによるものだと考えられる。このような風の影響は越波水塊や飛沫に及ぶものであり、直接的な影響と言える。

2.4.5 水塊の質量輸送としての越波現象

SWAN に代表されるような第三世代波浪推算モデルを用いた波浪推算法はスペクトル法と呼ばれる。この考え方では、風はある時間幅を持つエネルギー輸送の媒体であり、瞬間的な風は考慮に入らない。瞬間的な風は撃力的な作用をもち、局所的で短い時間スパンの水の運動に影響を及ぼす。したがって、前述の現象を議論するためには、風波のようなエネルギー輸送の視点から高波を捉えるのではなく、水塊の質量輸送現象と捉えるべきである。すなわち、局所的な領域で流体運動を Navier-Stokes 方程式や連続式などを用いて力学的に解くことが求められる。

2.5 本章のまとめ

本章では、2019年台風15号が横浜市福浦海岸にもたらした越波・浸水被害を取り上げ、本研究の主題となる現象として、沿岸域の強風が越波規模を強めた可能性を見出した。また、その現象を捉えるにあたり、沿岸域の高波や越波を水塊の質量輸送として捉えるという本研究の基本的な視点を示した。

現地調査で発見された直立護岸の破壊や護岸背後の丘の斜面洗掘跡から、大量の水塊が大きな輸送力をもって海岸に來襲したことが分かった。さらに、丘頂部で散見された塩枯れからは、ある程度の大きさの水塊が風によって輸送されたと考えられる。しかしながら、気象一波浪モデルによる波浪追算の結果は、この被害を説明するには過小なものとなった。台風通過時の風の観測データに注目すると、強烈な岸向きの風が越波規模を強めた可能性がある。突風のような瞬間的な風の作用は、時間平均的な波浪モデルでは捉えることができないため、波浪を過小評価したと考えられる。

現地調査の結果から推察すると、風の影響は、越波に至るまでの伝播過程にもたらず間接的なものと、越波水塊や飛沫を輸送する直接的なものが挙げられる。いずれの現象についても、風波の延長としてエネルギー輸送の視点から高波・越波を議論するのではなく、水塊の質量輸送という力学的な視点で捉えることが有効であると考えられる。

第3章 既往研究の整理と本研究の方針

3.1 風の影響の視点から整理する越波研究の変遷

越波現象における風の影響の可能性は古くから議論されてきた(たとえば, Iwagaki et al., 1996). 越波現象は概して低気圧などの強い風が作用する状況で生じるため, 風の影響を明らかにすることは, 海岸構造物の設計や防災にあたって重要であった. しかしながら, 各国で独自に提案された海岸構造物設計のマニュアルや, 基礎となる概念には風の影響は考慮されていない(たとえば, Goda et al., 1975, US Army, 1984, Besley, 1998). 越波研究の初期段階では, 規則波での研究, 次いで不規則波での研究に焦点が当てられ, 風の影響に関する考察は優先されなかったものと考えられる.

沿岸域の波浪現象における風の影響として, 砕波形態の変化が初めに検討された. Galloway et al. (1989)は, 現地観測を通して, ある程度の強さの岸向きの風は, 崩れ波砕波(spilling breaker)の生成を促すと指摘している. また, Douglass (1990)は二次元水槽を用いた水理実験によって類似の結果を得た. さらに, この実験では, 岸向きの風に伴う波頂部の摂動が崩れ波砕波を助長しているという定性的な考察を示した. これらの知見は緩勾配の斜面での現象に限られているが, 風の影響の一つの側面が明らかにされたという点で重要な示唆を与えた.

1990年代は, 水理実験を中心とした風の影響の考察が, それぞれ異なる研究背景や研究対象において実施された. Ward et al. (1994, 1996, 1998)は, 傾斜護岸における遡上高と越波流量について系統的な実験を行った. この実験では, 風速と入射波の波形勾配が制御され, 斜面の性質としては, 勾配と摩擦の影響が考慮されている. この結果, 風の作用によって, 遡上高と越波流量のどちらも増加する傾向があり, 砕波の存在, および砕波に関する条件の変化(砕波位置や砕波形態など)が遡上高や越波流量に強く影響していることが分かった. さらに, 風作用下における, 砕波後の乱れた流れについて示唆に富む定性的な考察を行った. 一方で, 直立護岸の越波現象としては, 特に飛沫に注目した水理実験が行われた(たとえば, Hashida 1996, de Waal 1996). 高波や越波に伴う塩害の程度の検討が, これらの実験的研究の背景であった.

1990年代後期から2000年代中頃にかけて、欧州を中心に越波に対する海岸構造物設計に関する大規模国際プロジェクトが立ち上げられた(VOWS, OPTICREST, CLASH など). これらのプロジェクトでは、ニューラルネットワークなどのデータ駆動的な手法や、スケール効果を克服するために非常に多くの水理実験を通して半経験的な設計式を帰納的に導出する手法が採用された. また、越波現象全般について、多角的な視点から議論され、風の影響についても調査された. Medina (1998)は、風と越波現象を複雑系として捉える視点からニューラルネットワークによる風の影響の評価手法の適用性を議論した. Pearson et al. (2002)は、鉛直壁における越波現象のスケール効果は小さいことを指摘した一方で、風速分布にはスケール効果があるため、実際の風作用下の越波現象は、実験系のもものと異なる可能性があることを主張した. González-Escrivá et al. (2002)は、実験系における風の物性を検討するため、斜面を遡上する水塊付近の風速分布を調べた. Pullen et al. (2004)は、現実系と実験系における越波流量を直接比較し、当時の中心的な設計指針の一つであった EA Manual (1999)の適用性は非常に強い風がない場合に限られることを示した. また、Pullen et al. (2006)は、鉛直壁のある実際の海岸で越波水塊の一次元分布(汀線から岸沖方向)を調査し、一次元の飛散距離として経験式を導出した.

CLASH プロジェクトにおける一連の研究から導かれた中心的な設計概念は De Rouke et al. (2005)にまとめられている. 様々な護岸形状における半経験式とスケール効果が整理されており、とりわけ鉛直壁については評価性能が高いことを示した. しかしながら、風が作用する状況では信頼性が低下する可能性があることを指摘し、設計においては風の影響の調整項の導入(Kortenhaus, 2004)やニューラルネットワークに基づくデータベースの利用(たとえば、van Gent et al., 2007, van der Meer et al., 2009, 2014)の余地が議論されている. 最終成果物である EurOtop マニュアルでは、第一版(2007)では De Rouke et al. (2005)でまとめられた風の影響の補正項 f_{wind} が紹介されている(式-3.1).

$$f_{wind} = \begin{cases} 4.0 & (q \leq 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}) \\ 1.0 + 3.0 \left(\frac{-\log q - 2}{3} \right)^3 & (10^{-5} < q < 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}) \\ 1.0 & (q \geq 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}) \end{cases} \quad (3.1)$$

ここで、 q は無風時の越波流量を示す. 式-3.1 は、越波流量における風の影響は小越波時に相対的に大きく、高々4倍程度であり、大越波量では風の影響はないと主張している. ただし、この提案式は CLASH プロジェクトで参照された実験や観測データ(欧州を中心とする)に基

づいており、日本の海域での適用性や、将来的な波浪場における拡張性は明らかではない。また、式-3.1 は第二版(2018)では削除されている。

CLASH プロジェクトの後は、設計式の適用性や拡張の余地を調査することを目的とする実験が行われた。Lorke et al. (2012)は、三次元平面水槽に送風機を設置し、傾斜護岸における遡上高と越波流量を評価した。その結果、高風速の作用によって越波流量が減少することを示した。しかしながら、越波流量が減少したケースでは砕波が生じていることに注意する必要がある。このため、実験結果は風による砕波状態の変化によって間接的に越波流量が減少したと解釈することもできる。

このように、風的作用によって越波流量が変化すること(大部分は増加と報告)は、とりわけ水理実験を通して指摘されてきた。しかしながら、これらの知見を設計指針に反映することが難しい背景として、力学スケールについての理解が進んでいないことが挙げられる。風作用下における越波現象は、空気と水が相互作用をしつつ運動する系であり、見方によっては異なる相似則を考える必要がある。たとえば、水や波の運動についてはフルードの相似則、水面に作用する風速シアについてはレイノルズ則、飛沫スケールの運動についてはウェーバー則の適用が考えられる。しかしながら、複数の相似則を同時に満たすことは原理的に不可能である。González-Escrivá et al. (2004)は、風洞水槽での 5-7 m/s の風速が、現実での嵐の状況に相当すると主張している。一方、Yamashiro et al. (2004)は 1/45 スケールの実験系において、実験風速と実際の風速の比率は 1:3 であると示唆した。これらの結果は、実験水槽の幾何条件として非常に限られているものの、参考として、風洞水槽の内の風速は現実の 20-30%程度に相当すると考えられる。

力学スケールの制限を克服する方法の一つとして、数値モデルの利用が挙げられる。2010年代以降は計算機の性能向上に伴い、数値流体力学の分野が大きな発展を見せた。特に、流体の運動における有限体積法と、気液混相流の界面捕捉法としての VOF 法を組み合わせた計算スキーム(FVM-VOF 法)は、海岸工学において広い適用性を示し、砕波や越波にもたらす風の影響についても検討された(たとえば、菊, 2011, Kiku and Kawasaki, 2014, Hieu et al., 2014, Xie, 2017)。しかしながら、高風速条件における適用性と計算安定性の維持については検討の余地がある。加えて、離散化のアルゴリズムや乱流モデルの選択について十分吟味しないと容易に計算量が過大になる。De Chowdhury et al. (2021)は風の効果について FVM-VOF 法に基づく数値モデルの適用性をある程度示したものの、水面が大変形するような条件における適用性については更なる検討の余地がある。

3.2 これまでの知見の整理

越波現象は、水と構造物の相互作用で生じるため、それ自体が複雑な現象であり、これまでの研究は多くの水理実験を通して帰納的に設計式を導出することを基本として発展してきた。風の存在は、現象を更に複雑にさせており、風の効果は複数の研究での断片的な指摘に留まっている。風の影響を補正項で評価することは、設計においては非常に有用であるものの、過度に単純化することは、風の効果の検討が十分でない現状においては、却って背後の物理現象を見逃すことにつながりかねない。系統的な実験による風の影響の整理が必要であると考えられる。

数値解析によるアプローチは一定の成果があるものの、越波が顕著になる強風条件での適用性については、原理的に不明なところが多いことが分かった。

3.3 本研究の具体的なアプローチと既往研究における立ち位置

これらの既往研究と、明らかになった不明点を踏まえ、本研究では、数値計算と水理実験の両面からのアプローチを考えた。数値計算・水理実験共に現象の本質に迫る議論が著しく不足しているものの、数値計算手法は相似則を克服する可能性があるという点で応用性が高いと判断した。このため、数値計算による検討を先に行った。

数値計算によるアプローチでは、現象を再現するにあたって適用性の限界や、現実的な計算時間で数値計算が実行できるような計算設定についての議論を中心に行った。したがって、本研究は、風と越波という非常に複雑な気液混相流の問題に対して、進展著しい数値流体力学の適応限界、および課題を浮き彫りにする立場となる。

水理実験によるアプローチでは、護岸で最も基本的な形状で、福浦海岸でも用いられている直立壁での越波を対象に、風の影響を丁寧に調べた。特に、録画映像による定性的な考察、および PIV 解析で得られる流速分布の構造による定量的な考察を議論の中心に据えた。既往研究で指摘されているように、越波に至る前の砕波における風の影響も間接的に越波の規模に関連しているため、砕波を越波の素過程の一つと見なした。これまで個別に研究されていた砕波や越波水塊への風の影響について、系統的な実験手法で総括することが、既往研究に連なる本研究の試みである。

3.4 本章のまとめ

本章では、数ある越波に関する研究について、風と越波の影響という視点から議論の変遷を整理し、本研究で明らかにすべき点をまとめた。そして、以降の章で展開される具体的なアプローチについて述べ、既往研究に連なる本研究の立ち位置を明らかにした。

第4章 数値計算による検討

4.1 風-波連成系の数値計算手法

4.1.1 流れの数値解析手法

本研究で対象とする現象は、空気と水が、それぞれ風と波として相互に作用しながら運動する系であり、乱れの顕著な多相流(気液混相流)としては非常に複雑で、高級(high-level)な計算手法を必要とする。

海岸工学で対象となる気液混相流の多くは、自由表面を有する水の運動に焦点を当てており、同時に空気が運動する例はほとんど見られない。気液混相流を原理的に解析できる手法は、有限体積法、粒子法、格子ボルツマン法など複数存在するが、その全てに長所と短所がある。本研究では、混相流の解析で最も標準的と考えられている有限体積法に基づく計算モデルの開発を論じることにした。

4.1.2 有限体積法の基礎方程式とVOF法の概念

(a) 有限体積法の基礎方程式

前述のように、有限体積法では、計算領域を構造格子や非構造格子で構成されるメッシュに分割し、メッシュごとに流体運動に伴う物理量の収支を計算する。熱移動を考慮しない系で流体が運動する場合、支配方程式は以下で表される質量保存(式-4.1)と運動量保存(式-4.2)である。これらはそれぞれ、連続式、Navier-Stokes方程式とも呼ばれる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (4.2)$$

ここで、 u は流速、 p は圧力、 τ はせん断応力、 f は体積力を表す。Stokes流体では、せん断応力テンソルは次のように表される。

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4.3)$$

μ は粘性係数である。混相流では複数の流体で密度が異なることが多く、特に水と空気では密度は1000倍、粘性係数は100倍の違いがある。異なる流体を密度と粘性係数で区別して捉える方法が次項で述べるVOF法の基本的な考え方である。

(b) 界面捕捉法

水と空気の気液混相流では、その界面である自由表面を捉えることが重要である。有限体積法における界面捕捉法は表-4.1に示すように、二つに大別される。

表-4.1 界面捕捉法の分類。

(a) Surface method	(b) Volume method
(1) 界面粒子をLagrange的に追跡する方法	(1) マーカー粒子による方法
(2) 高さ関数による方法	(2) 体積分率による方法 (VOF法)

(a)では界面を直接定義し、時間的に追っていくので、界面追跡とも呼称される。(a)-(1)では界面上に粒子を配置し、それぞれの粒子をLagrange的に追跡する。しかしながら、砕波や打ち上げ時のように自由表面が複雑に変化する場には適用できない。(a)-(2)では、自由表面高さ η について、運動学的境界条件で界面を定義する(式-4.4)。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} = v \quad (4.4)$$

しかしながら、式-4.4は二次元解析でのみ安定で、三次元に拡張できない。浅海波での適用に限れば、Level-Set法(たとえば, Bihs et al., 2016)の適用例は多い。図-4.1(a)のように、 σ 座標を定義すれば、自由表面を厳密に捕捉することができる。ただし、図-4.1(b)のように、砕波や気泡の混入によって自由表面が多価になる場合は適用できない。

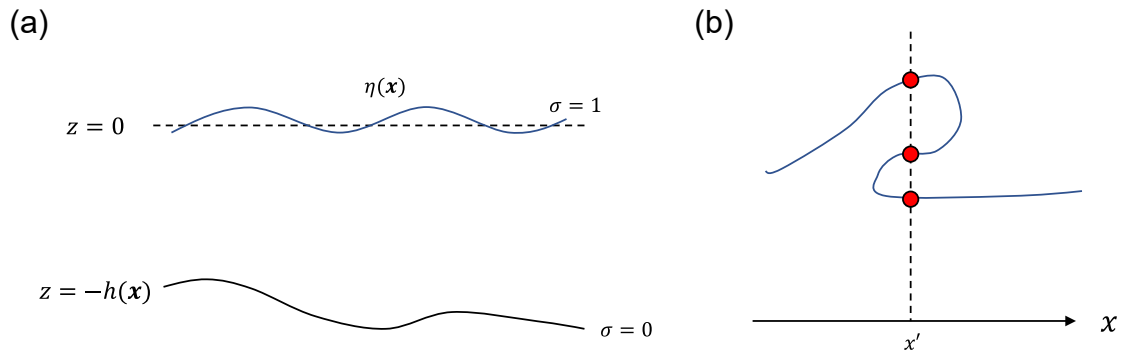


図-4.1 (a) 高さ関数法 (Level-Set 法) で一般的に用いられる σ 座標の例. (b) Level-Set 法による計算が破綻する場合. 位置座標 x' において, 対応する界面が複数個存在する.

一方で, (b)では計算格子それぞれのセルについて, 液相・気相・界面を含むの三種類に分類する. (b)-(1)では流体の占める領域に仮想的な粒子 (マーカー粒子) を設置する. 粒子は Lagrange 的に追跡され, マーカー粒子を含まないセルに隣接したセルを, "界面を含むセル" とみなす. この方法は三次元への拡張が可能であるが, 運動が複雑になる程マーカー粒子の追跡に非常に大きな計算負荷がかかる. (b)-(2)はセルごとに水の占める体積割合を表す体積分率 α を定義し, セルを次のように分類する.

$$\alpha = \frac{V_{fluid}}{V_{air}} \quad \begin{cases} 1 & (V_{fluid} = V_{cell}) \\ 0 & (V_{fluid} = 0) \\ 0 < \alpha < 1 & (V_{fluid} < V_{cell}) \end{cases} \quad (4.5)$$

式-4.5 で定義された α に対して, 次の移流方程式を解くことで自由表面を模擬する.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \alpha) = 0 \quad (4.6)$$

三次元問題への拡張性や数値計算上の扱いやすさの観点から, 現在では (b)-(2) の手法が主流となっている. 相状態をセル体積で定義することから, この手法は VOF 法 (Volume of Fluid) と呼ばれている.

$0 < \alpha < 1$ となるとき, セルには気体と液体が混在していることになる. このセルに対して, 支配方程式である式-4.1 と式-4.2 の表現は本質的には変わらない. 混相流については二相の体積で重みづけ平均した密度と粘性係数を用いる.

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_{water} + (1 - \alpha) \rho_{air} \\ \mu = \alpha \mu_{water} + (1 - \alpha) \mu_{air} \end{cases} \quad (4.7)$$

ところで, 式-4.6 の移流方程式を風下差分した式を Taylor 展開すると二次の項に拡散項が出現し, 数値拡散の影響が無視できないことが知られている. これは各相で個別に移流方程

式を解くにあたり、境界近傍で流れの齟齬を生じる可能性がある。そこで、各相での速度を結びつけ、かつ数値拡散を抑制するように式-4.6 を修正する必要がある。次の二種類の速度を定義する。

$$u_{r,j} = u_{water,j} - u_{air,j} \quad (4.8)$$

$$\bar{u}_j = \alpha u_{water,j} + (1 - \alpha) u_{air,j} \quad (4.9)$$

式-4.8 は相対速度、式-4.9 は体積分率による重み付け平均速度を意味している。これらを式-4.6 に組み込んで、

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \alpha) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_{r,j} \alpha (1 - \alpha)) = 0 \quad (4.10)$$

を得る。左辺第三項はセルが二相の境界面となる時のみ作用し、数値拡散を圧縮するような効果をもつことから、compressive term と呼ばれる。本研究で問題としているような空気も水も運動する場では相対速度を含む compressive term が自由表面の運動に影響している可能性があることに注意しなければならない。

(c) 計算アルゴリズムと差分スキーム

非圧縮性流体の計算アルゴリズムは速度と圧力が変数となるので、圧力-速度連成アルゴリズムと呼ばれることもある。現在提案されている計算アルゴリズムの体系を表-4.2 にまとめる。

表-4.2 非圧縮性流体の計算アルゴリズム。

計算アルゴリズム	NS方程式の各項の時間進行法		
	移流項	粘性項	圧力項
MAC法系統	陽解法	陽解法	時間進行しない (Poisson方程式)
FS法系統	陽解法	陰解法	
提案されていない	陰解法	陽解法	
SIMPLE法系統	陰解法	陰解法	

陽解法では現在の値を用いて、次のタイムステップでの値を求める。差分が単純であるが、精度の高い計算を行う際は CFL 条件に基づく数値安定性を満たすためにタイムステップを非常に小さくする必要があり、計算コストが高くなりやすい欠点がある。一方、陰解法は現在のタイムステップと次のタイムステップの一部の値を用いて、残りの箇所の値を計算する方法

である。無条件で安定した計算が可能であるが、差分化を代数方程式で表す必要があり、プログラムで解く際には強力な線形代数機能を搭載したライブラリの利用が必須となる。NS 方程式と連続式を連立すると、圧力に関する Poisson 方程式が導ける。これは楕円型の微分方程式であり、時間発展せず、移流項や粘性項とは別に解く。

各計算アルゴリズムの違いとしては表-4.2 にまとめたように、移流項と粘性項の時間進行法に見られる。本研究では移流項と粘性項を陰解法で差分する SIMPLE 法系統のアルゴリズムを採用する。このうち基本となる SIMPLE 法は定常問題に用いるスキームで、非定常計算スキームの PISO 法と組み合わせた PIMPLE 法は混相流の計算アルゴリズムとして最も標準的である。ただし、NS 方程式では完全陰解法となるが、体積分率 α の移流方程式は陽的な差分になるので、計算が収束しない場合も起こり得ることに注意されたい。

偏微分方程式を有限体積法で離散化すると、最終的に連立一次方程式が得られ、大行列を含む代数方程式を演算をする必要がある。対称性などの大行列の性質は変数ごとに異なり、それぞれについて適したソルバーを選択することが高速計算を実行する上で重要となる。たとえば、圧力の Poisson 方程式の係数行列は対称行列となるが、体積分率の移流方程式の係数行列は非対称行列となる。前節で整理した方程式系において、ソルバーと変数の組み合わせを表-4.3 にまとめた。

表-4.3 選択したソルバーと対応する変数。

	ソルバー	備考
圧力 p	PCG	前処理にはDICを用いた
圧力補正值 δp	PCG	前処理にはDICを用いた
体積分率 α	smooth solver	反復法の計算にGauss-Seidel法を用いた
速度 u 乱流エネルギー強度 k	smooth solver	反復法の計算にGauss-Seidel法を用いた

圧力 p のソルバーとして、PCG (Preconditioned Conjugate Gradient method, 前処理付き共役勾配法) や GAMB (Geometric-Algebraic Multi-Grid, 代数的マルチグリッド法) が挙げられる。PCG は複雑なメッシュ形状にも対応可能であるという点で一般性が高いが、対称性の高いジオメトリにおける計算では GAMB は高速に機能し、並列計算でも有利に働く。本研究では

PCG を用い、前処理の方法として、DIC (Diagonal Incomplete Cholesky decomposition, 対角不完全コレスキー分解) を選択した。

一方、体積分率や速度のソルバーとして、PBiCG (Preconditioned BiConjugate Gradient method, 前処理付き双共役勾配法) や smooth solver (平滑化ソルバ) などが挙げられる。本研究では smooth solver のうち、Gauss-Seidel 法を選択した。ここでいう平滑化とは、反復ソルバーの収束性を改善するための操作のことを指し、一般的には反復法と呼ばれる。反復法には Jacobi 法や SOR 法なども存在するが、Jacobi 法は収束性に欠点があり、大行列になるほど計算に要する時間は増大する。SOR 法は収束性を最適化するパラメータ設定を試行錯誤しなければならない。以上のような大行列計算に関する一般性の視点から Gauss-Seidel 法を選択した。

以上の基礎方程式、計算スキームをオープンソースの流体モデルである OpenFOAM を用いて実装した。ソルバーには olaFlow (Higuera, 2017) を用いた。olaFlow は気液混相流のソルバーとして一般的に用いられる interFoam を基礎として、水理実験を再現しやすいように波の造波特性や境界条件、乱流モデルなどを改良したソルバーである。

4.2 数値モデルの開発

4.2.1 Ward et al. (1994)の実験

数値モデルを開発するにあたり、本研究では、Ward et al. (1994)の風洞水槽を用いた実験的研究をベンチマークとして参考にした。比較的単純な実験設定で、体系的な実験結果が発表されている点を選択の理由である。

図-4.2 は Ward et al. (1994)の用いた二次元風洞水槽の概要である。二次元水槽を覆うような形式で風洞を製作している。パドル式造波装置で生成された規則波は約 22 m のフェッチをもって勾配 1/3 の急なスロープを遡上して越波する。越波水塊はスロープ背後の水槽に直ちに補足される。水深は 0.5 m で固定され、入力波の波形勾配と作用風速を変化させることで結果の比較を行っている。入力波の諸元を表-4.1 にまとめた。また、作用風速 U は 0 m/s (無風), 8 m/s, 12 m/s, 16 m/s である。

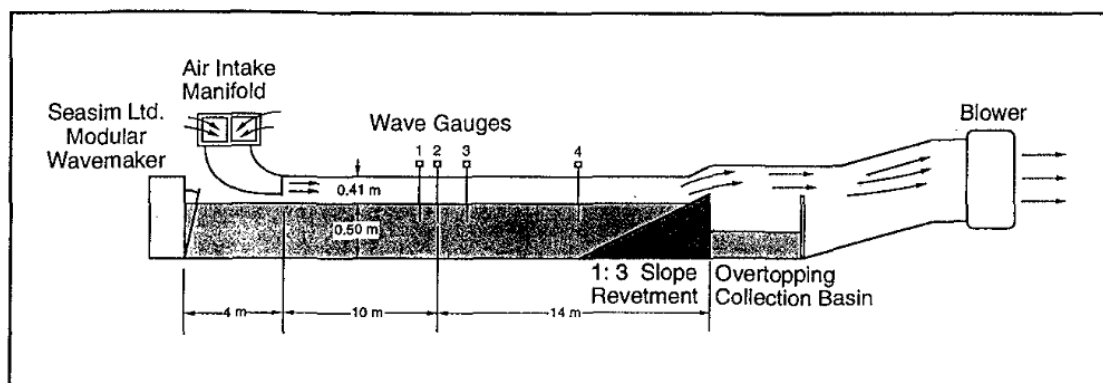


図-4.2 ベンチマークとなる実験で用いた二次元風洞水槽 (Ward et al. 1994 より直接引用).

表-4.4 入力波の諸元.

波形勾配 H/L [-]	周期 T [s]	波高 H [m]	波長 L [m]	位相速度 C [m/s]
0.0662	1.00	0.100	1.51	1.51
0.0465	1.00	0.070	1.51	1.51
0.0331	1.00	0.050	1.51	1.51
0.0156	1.75	0.054	3.45	1.97
0.0092	1.75	0.032	3.45	1.97
0.0073	2.50	0.038	5.24	2.10
0.0041	2.50	0.022	5.24	2.10

4.2.2 解析条件の整理

ジオメトリ設定を図-4.3 に示した. x が負となる領域は風のみが作用する. 波の入力面 ($x=0$) とずらすことで, 相境界近傍の風と波の速度分布を安定させた. また, Ward et al. (1994) の実験では気相領域の高さは 0.91 m であったが, 本解析では上面境界が風速分布を著しく乱したため, 上面を水面から 1.50 m の高さに設置した. これにより, 所与の風速分布が得られることを確認した.

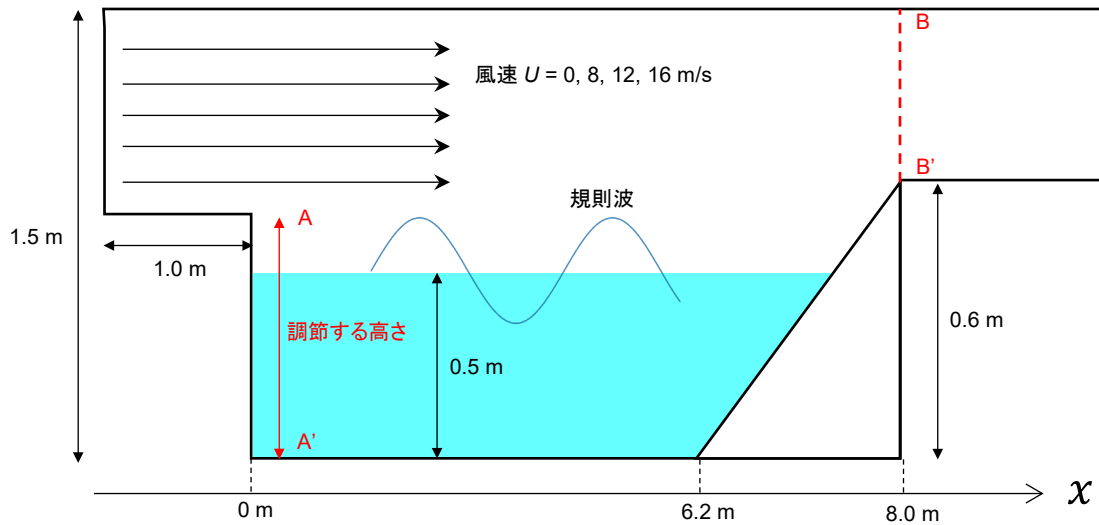


図-4.3 再現した風洞水槽のジオメトリ設定. 両軸の縮尺は一定でない.

また、本解析手法では風速シエアを実装していないため、吹き寄せによるスロープでの水位上昇が再現できなかった。しかしながら、実験水槽における吹き寄せはミリメートル程度のオーダーと、浅水変形や風による風波の成長と比較して小さいため、これを考慮しないことにした。このため、本数値モデルは、風速シエアによって生じる風波の影響よりも、うねりによって運ばれる水塊の輸送力に及ぼす風の影響に注目していることに注意されたい。

越波における風の影響を考察する際に岸から 3-4 波の挙動の影響が大きいという予備的な検討から、入力波の 3-4 波長分にあたる 8 m まで水槽長さを短縮した。パドル側の境界で二次的な反射波の影響が出ないように、境界条件を設定した。

メッシュサイズは 0.01 m とした。本解析のように、液相と気相で運動の速度が大きく異なる場合は CFL 条件に注意する必要がある。たとえば、本解析の風速 12 m/s のケースにおいて、メッシュサイズを 0.001 m とより細かくすると、液相では計算できるものの、相境界および液相で数値発散が生じた。また、上に述べた設定では、一般的なワークステーションで 200 時間程度の計算時間を必要とした。

乱流モデルには式-4.11 および、式-4.12 に表される渦動粘性モデルを用いた。

$$v_t = C_k \Delta k^{0.5} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \widehat{u}_j k)}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho(v + \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \\ = -\frac{2}{3} \rho k \frac{\partial \widehat{u}_k}{\partial x_k} + \rho \nu_t \frac{\partial \widehat{u}_i}{\partial x_j} \left(2\widehat{D}_{ij} - \frac{1}{3} \text{tr}(2\widehat{D}_{ij}) \delta_{ij} \right) - C_\epsilon \frac{\rho k^{1.5}}{\Delta x} \end{aligned} \quad (4.12)$$

ここで、 ν_t は渦動粘性係数、 D_{ij} は応力テンソル、 k は乱流エネルギー強度を表し、ハットはSGSスケールでの平均値を意味している。モデル定数は $C_k = 0.094$ 、 $C_\epsilon = 1.048$ とした。これは1次元のLESモデルに分類され、OpenFOAMに実装されている乱流モデルでは計算負荷が比較的小さいものである。

4.2.3 結果

図-4.4にWard et al. (1994)の実験結果と、開発した数値モデルでの解析結果を比較した。越波流量は単位幅あたりで表している。風が強いほど越波流量が増加する傾向は両者に見られた。無風から弱風の条件($U = 0$ m/s, 8 m/sの場合)では概ね近い越波流量が得られたが、強風の条件($U = 12, 16$ m/sの場合)では解析値が実験値よりも小さくなった。また、実験結果では $U = 16$ m/sの時の越波流量は、波形勾配 0.0465の時に最大で、それより大きな波形勾配では越波流量が減少している。これについてWard et al. (1994)は、波形勾配が大の時は越波の前に碎波が生じてしまい、エネルギーを損失したためと指摘している。一方で、解析結果では、波形勾配の増加に従って越波流量も増加しており、このような碎波の影響は観察されなかった。

このように、数値モデルは現象を完全に再現できてはいないものの、越波流量に対する風の影響は明らかに確認された。続く節で、いくつかのパラメータにおける風の影響を考察する。

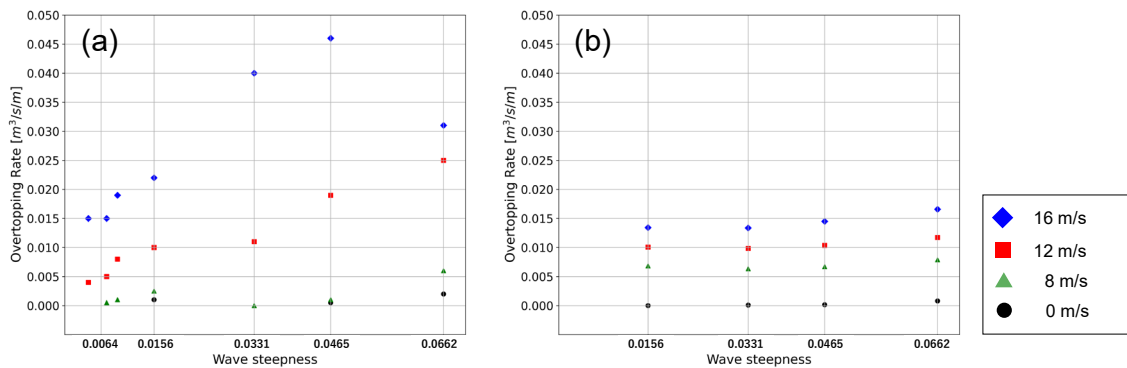


図-4.4 入射波と風速の条件で整理した越波流量。(a) Ward et al. (1994)の実験結果。(b) 提案した数値モデルによる計算結果。

4.2.4 風速分布の考察

図-4.5 に水槽中央付近における強風時 ($U = 16 \text{ m/s}$) と無風時の風と波の様子を比較した。風速分布はベクトルで示されており、ベクトルの向きが風向、大きさが風速を表している。図-4.5(a)では水面付近で風速が小さくなっていることが分かった。さらに、波の峰で遮蔽された領域で流線の剥離が生じ、渦が生成されている様子も明らかになった。これらは自由表面近傍の気流の振る舞いとしては妥当である。

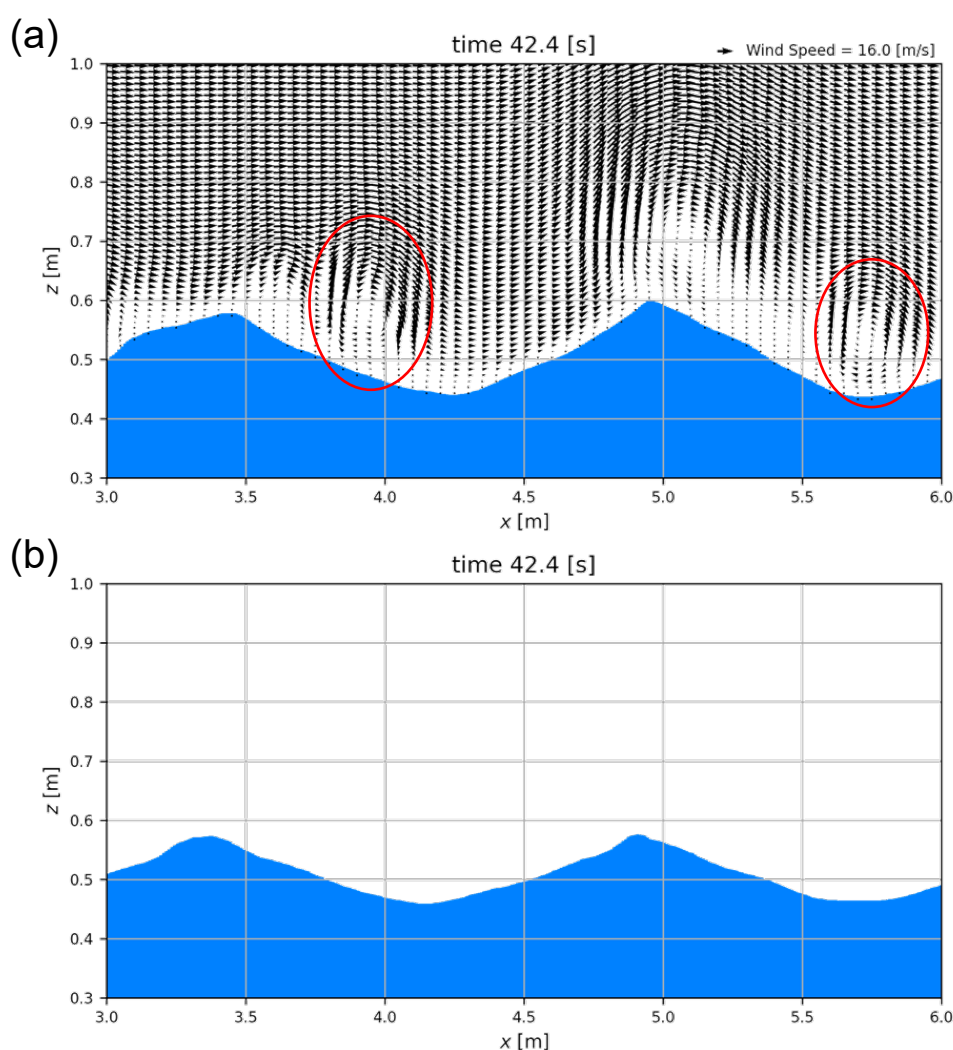


図-4.5 波形勾配 $H/L = 0.0662$ の入射波における波の伝播領域での分速分布。(a) $U = 16 \text{ m/s}$ のケース。波の遮蔽によって生じた気流渦の箇所を赤い丸印で示した。(b) 無風の場合。

図-4.6 は波の峰と谷での鉛直風速分布を表している。風速分布は概ね対数則に従っており、波の谷では静水面より下の領域では負の風速が生じていることが分かった。図-4.5(a)で示

したように遮蔽領域(波の谷付近)で渦が見られたのは、このように負の風速が生じているためである。

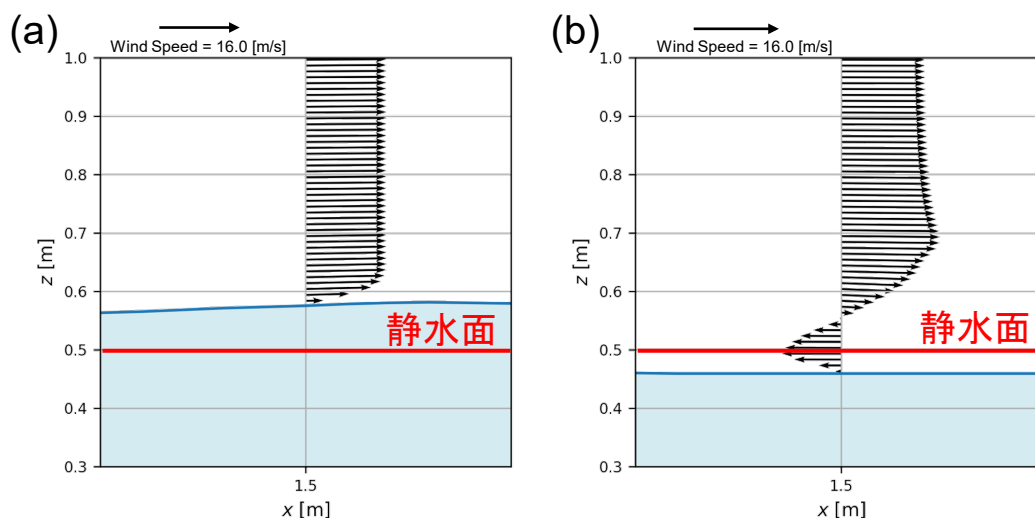


図-4.6 波の伝播領域における典型的な風速の鉛直分布。(a) 波の峰における風速の鉛直分布。(b) 波の谷における風速の鉛直分布。矢印が右向きの時、正方向の風速(岸向き)を意味する。

4.2.5 圧力分布と波高変化の考察

図-4.7 に示すように、風が入力されることによって圧力の空間的な分布が顕著になった。特に、波の峰の部分では圧力が低下することがわかった。この部分的な負圧により、波峰の先端部が摘まみ上げられるように変化し、振幅が増加していると考えられる。一方で、波の谷の部分では正圧が生じていることが分かった。これは水を下方方向に押し込む変化を促している。このような圧力変動により、波の振幅は増加し、波形が急峻化していると考えられる。このように境界形状の変化に伴う圧力変動によって波が発達する過程は Kelvin-Helmholtz 不安定や Miles のせん断流理論に類似している。

一方で、この圧力変動は連続式の視点でも説明できる。水の密度は空気の 1000 倍程度であるため、系における流体(水流・気流の両方を意味する)の疎密は、実質的には水の振る舞いによって決まる。波が過ぎ去っていく箇所では、重い流体が通り過ぎたので流体的には疎であり、連続式を満足するために風が吹き込んで正の圧力を示す。逆に、波が向かってくる箇所は流体的に密であるので、風が流れ出て負の圧力を示す。結果的に、波の峰および峰から谷に向かう領域で負圧となり、波の谷で正圧となると考えられる。

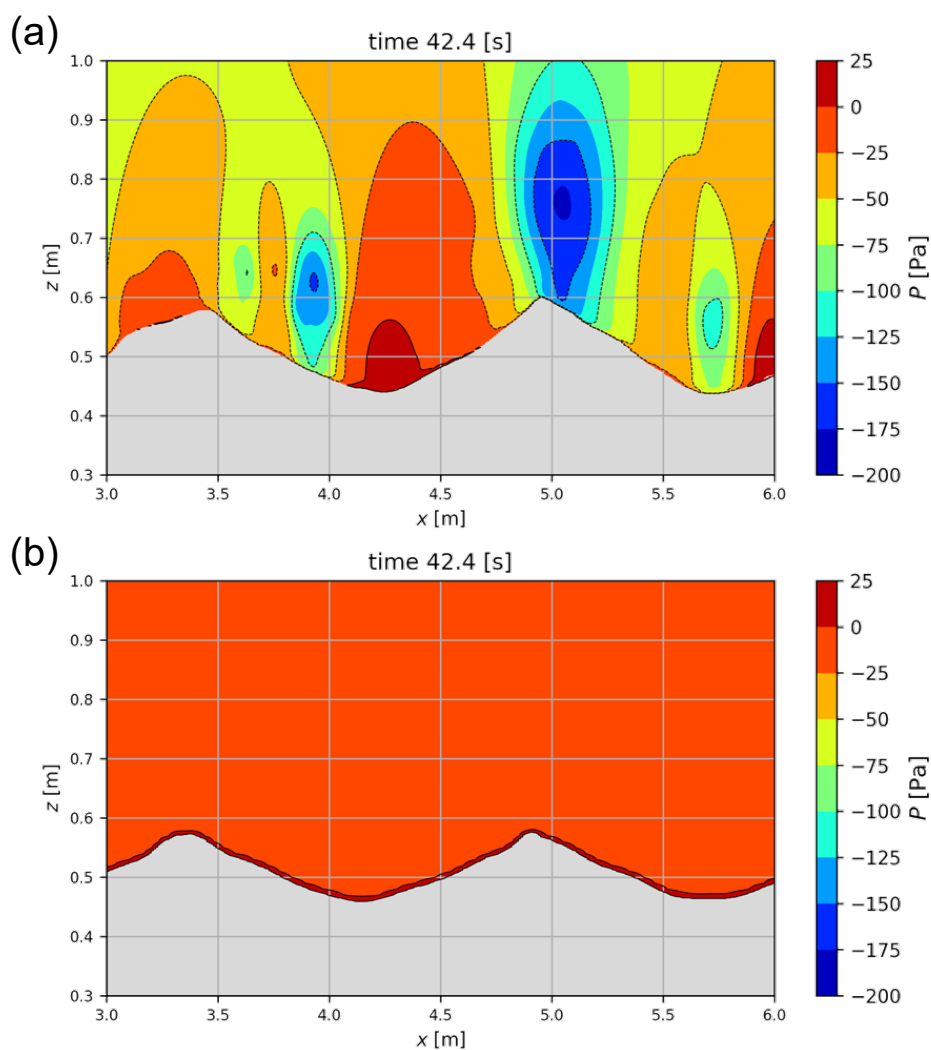


図-4.7 波形勾配 $H/L = 0.0662$ の入射波における波の伝播領域での圧力分布. 気圧 p はゲージ圧力(大気圧を 0 Pa とする)である. (a) $U = 16 \text{ m/s}$ の場合. (b) 無風の場合.

4.3 福浦海岸におけるモデルの適用

4.3.1 数値計算の設定

Ward et al. (1994)の実験ケースに適用した数値モデルを拡張し, 現実スケールの福浦海岸に適用する. ジオメトリを図-4.8 に示した. 境界条件は先と同じものを採用した. 水深や鉛直壁の高さについては第2章で述べた現地調査の結果に基づく. 福浦海岸の代表勾配として $2.4/100$ を用いた. これは内閣府の海底データから判断した. 東京湾の海底勾配は概して緩

やかであるものの、 $1/20 - 1/50$ 程度と広く分布している。本数値実験では、浅水変形や越波水塊における風の影響に注目するために、緩やかな勾配を選択した。計算格子のメッシュサイズは 0.1 m とした。

気流の流入境界は波の流入境界の 10 m 後方に配置した。作用風速は $U = 41 \text{ m/s}$ とし、福浦海岸での最大瞬間風速が吹いた状況を再現した。比較として、 $U = 0 \text{ m/s}$ (無風) と、平均風速に近い $U = 20 \text{ m/s}$ のケースも実施した。

入力波として、第2章で述べた MSM-SWAN モデルを用いた再現した波浪の有義波高の最大値 $H_s = 2.7 \text{ m}$ と、その時の有義周期にあたる $T_s = 5.1 \text{ s}$ を基準とする不規則波を考えた。風作用下において、どの波高の波が越波をもたらすかを検討するため、不規則波はスペクトル分布に基づいて入力するのではなく、様々な波高による越波流量を、波高の確率分布に従って重みづけをすることで見積もった。本数値実験では、波高の確率分布として、Rayleigh 分布を採用した。ただし、波の周期は、波高によらず $T = T_s = 5.1 \text{ s}$ で固定した。風速が流入する領域の高さは、下限が入力波の峰の高さに一致するように調整した。実験時間はすべての条件で 90 秒 とした。

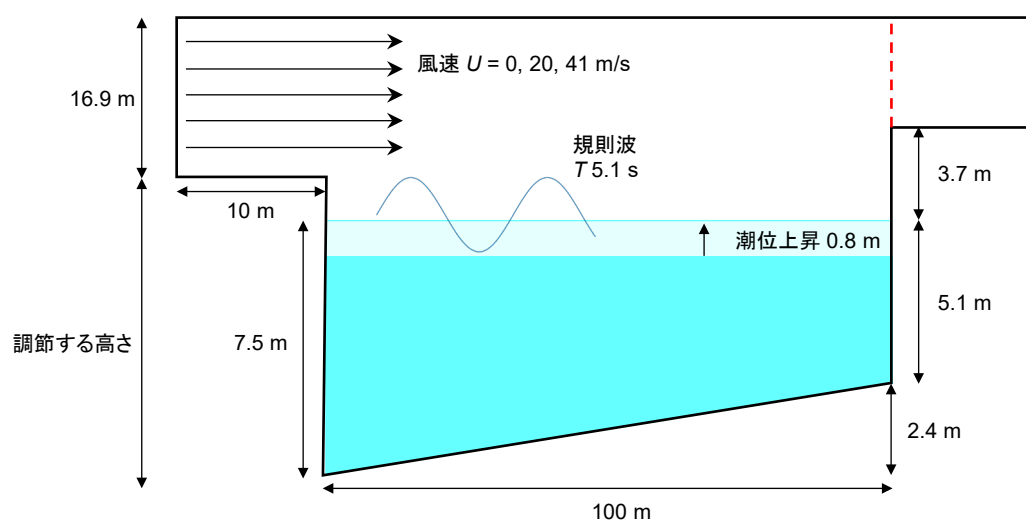


図-4.8 数値計算における福浦海岸のジオメトリ設定。両軸の縮尺は一定でない。水が赤い点線を右方向に通過することを越波と見なした。

4.3.2 不規則波を考慮した越波流量の算定結果と考察

表-4.5 に一波ごとの平均越波量 V_{ot} と, Rayleigh 分布に基づく超過確率 P をまとめた. また, 図-4.9 に越波を生じる波高を $H_s = 2.7$ m を基準にした Rayleigh 分布の確率密度曲線と, 超過確率曲線を重ねて示した. 越波流量 q_{ot} は, 一波ごとの平均越波量を Rayleigh 分布で重みづけして計算する. 具体的には, 次の式に従う.

$$q_{ot} = \frac{\sum_H \left(V_{ot} \cdot \frac{T_{ot}}{T_s} \cdot P \right)}{T_{ot}} \quad (4.13)$$

ここで, T_{ot} は総越波時間を示す. 各風速による越波流量はそれぞれ, 0.006 m³/s/m ($U = 0$ m/s), 0.024 m³/s/m ($U = 20$ m/s), 0.033 m³/s/m ($U = 41$ m/s)となった. 第2章で述べたように, 福浦海岸での平均越波流量は $0.042 - 0.083$ m³/s/m と見積もった. 計算値はやや過小評価する傾向にあるが, 妥当なオーダーを示しており, 提案した数値モデルと不規則波への拡張方法の適用性がある程度示されたと言える.

なお, 一波ごとの越波量のばらつきについて, 波高 3.5 m と 4.0 m の場合を作用風速毎に整理した(図-4.10). もっともばらつくケースでも誤差は 10% 程度と小さいので, V_{ot} の算出には中央値を用いることにした.

表-4.5 一波毎の越波量 V_{ot} の風速による違いと, Rayleigh 分布に基づいた波高と出現頻度の対応.

H [m]	H/H_{mean} [-]	出現頻度 P [%]	一波毎の越波量 V_{ot} [$m^3/s/m$]		
			$U = 0$ [m/s]	$U = 20$ [m/s]	$U = 41$ [m/s]
2.7	1.60	13.4	-	-	-
2.8	1.66	11.4	-	-	-
2.9	1.71	10.0	-	-	-
3.0	1.78	8.4	-	-	-
3.1	1.84	7.0	-	0.82	1.02
3.2	1.90	5.8	-	1.11	1.54
3.3	1.95	5.0	-	1.38	2.01
3.4	2.02	4.1	-	1.55	2.41
3.5	2.08	3.3	0.61	1.67	2.65
3.6	2.13	2.8	0.72	1.83	2.87
3.7	2.19	2.3	0.8	2.05	3.01
3.8	2.25	1.9	0.91	2.34	3.12
3.9	2.31	1.5	0.99	2.61	3.38
4.0	2.37	1.2	1.08	2.81	3.53

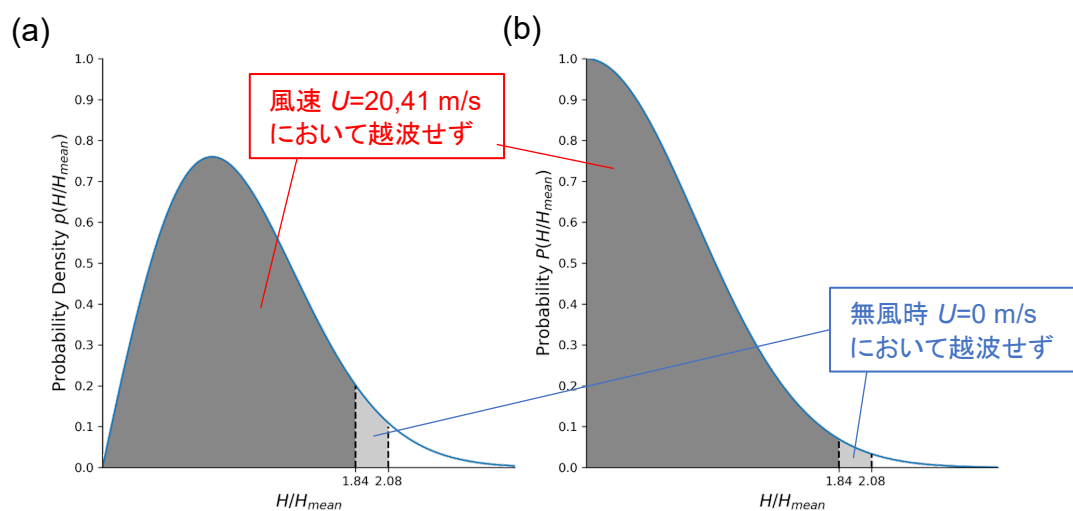


図-4.9 有義波高 $H_s = 2.7$ mに基づく Rayleigh 分布の, (a) 確率密度曲線, (b) 超過確率曲線. いずれの風速でも越波が生じなかった波高領域を濃い灰色で示した. また, 風速条件($U = 20$ m/s または 41 m/s)で越波したが, 無風の場合は越波しなかった波高領域を薄い灰色で示した.

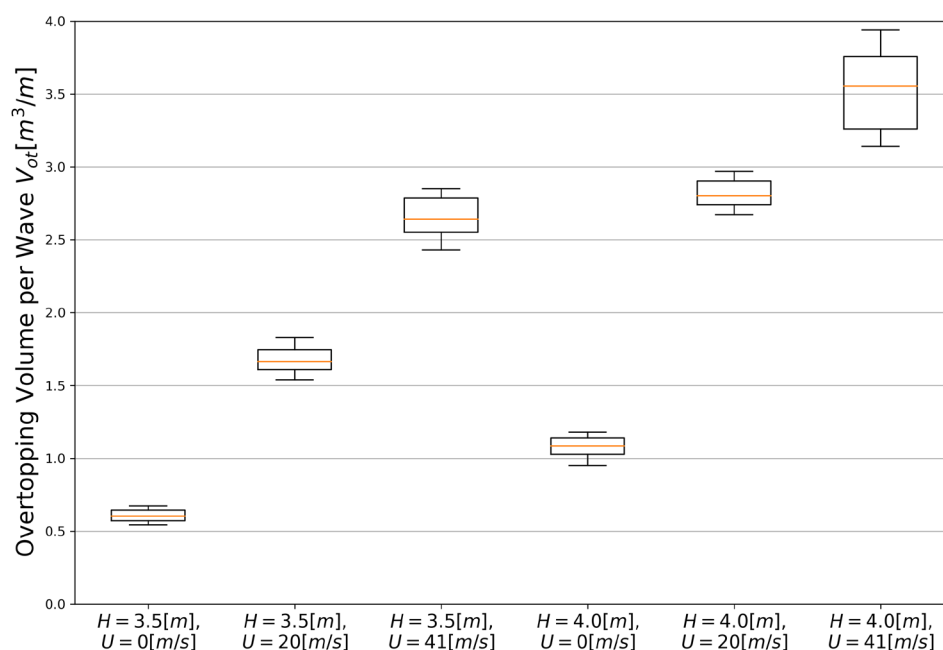


図-4.10 一波毎の越波量 V_{ot} の波ごとのばらつき. 箱ひげ図は四分位を示しており, 橙色の線は中央値(50%)を示す.

4.4 提案した数値モデルについての考察

4.4.1 相界面の物理過程のモデル化の必要性

Ward et al. (1994)の実験と現実スケールの福浦海岸の二つの例について, 提案した数値モデルを適用したが, いずれのケースでも, 高風速での越波流量を過小評価した. その一つの理由として, 風から波へのエネルギー輸送が十分ではないことが考えられる. 本研究では, 異なる相間での厳密な保存則(質量・運動量・エネルギー)とメッシュ設定を工夫することで, エネルギー輸送を実現することを志向していたが, 界面物理過程のモデル化が必要であることが分かった. 典型的な気液相間相互作用として風速シアが挙げられるが, これを FVM-VOF 法に実装するのは難しい. なぜなら, VOF 法では界面の形状が厳密に定義されないためである(次節 4.4.2 参照).

4.2.2 節で述べたように, 本数値モデルの設計概念は, うねりによって運ばれる水塊の輸送力に及ぼす風の影響を検討することだった. 言い換えれば, 遡上水塊に直接的に作用する風

の影響を議論の中心に据えていたため、風速シエアで生じる風波の伝播については検討しなかった。しかしながら、砕波状況の変化が再現されていなかったことを考慮すると、風で励起される風波の影響が有意だったことが考えられる。実際に、Douglass (1990)は波の頂部の水粒子の摂動が風によって励起され、砕波に影響を及ぼすと主張している。造波装置で発生させた波(うねり)と風によって生じた波(風波)の共存系における砕波を検討する場合、数値計算によるアプローチは更に複雑になると考えられる。

4.4.2 相界面モデルの実装とVOF法の相性

前述の通り、VOF法では各セル内の液相の体積割合を体積分率 α と定義し、自由表面の境界条件は体積分率 α の移流方程式で記述される(式-4.6 または式-4.10)。移流方程式を差分する方向を決定する(隣接するどのセルから情報を取得するかを決定する)とき、自由表面の向きを決定するアルゴリズムとして、OpenFOAMの多相流ソルバーではDoner-Acceptor法が採用されている。このアルゴリズムにより決定された自由表面の方向は、セルの配置と形状に適合しており、実際の流れや尤もらしい表面の形状と必ずしも一致しない。図-4.11に自由表面の決定方法の概念を示した。(a)では連続する自由表面が描かれているが、Doner-Acceptor法のアルゴリズムで決定された自由表面は(b)のようになり、自由表面セルの配置によっては、流体内部に気相が生じる。このような内部気相は浮力の影響が厳密に反映されず、気泡のような振る舞いが観察されるとは限らない。

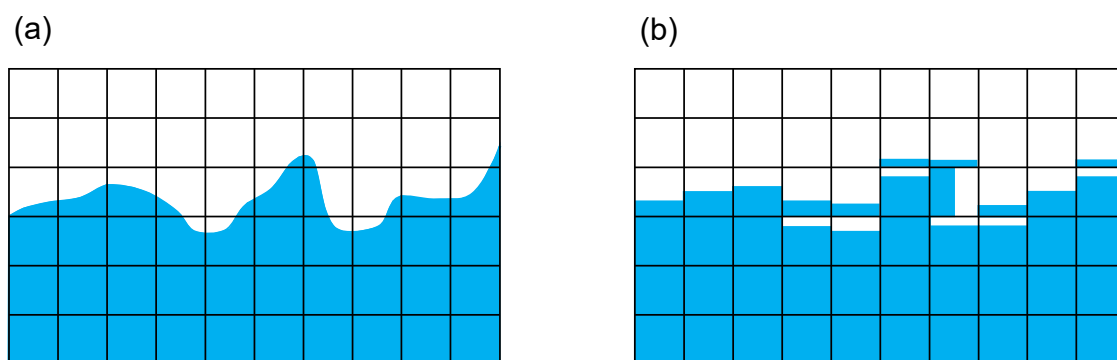


図-4.11 (a) 自由表面の例. (b) VOF法およびDoner-Acceptor法で決定された自由表面。

風速シエアのような界面上の物理現象を数値モデルに実装する際に、自由表面の傾きは重要な情報となるため、図-4.11のような表面の決定方法の原理との両立は困難であると考えられる。

4.4.3 妥当な計算量と安定性を実現する工夫

本研究で対象とした現象は、気相と液相で大きく異なる流速を示す。このため、特に高風速条件において、界面近傍で計算不安定が生じやすい。VOF法において、界面を規定する体積分立 α は移流方程式に従うため、一次精度の離散化法による CFL 条件を満足する必要がある。

$$C = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (4.14)$$

ただし、 U は代表最大流速(本研究の場合は最大風速)、 Δt は計算タイムステップ、 Δx は計算格子の間隔を表す。界面近傍の計算セルでは、短い時間間隔で液相と気相が入れ替わるものもあり、そのようなセルでは CFL 条件が破れやすい。格子間隔を小さくすることで自由表面を滑らかにすることは可能であるが、式-4.14によると、CFL 条件を満足するためにタイムステップも小さくする必要があり、計算量が増大することに注意する必要がある。ひとつの目安として、福浦海岸での $U = 41 \text{ m/s}$ のケースでは、一般的なワークステーションの演算能力で70時間程度を要した。また、乱流モデルの選択も計算時間や数値安定性に大きな影響を与える。たとえば、Smagorinsky モデルなどの高次 LES モデルは非現実的なほど膨大な計算時間を要する。一方、一般的に計算負荷の小さい $k - \epsilon$ モデルなどの RANS モデルは、相界面近傍の気流の剥離、あるいは、一部のセルにおいて短時間で著しい流速変化が生じること(たとえば、1タイムステップの間に液相から気相になる場合など)により高風速で数値発散が生じやすい。

4.4.4 さらなる水理実験の必要性

開発した数値モデルは、砕波位置の変化などの複雑な流体運動に与える風の影響について再現性が不十分だった。既往の実験研究には流速構造に注目した現象の考察が不足しており、数値モデルで再現しようにも妥当性の検証ができない。数値モデルのさらなる発展のため、あるいは全く異なる有効な数値モデルの提案には、系統的な水理実験による考察の積み重ねが必要である。

4.5 本章のまとめ

本章では、数値解析的手法を用いて、突風条件下での越波現象を再現し、その適用性を考察した。

計算スキームとしては FVM-VOF 法を用い、実装にはオープンソースの流体モデルである OpenFOAM を援用した。数値モデルの開発に際し、Ward et al. (1994) の実験結果をベンチマークとして参考にした。数値モデルは、高風速での越波流量を過小評価する傾向にあったが、概して同程度のオーダーを示し、さらに風の作用による越波流量の増加が確認できたため、ある程度の適用性があると言える。

Rayleigh 分布に基づく、数値モデルの不規則波への拡張を含め、実スケールの福浦海岸での適用性を調べた。依然として、現地調査から見積もった越波流量を過小評価する傾向があるものの、妥当といえる値が得られた。

提案した数値モデルはある程度の適用性を示したものの、改善の余地がある。その方針として、相界面の物理過程の実装、計算スキームの工夫、さらに水理実験による考察の蓄積の三つを示した。このうち、実験的な知見は、今後発展する数値モデルの検証に必要という点で最も重要である。続く第5章では、本章で得られた知見を動機として行った、実験的手法について論じる。

第5章 水理実験による検討

5.1 実験の概要

本章では、風作用下の複雑な流体现象について、越波を増加させるメカニズムを実験的に明らかにすることを試みる。既往研究にない本実験の特徴として、砕波や遡上などの越波に至るまでの素過程における風の影響を整理された実験条件で調べたことが挙げられる。さらに、詳細な流体现象を議論する手法として流速構造に注目した。特に、実験的研究が隆盛した1990年代には一般的ではなかったPIV解析を用いた。この実験を通して、現象の本質に迫り、数値計算手法の深化の手掛かりとすることが一連の研究における本実験の狙いである。

本研究の計画段階では、数値計算による検討と平行して行う予定であったが、第4章で述べたように、数値計算手法には原理的な限界があり、現象の本質に迫るためには実験的な考察が不可欠であることが明らかになった。このため、本章で展開される水理実験は、砕波など越波以前に生じる現象も含めた考察が可能になるよう実施されたことに注意されたい。

5.2 実験設定と手法

5.2.1 越波流量実験

水理実験は新潟大学工学部の水工実験室で実施した。二次元水槽(長さ10 m, 高さ0.8 m, 幅0.4 m)の上部に搭載した送風機(大西電機, WA2-5)からダクトを通じて風を送り込む形で風洞水槽を制作した。送風口の背後にはフラップ式の造波装置があり、規則波を造波することができる。座標設定を図-5.1に示す。座標原点を送風口(x 軸方向)と水槽底面(z 軸方向)とした。水深は $z=0.35$ mで固定し、 $x=0\sim 1.40$ mは深水条件となる。その点より岸側では0.063(約1/15)の一様勾配のスロープが続き、 $x=5.00$ mで高さ14.5 cmの直立壁を設置した。直立壁前面の水深は約5.0 cmであり、被害時の福浦海岸の護岸を想定している。ただし、直立壁での反射波の影響が水槽の沖側にも及び、実験精度を著しく低下させることが分かったため、本実験では直立壁前面に150 gのコンクリート製の消波ブロックを14個設置した(図-5.2(b)参照)。消波ブロックはスロープに糊付けされておらず、後述の風速の測定と風速分布の確認に際して消波ブロックの影響がないことを確認した。実際の福浦海岸の東側護岸では消波

ブロックは存在しないため、反射波の影響を低減しつつ、流体運動に過剰に影響が生じないように注意した。反射率は80-90%と大きい、90秒程度の短い実験時間なら反射波の影響は顕著に表れないことを確認した。したがって、本実験における造波時間は長くても90秒程度とした。より大きな水槽を用いた場合は、より長い時間の造波が可能である。特に設計を目的とした越波実験では長い時間造波させ、越波のランダム性の影響を小さくすることが好ましい(たとえば、合田ら, 1975)。

造波した波や風波による水面変動は4箇所に設置した容量式波高計(KENEK, CH-601 50Hz)によって計測した。また、越波した水は直立壁の背後に設置した越波柵で回収した。風が作用する場合は、飛沫や水塊が越波柵を飛び越えることもあり、その場合はタオルを使用した。回収前後の重量差として、越波水量を計測し、実験時間で割ることによって越波流量を計算した。

風速分布の制御として、送風口に1cmの金属製のグリッドを設けた(図-5.3(c)参照)。これにより一様等方性の格子乱流が生成され、風洞内の風速が一様になった。また、風洞の天板には木製のパネルを用いた(図-5.2(d)参照)。その際、天板の粗度は風洞内の風速分布に影響を及ぼさないことを確認した。

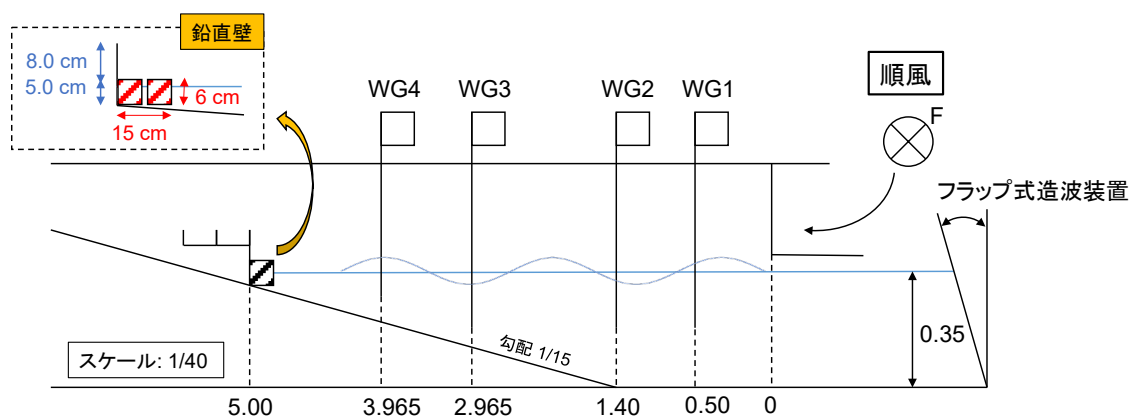


図-5.1 実験で用いた風洞水槽の断面図。図の縮尺は一定でない。

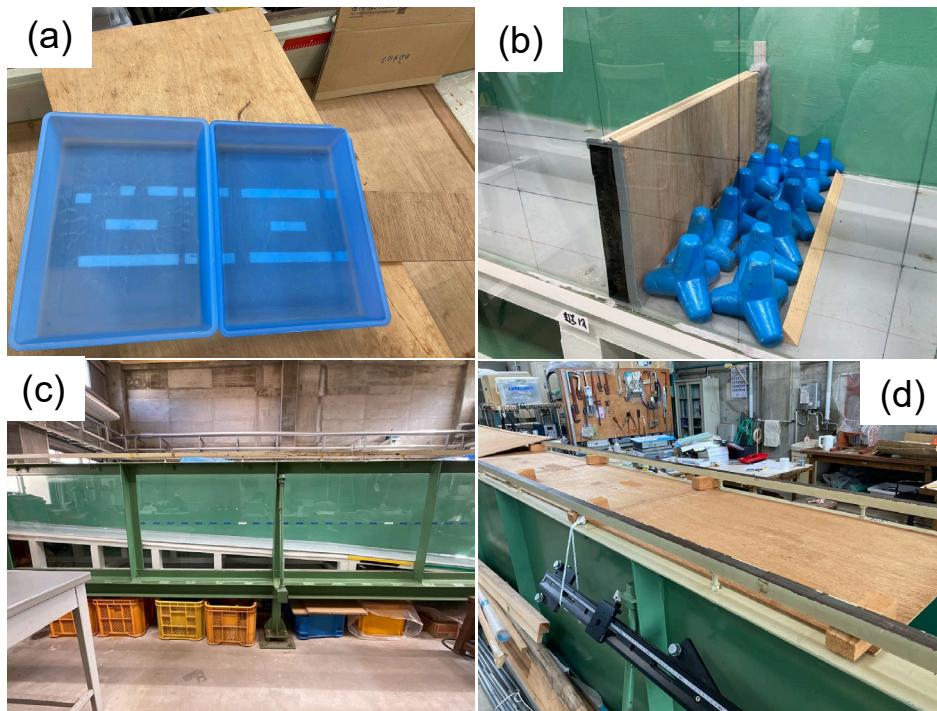


図-5.2 実験時に作成した模型や境界として設置した材料の写真。(a) 鉛直壁を越えた水を収集する越波枡。(b) 鉛直壁の模型。側壁との隙間はパテで止水した。(c) 実験水槽に設置した斜面を横から撮影した。斜面表面は塩化ビニルコーティングを施しており、側壁に接する部分はシリコーン剤で止水した。(d) 天板に用いた木材パネルを設置した様子。ガムテープと木製の楔を利用して固定した。



図-5.3 実験における外力(波・風)を生成する装置の写真。(a) フラップ式造波装置。(b) 送風ファンと水槽をつなぐチタン製のダクト。(c) ダクトの送風口に設置した乱流格子。

波と風は図-5.4 に示した装置によって制御した。入射波の諸元は深水域で校正した。その際に、造波装置のノイズを避けるために最初の3波を捨てた。表-5.1 のように、入射波は波形

勾配に基づいて整理した。本実験において、波形勾配は深水域で測定したものを示すことに注意されたい。サーフシミュリティは砕波形態の分類の指標として用いられ、次式のように水路勾配 i と深水域での波形勾配 H_0/L_0 の比として表される無次元パラメータである。

$$\xi = \frac{i}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad (5.1)$$

この指標によると、いくつかの入射波では崩れ波砕波が発生するが、実際には、波形勾配が0.0163より大きい波では巻き波砕波が生じ、波形勾配が0.0128と0.0102の時には砕波が生じないことが多かった。実験時間は約25-30波が含まれるように決めた。このため、ノイズを含む初めの数波が越波流量に与える影響は無視できるとみなした。ただし、越波量によっては実験時間をある程度短縮または延長した。

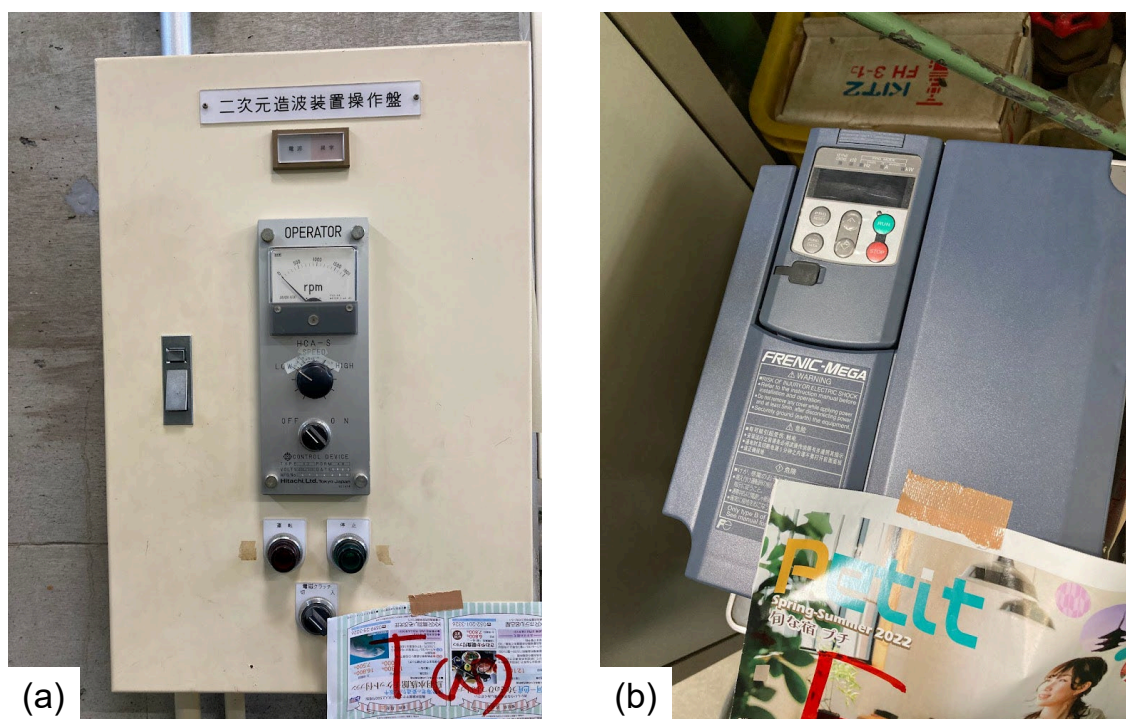


図-5.4 実験装置の制御盤の写真。(a) 造波装置の制御盤。ダイヤルを回し手動で周期を定める。造波板につながった腕の回転半径でも波の諸元を制御することができるが、本実験では固定した。(b) 送風ファンの制御装置。電氣的に制御され、周波数とファンの風量は線形的な関係にある。

表-5.1 深水条件で校正した入射波の諸元. 入射波と風速で管理される実験ケース毎の複数回の実験試行のそれぞれについて, 実験時間と造波した波の数をまとめた.

沖波波高 H_0 [m]	沖波周期 T_0 [s]	沖波波長 L_0 [m]	波形勾配 H_0/L_0	サーフシミ ラリティ ξ [-]	実験時間 [s] (造波回数)		
					$U = 0$ m/s	$U = 6.84$ m/s	$U = 10.04$ m/s
0.077	1.26	2.08	0.0371	0.33	80.12(65), 78.54(64), 79.17(65)	44.76(37), 45.61(38)	46.53(38), 45.27(37)
0.072	1.36	2.05	0.0350	0.34	75.59(57), 73.09(55)	47.2(36), 45.94(35), 46.09(35)	46.4(35), 43.04(33)
0.068	1.42	2.05	0.0331	0.35	69.53(50), 63.8(46)	55.17(40), 58.33(42)	56.90(41), 57.12(41)
0.065	1.53	2.27	0.0287	0.37	63.21(41), 68.74(45)	58.37(39), 58.16(39)	45.00(30), 44.61(30)
0.062	1.58	2.35	0.0263	0.39	58.28(38), 63.28(41), 60.04(39), 58.51(38)	47.46(31), 47.61(31)	46.07(30), 45.92(30)
0.061	1.61	2.48	0.0248	0.40	75.63(48), 68.89(43)	62.81(40), 62.99(40)	56.46(36), 58.55(37)
0.057	1.66	2.61	0.0220	0.42	59.78(36), 59.41(36)	42.83(25), 52.65(31)	38.35(23), 38.32(23)
0.057	1.70	2.71	0.0209	0.44	64.48(39), 64.71(39)	57.83(35), 45.86(28)	59.93(37), 54.36(33)
0.048	1.79	2.92	0.0163	0.49	58.95(34), 58.9(34), 58.8(34)	47.61(27), 46.34(26)	42.75(25), 43.38(25)
0.042	1.95	3.28	0.0128	0.56	76.18(40), 74.18(39), 72.38(38)	60.60(32), 45.45(25), 56.69(30)	44.88(25), 47.26(26), 44.84(25)
0.037	2.04	3.63	0.0102	0.62	69.09(35), 66.83(34)	62.96(32), 61.00(31)	62.44(32), 67.28(34)

風洞内平均風速 U を校正する代表高さとして, 気相領域の 50%高さでの風速を採用した. これは水面から 22.5 cm 上方, 鉛直壁の天端から 12.5 cm 上方にあたる. この高さは現地スケールでは海面から 9 m の高さに相当し, 風波の見積もりで一般的に用いられる 10 m 海上風に近い. Ward (1998)や González-Escrivá et al. (2004)の実験では, $U = 5 - 7$ m/s 程度で風の効果を観察されるようになったと指摘されている. これを踏まえ, 本実験では $U = 0$ m/s(無風), 6.84 m/s(中風速), 10.04 m/s(高風速)の三条件を風外力として取り扱う.

鉛直壁周りの水塊への風速の影響を考慮するため, 天端高での鉛直平均風速 W_{wall} を計測した(図-5.5(a), 実験の写真は図-5.6 参照). 図-5.5(b)では U と W_{wall} が線形的な関係にあることを示し, 岸向きの気流の約 80%が鉛直壁にぶつかった後に壁沿い上方に吹くことを示唆している. 残りの 20%は下方に吹き, 沖向きの返し風となったと考えられる.

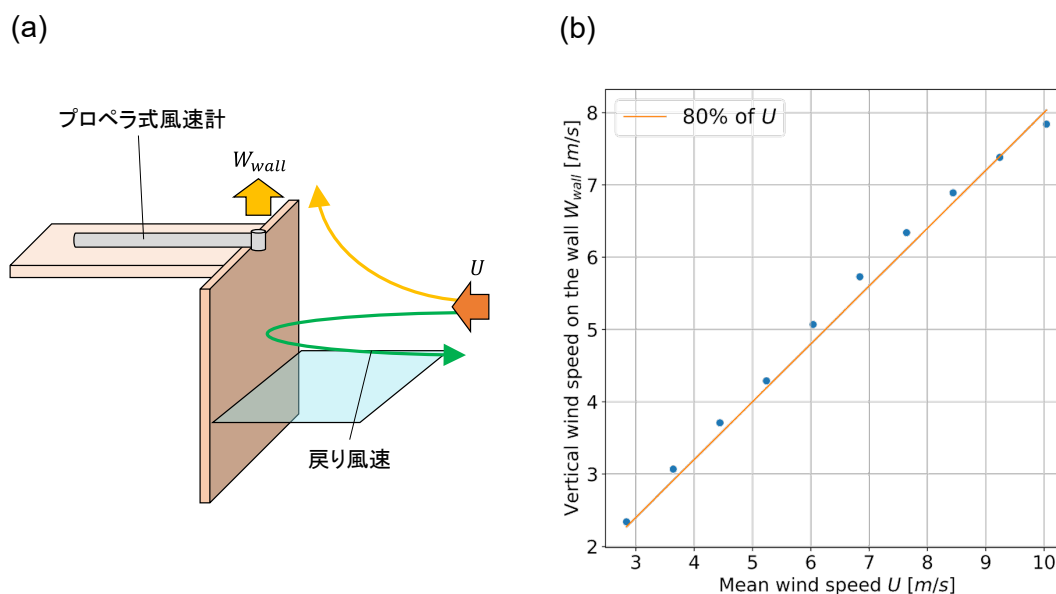


図-5.5 直立壁面沿いの上方鉛直風速 W_{wall} の測定結果. (a) 測定時の様子. (b) 風洞内平均風速 U との線形的な関係.

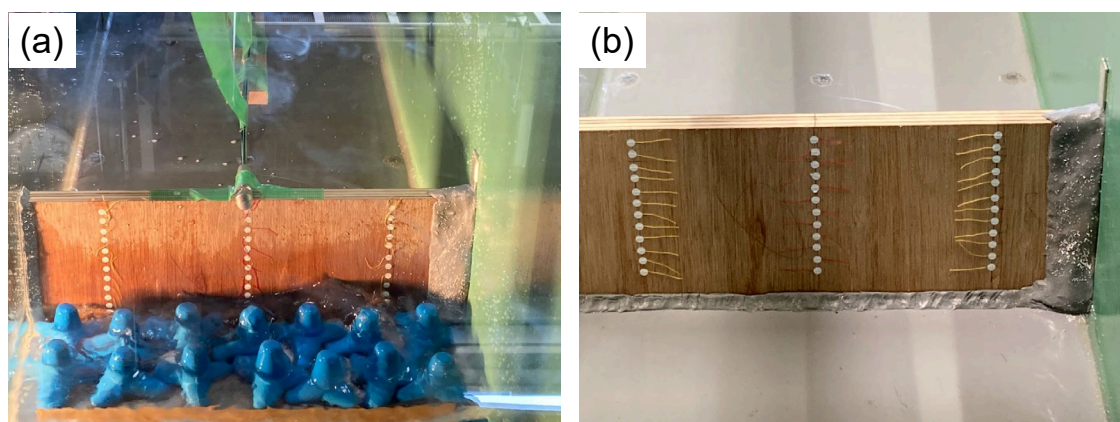


図-5.6 直立壁面沿いの上方風速 W_{wall} の測定時の写真. (a) 壁面正面の様子. プロペラ式風速計は持ち手の部分を木材で固定した. (b) 壁面に設置した糸の様子.

また、風速分布における側壁の影響についても検討した。ここでは、鉛直壁の沖に面した側面 (yz 平面) における風速の z 方向成分の空間的な分布を定性的に確かめた。上方・下方に向かう風の境界を可視化するために、壁面に糸を等間隔に貼り付け、風に靡く方向を観察した(図-5.7(a))。境界は図-5.7(b)のようになっていると考えられ、風速による境界の移動は生じなかった。これによると、側壁に近い領域ではより多くの水塊が上方風速の影響を受け、越波

に寄与すると考えられる。越波流量は幅方向 (y 軸) の平均値として表されるので、これらの影響は小さいとみなすことができる。一方で、PIV 解析では xz 平面のレーザーシートを張る y 座標の検討が必要である。本研究では、側壁は風作用下における越波の挙動に影響を与えていると考え、PIV 解析の検査断面を幅方向の中央 ($y = 0.20 \text{ m}$) に配置した。

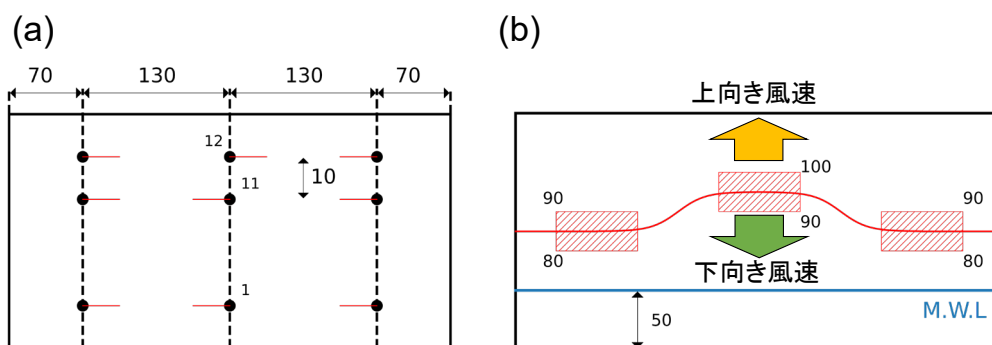


図-5.7 直立壁面の鉛直風速の分布. (a) 風向の判断に用いた糸の配置. (b) 上方・下方風速の境界は赤い斜線で示した領域に存在した. 赤い曲線はこれらの斜線領域をつないだ仮想的な境界線を示す.

5.2.2 PIV 解析

PIV 解析 (Particle Image Velocimetry) は、時間的に連続するデジタル画像の相関性に基づいて流体の瞬間的な流速分布を決定する非接触の流速測定手法である。このため、対象とする流体中に散布するトレーサー粒子と、トレーサー粒子をある程度の輝度で光らせる光源が必要となる。山城ら (2012) は鉛直壁における越波、および飛沫の運動について PIV 解析の有効性を検証している。

本実験では、 xz 平面に張ったレーザーシート上の二次元流速場を測定した。レーザー光源には Nd:YVO₄ (カトウ光研, G2000) による波長 532 nm (緑色) の連続光を用いた。また、液相のトレーサー粒子として、粒径 250 μm のイオン交換樹脂 (三菱ケミカル, HP20) を用いた。デジタル画像の撮影には CMOS センサー型ハイスピードカメラ (カトウ光研, k4) にマクロレンズを装着した (リコー, FL-HC1212B-VG)。レーザーシートは厚さ 2 mm 程度で水槽の真上から照射した。照射部の天板は木材からガラス板のものに差し替えた。ハイスピードカメラのフレームレートは 400fps に設定し、シャッタースピードはオープンにとした (規格上の露光時間は

2407 μs). このカメラ設定における画角は 1024 x 768 ピクセル (約 360 x 270 mm) で, 入射波の一波長分や越波水塊の挙動が収まることを確認した. 取得したデジタル画像は PIV 解析ソフトウェア (カトウ光研, FlowExpert2D2C) を援用した. 走査窓は 32 x 32 ピクセル, 走査オーバーラップ率は 50% とし, 解析アルゴリズムには直接相互相関法を用いた.

PIV 解析の設定および実施にあたり, 特に検討した項目について以下に列挙する.

(a) 光源の入射方法の検討

一般に, PIV レーザーを自由表面側から入射させる際は, 自由表面で生じるレーザー光の乱反射および屈折によって対象断面が傾きを持たないように, 自由表面の反対側から異なる光源を入射させる. 本実験では, 底面がガラス面ではないため, 自由表面の反対側から光源を入射させる方法が限られており (たとえば, スロープの下に側面からの光を上方に反射させるように鏡を設置する, あるいはスロープをガラス板で作成する), 実験の円滑な実施および実験実施者の作業に危険が伴うことが予想された. このため, 光源は上面 (自由表面側) からの入射に限定した. レーザー光の直進性を高めるため, 光源の出力強度を強めに設定し, 乱反射とレーザー面の傾きが撮影に影響を及ぼさないことを確認した.

また, 図-5.8 のように, PIV 解析を行う領域を取り囲むように暗室を作製し, 自然光の侵入を可能な限り排除した.

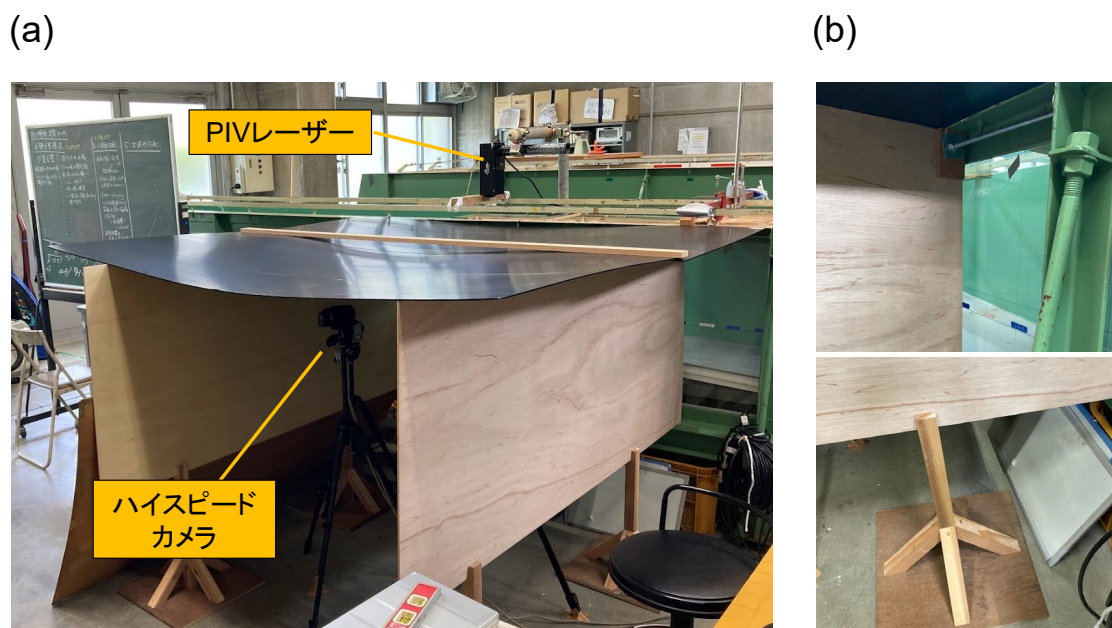


図-5.8 (a) PIV 解析の際に作製した暗室. 水槽上部に PIV レーザーが鉄パイプで固定されている. ハイスピードカメラなどの撮影機材は暗室の中に配置し, 暗室の奥行きはレンズの焦点距離を基準に決定した. (b) 暗室の側面は水槽のアンダールに突っ張らせた寸切の金属棒を通し, ボルトによって任意の位置で固定できるようにした. さらに, 溝を切った足場に側壁をはめ込むことで強度を確保した.

(b) 気流の PIV 解析の検討

本実験では気流の PIV 解析は対象としなかった. 越波中の水塊は非常に複雑に変化するため, 界面近傍の気流の運動を捉えるには, 実験気流でもトレーサー粒子が流されないほどの供給力をもつ煙発生装置が必要である. 本研究における予備的な検討では, 気流の半分程度の供給力ではハイスピードカメラで十分捉えられる輝度を発しないことが分かった. しかしながら, 気液混相流において気流の PIV 解析が不可能というわけではない. Yousefi et al. (2020)は風波上の気流(風速 5-9 m/s 程度)の PIV 解析に成功している. ただし, 対象となった風波は砕波などの大変形を伴っていないことに注意されたい. また, 竹原ら(2002)は二組のハイスピードカメラ(CCD カメラ)を用いて, 水流と気流の PIV 同時計測を行っている. PIV 解析のため, 液相の流速分布を得るために境界面の速度の差を測定する必要があるが, 本実験のように液相の大変形を伴う現象を対象とする場合には適用が難しいと考えられる.

5.2.3 質量流量

質量流量は、水塊の質量輸送の程度の指標である。任意の断面 A において垂直な方向の質量流量 \mathbf{m} (x 方向成分 m_x , および z 方向成分 m_z)は、次式のように、対象断面を通過する質量フラックス J_m の総和として定義される。

$$\begin{aligned} \mathbf{m} &= \iint J_m \cdot \mathbf{n} \, dA \\ &= \sum_A (\rho \mathbf{u})(\Delta x_1 \times \Delta x_2) \end{aligned} \quad (5.2)$$

ここで、 \mathbf{n} は対象断面の単位法線ベクトルを表し、 Δx_1 と Δx_2 は断面2成分のPIV計算格子間隔を示している。 y 軸方向成分は単位幅当たり($y = 1 \text{ m}$)で計算するため、質量流量の単位は $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}/\text{m}]$ となる。

5.3 結果

図-5.9によると、有風時では無風時と比較して越波流量が著しく増加するという傾向があることが分かった。越波のランダム性を考慮し、ある入射波と風速の組み合わせであるひとつのケースについて、少なくとも二回の実験を行った。無風時では同一条件での越波流量は相対誤差50-100%程度の変動が見られたが、有風時の相対誤差は20-30%と小さくなった。

砕波と、反射波と入射波が衝突し部分重複波の腹を形成する時間的な前後関係によって、波の振る舞いは三つの異なる形式に分類できる。

- a) 砕波が沖側で生じ、後に部分重複波が岸側で形成された。比較的大きな波形勾配の波に多く見られた。この形式において、風による砕波位置の変化(たとえば, Ward, 1998)が明確に観察された。
- b) 部分重複波の形成と砕波がほぼ同時に生じた。その結果、部分重複波の腹で水塊が高く打ち上がった。本実験において中間的な波形勾配を有する波がこの形式に該当した。
- c) 比較的小さな部分重複波を形成した後、鉛直壁の直前で砕波するか、あるいは砕波せずに鉛直壁に衝突した。小さな波形勾配を有する波に多く見られた。この時、風による砕波形態の変化(たとえば, Douglass, 1990)が観察された。

(a)と(b)では、入力波の鉛直壁での位相が越波流量に影響していることがわかった。このため、越波流量は波形勾配によって変化し、極値を有する。ただし、この特徴は(c)では見られなかった。図-5.5 では三つの形式について領域分けを行っているが、ビデオ映像の確認によって定性的に判断されたものであり、厳密に測定された境界ではないことに注意されたい。

各形式において特徴的な波の振る舞いは、(a)では碎波位置の変化、(b)では部分重複波によって打ち上がる水塊、(c)では碎波形態の変化である。それぞれの形式から代表となる波を選び、PIV 解析による流速構造を調べた。(a)からは波形勾配 0.0371 を選んだ。この波では、中風速での越波流量が高風速時よりも大きくなる理由と碎波位置の変化の関係を考察した。(b)では本実験において最大越波流量を記録した波形勾配 0.0220 の波において、そのメカニズムを考察した。(c)では波形勾配 0.0128 の波を選んだ。この波でも中風速と高風速の越波流量が逆転しており、碎波形態の変化との関連を考察した。

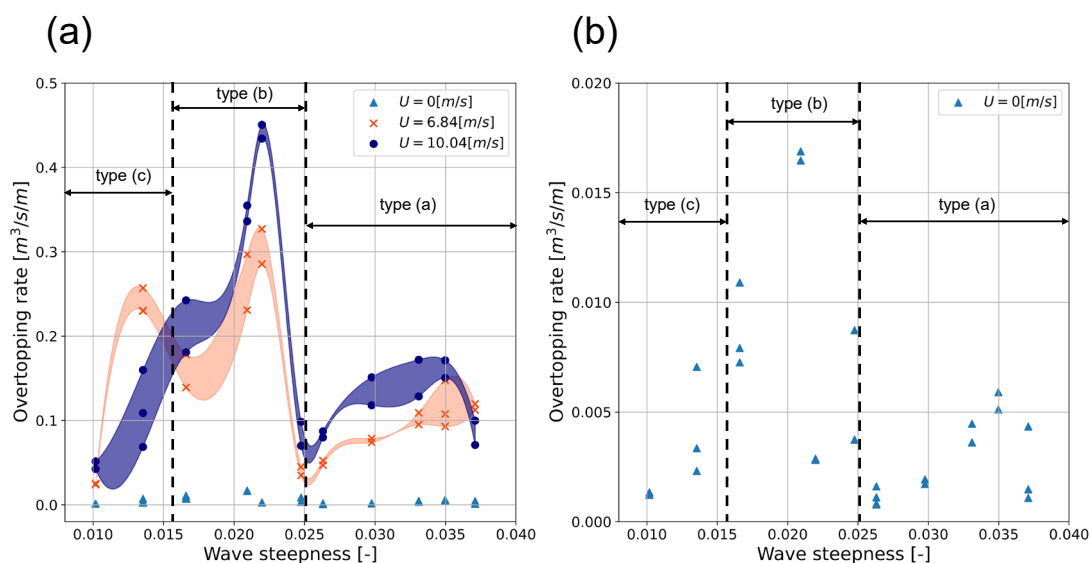


図-5.9 実スケールに補正した越波流量を入射波の波形勾配で整理した。定性的に分類された波の形式を type として図中に示す。(a) 曲線は各実験ケースの最大値と最小値の包絡線で、実験値は曲線内の塗りつぶした領域に存在している。(b) 無風の場合 ($U = 0$ m/s) のみの結果。有風時と比較して小さな越波流量を示した。

図-5.10(a)-(c)は異なる風速による越波時の様子を示しており、風の効果によって、越波流量が著しく増加していることが分かった。また、1 cm 程度の径をもつ水塊が鉛直壁の背後 10-

15 cm の距離(現実スケールでは 4-6 m)を飛来することが明らかとなった。さらに、越波水塊の上部は風によって細かい飛沫になり、越波枡を越えて吹き飛ばされていた。

このような越波水塊の輸送の程度を定量化するために、**図-5.10(d)**に示した二つの断面を通過する質量流量を計算し、**表-5.2** に整理した。ここで、Line A が鉛直壁の天端高から 10 mm 下に設けられていることに注意されたい。これは天端よりも 10 mm 下にある水塊が風によって持ち上げられ、最終的に越波することが観察されたためである。したがって、「風の影響領域」(**図-5.6(d)**参照)にある水塊が風の影響を受け越波に寄与する。Line A から得られる鉛直上向きの質量流量 m_z は風の存在によって著しく増加することが分かった。ただし、二つの風速(6.84 m/s, 10.04 m/s)における m_z の変化率は± 10-20%程度で、風速の変化とは非線形である。また、 m_z の変化の仕方は最終的な越波流量の変化と関連が見られる。風速の増加により m_z が増加した場合は最終的な越波流量も増加している。Line B から得られる m_x にもこれと同様の特徴が確認できた。

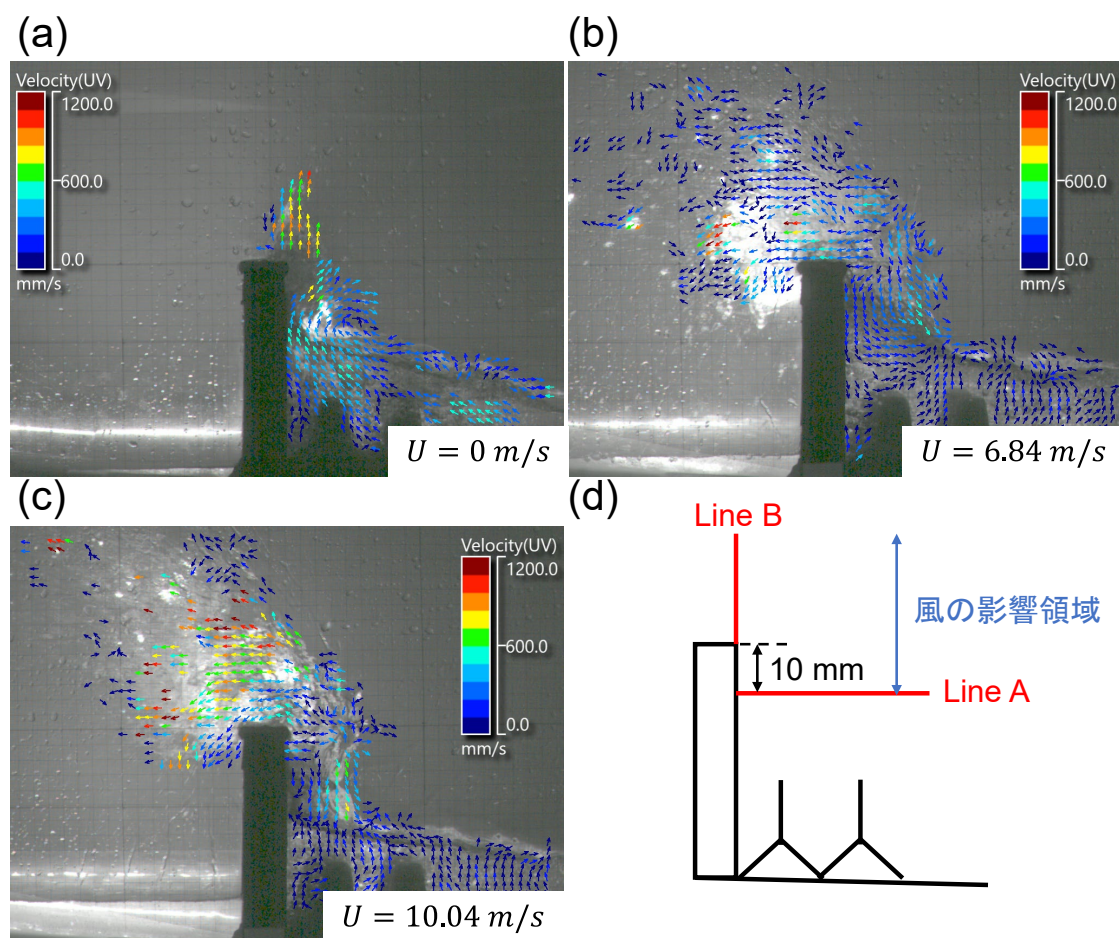


図-5.10 (a)-(c) 異なる風速における越波の様子. (d) 質量流量を計算する二つの断面の位置. 「風の影響領域」にある遡上水塊が風の持ち上げ効果と岸向きの輸送効果を受け、最終的に越波する.

表-5.2 実験系での質量流量の計算結果. 風洞内の風速は, 0 m/s (No), 6.84 m/s (Middle), 10.04 m/s (High)で表す. これらの値は越波した波についての平均値として求めた. 質量流量は単位幅当たりのものであり, 単位は $[kg \cdot s^{-1}/m]$ となる.

	$H_0/L_0 = 0.0128$			$H_0/L_0 = 0.0220$			$H_0/L_0 = 0.0371$		
	No	Middle	High	No	Middle	High	No	Middle	High
Line A (m_z)	13.49	41.17	26.85	13.79	29.20	32.27	11.96	21.81	15.81
Line B (m_x)	6.77	30.47	24.74	6.75	31.20	35.99	7.25	26.62	18.15

5.4 考察

5.4.1 風による水塊輸送

Line A を通過する m_z が風の存在によって増加することは、壁面沿いの鉛直上方風速 W_{wall} によって、鉛直壁で打ち上がった水塊が持ち上げられる効果が存在することを裏付けている。同様に、Line B を通過する m_x の風による増加も、越波水塊の岸向き方向への輸送の効果を示している。したがって、風作用下における越波現象の本質は、「風の影響領域」内の水塊の質量輸送であると言える。

表-5.2 に示した質量流量の増減は、図-5.9 に示した越波流量の増減と関係がある。たとえば、波形勾配 0.0128 のケースについて、質量流量は両断面共に中風速時に最大値を示しており、この波形勾配では越波流量も中風速時で最大となっている。同様の傾向は他の二つの波形勾配についても確認できる。このため、特徴断面における質量流量が越波流量に代わる物理量になり得る。越波流量は時間平均的な量であるので、設計時の見積もりには簡便に利用できるが、瞬間的な物理現象を考慮できなくなる。代わりに、本実験のように対象構造物に特徴断面を設定し、その質量輸送を計算することが、越波および風の影響についての更なる理解につながると考えられる。

5.4.2 部分重複波による打ち上げ水塊と越波への影響($H_0/L_0 = 0.0220$ の考察)

最大越波流量をもたらした波形勾配 0.0220 の波について、動画撮影による観察と PIV 解析を行ったところ、二つの異なる越波モードが組み合わさっていることが分かった。モード(1)として、部分重複波の腹で打ち上がった水塊が風によって直立壁の背後に直接輸送される越波形態が観察された。モード(2)として、直立壁での遡上水塊が風によって上方に持ち上げられ、岸方向に輸送される越波形態が観察された。この二つの越波形態は独立ではないと考えられる。モード(1)の越波形態による越波量が総越波量に占める割合は約 5%であるため、風速作用下における越波現象としてはモード(2) が支配的と言える。モード(1)の越波形態は形式(b)に分類される波でのみ観察された。二つのモードでは、風速の増加に伴い越波流量も増加すると考えられ、この波形勾配において高風速条件で越波流量が増加したことを支持している。

部分重複波の腹で打ち上がる水塊の振る舞いは作用風速によって異なることが分かった。上方打ち上げ(図-5.11 参照)は無風状態で生じることが多かった。打ち上がった水塊は天板に衝突することもあった。一方で、風速作用下では、入射波の波高が反射波よりも高いため、水塊は上方に打ち上がらず、水平に打ち上がるか、あるいは前方に投げ出される振る舞いが観察された。これらの違いは反射波との衝突の瞬間の入射波の碎波状況による(図-5.12(a), 図-5.13(a)参照)。前方に打ち上がった水塊の一部は直立壁の背後に直接輸送されて越波に寄与する(図-5.13(b), (c)参照, 越波モードは(1)を示す)。残りの水塊は大きな速度を維持したまま水に再突入し、エネルギーや乱れをもたらすことが分かった。

波形勾配 0.0220 は本実験の設定においては特殊な波形勾配で、部分重複波による水塊の打ち上げと碎波がほぼ同じタイミングで生じる。かなりの量の水塊が打ち上がるため、同時に生じる碎波の規模は小さくなり、結果的に碎波過程におけるエネルギー損失は小さいと考えられる。最大越波流量が限られた波形勾配においてシャープなピークを見せる理由は、このようなメカニズムから説明できる。なお、波形勾配 0.0220 における越波流量 $0.45 \text{ m}^3/\text{s/m}$ は、典型的な越波災害の規模 ($10^{-2} \text{ m}^3/\text{s/m}$ 程度のオーダー) を大きく超えており、考えられる限り最悪の越波形態である。さらに、上記のメカニズムは、風速の増加に伴って越波流量も増加することを示唆しており、沿岸防災の視点からは注意を要するものである。

また、PIV 解析で得られた流速場より、部分重複波の腹における水塊の打ち上げは衝突現象と類似していることが分かった。上方打ち上げでは、打ち上げ水塊の水粒子の速さは、波における水粒子の速さの2倍に近く、弾性衝突のような現象だと言える(図-5.11(b)参照)。さらに、水平・前方の打ち上げでは、反射波が入射波の下部に衝突し、分離した入射波の上部は慣性的に投射されている。このような物理過程は典型的な波の理論や連続体力学の視点からの説明は難しいと考えられる。

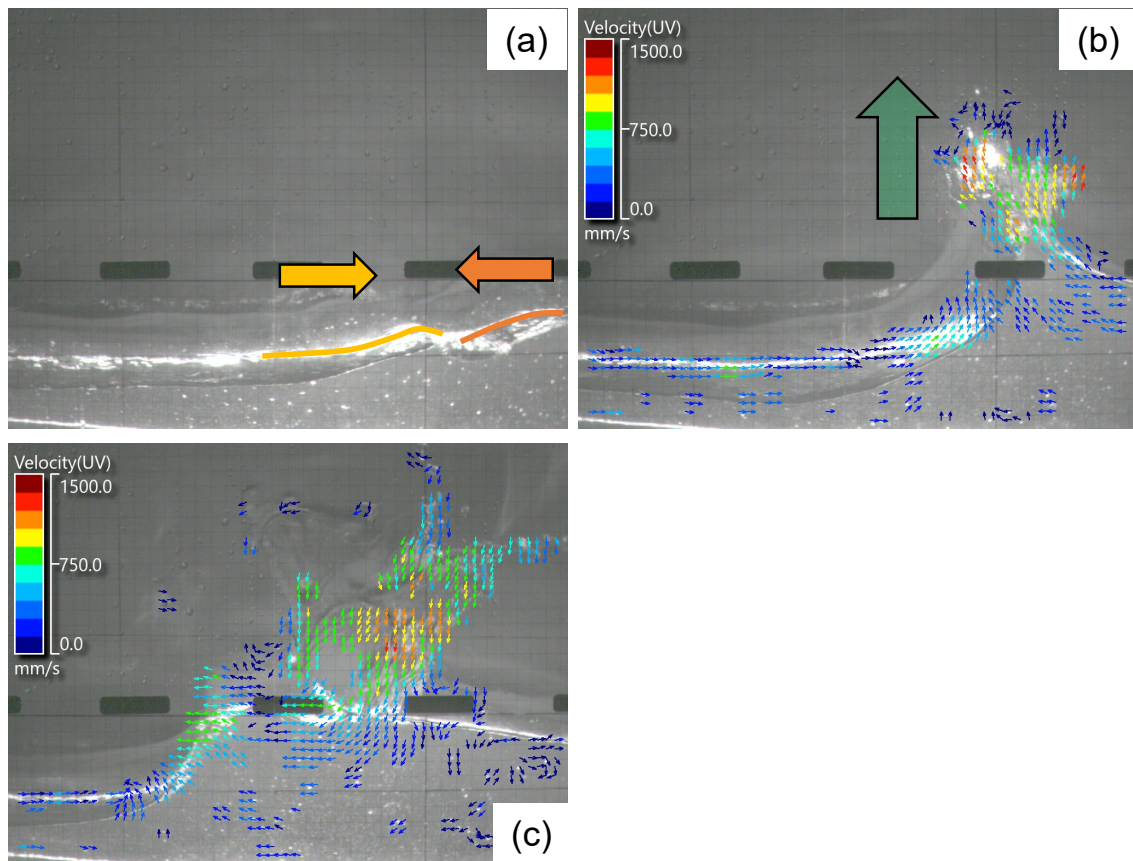


図-5.11 上方打ち上げの様子. (a)の黄色と橙色の曲線は反射波と入射波の波形を表している. また, (b)の緑色の矢印は水塊の主たる打ち上げ方向を示している.

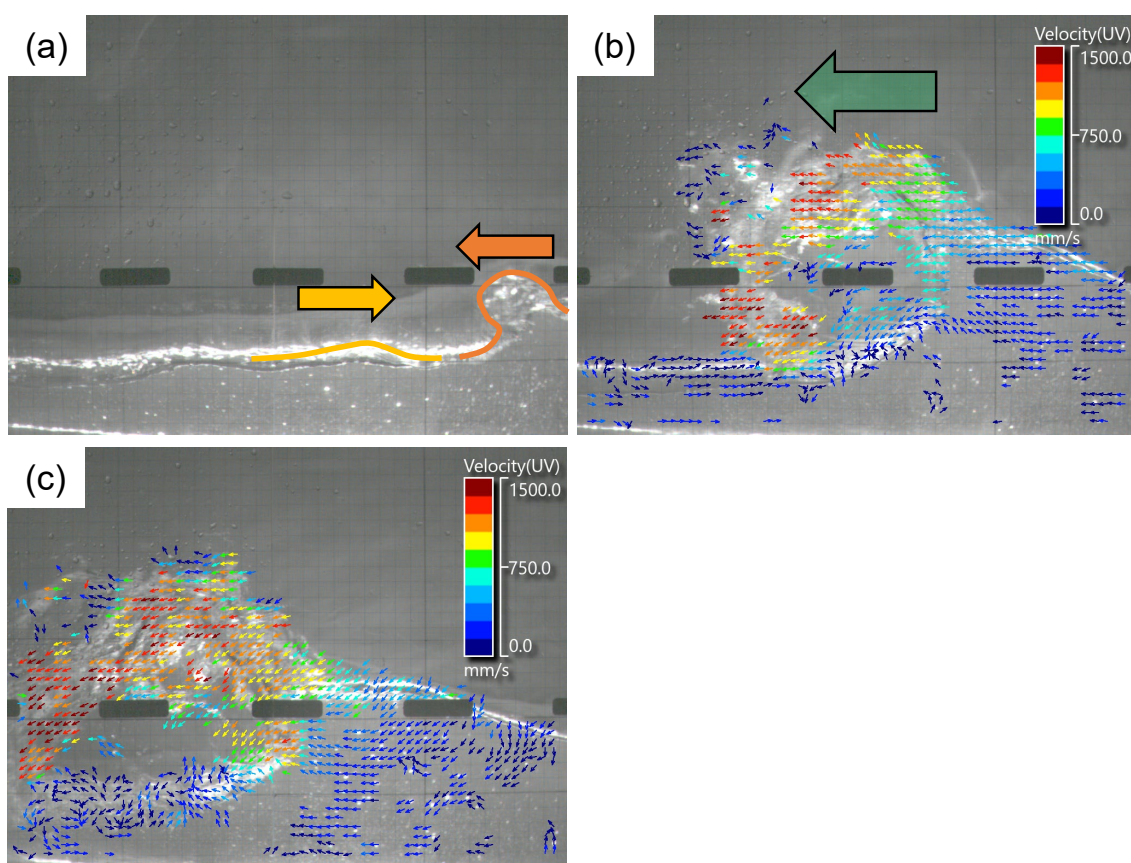


図-5.12 水平打ち上げの様子。(a)の黄色と橙色の曲線は反射波と入射波の波形を表している。入射波の砕波が生じた後に反射波と衝突する。また、(b)の緑色の矢印は水塊の主たる打ち上げ方向を示している。

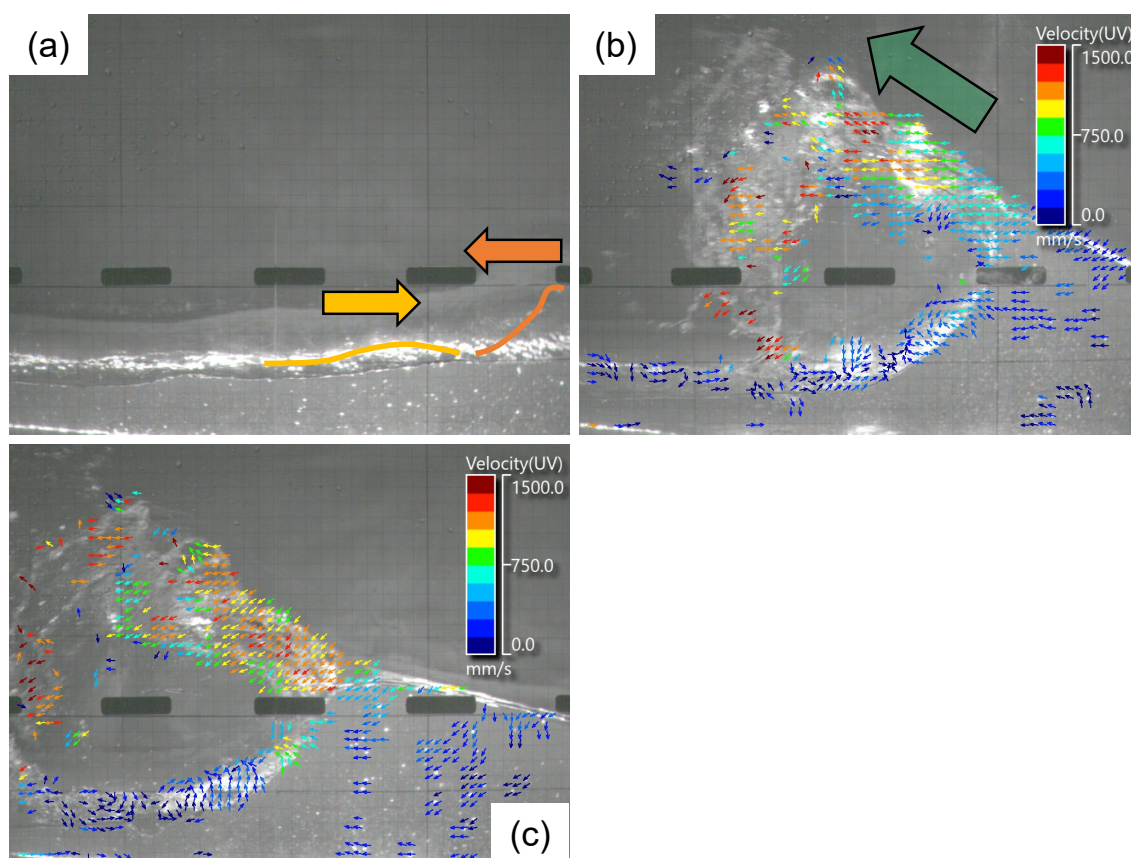


図-5.13 前方打ち上げの様子。(a)の黄色と橙色の曲線は反射波と入射波の波形を表している。入射波の砕波と反射波との衝突が同時に生じる。また、(b)の緑色の矢印は水塊の主たる打ち上げ方向を示している。

5.4.3 砕波位置の変化と越波への影響 ($H_0/L_0 = 0.0371$ の考察)

本実験のジオメトリでは波形勾配が 0.0248 より大きい波において、反射波との重複よりも先に巻き波砕波が生じた。異なる風速における巻き波砕波 (波形勾配 0.0371 の波) について、PIV 解析で得られたパラメータを表-5.3 に整理した。風の存在によって砕波位置はより沖側に (深い地点) で生じるようになった。砕波位置の変化の程度は風速の大きさによらず、一定量の変化を示した。風速の増加に伴い波頂部の水粒子の水平流速 u_{top} は増加した。

各風速条件における u_{top} と波の位相速度 C の比 u_{top}/C は砕波時に 1 に近い値を示した。一般的に、沿岸域の砕波は底面勾配と波形勾配の関係によって判定されるが (たとえば, Rattanapitikon et al., 2003), 風速条件下における砕波では u_{top}/C や波齢による判定も考慮すべきだと考えられる。

表-5.3 異なる風速における巻き波砕波時の諸量. これらの値は PIV 解析で得られた砕波時の流速分布(図-5.14)から見積もった.

	砕波位置 x_b [m]	砕波時の波高 H_b [m]	砕波点の水深 h_b [m]	砕波時の波頂部の 水平流速 u_{top} [m/s]	砕波時の位相速度 C [m/s]	砕波時の無次元流速 u_{top}/C [-]
$U = 0$ m/s	3.940	0.135	0.112	0.988	1.00	0.99
$U = 6.84$ m/s	3.820	0.140	0.113	1.15	1.14	1.01
$U = 10.04$ m/s	3.820	0.140	0.113	1.19	1.11	1.07

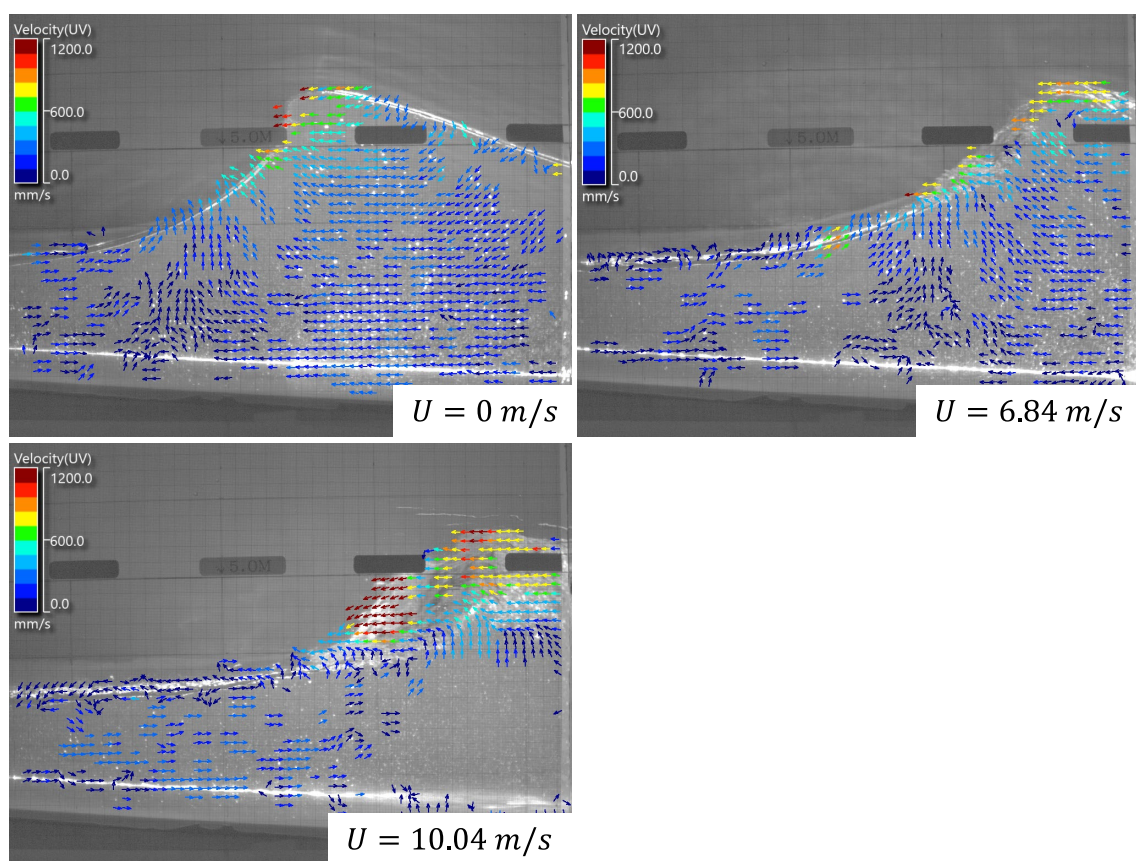


図-5.14 異なる風速における巻き波砕波の様子. これらの画像は同じ画角で撮影した.

Ward (1998)が示唆するように, 風下では砕波後に急激な表層流れが発生する(図-5.15 参照). 中風速の場合, 表層流れは波を先行するように流れた. 強風速の場合, 速い表層流れが水面を飛び跳ね, 長い距離を移動した. このため, 乱れによってより多くのエネルギーを失い, 結果として中風速の場合よりも越波流量が小さくなったと考えられる.

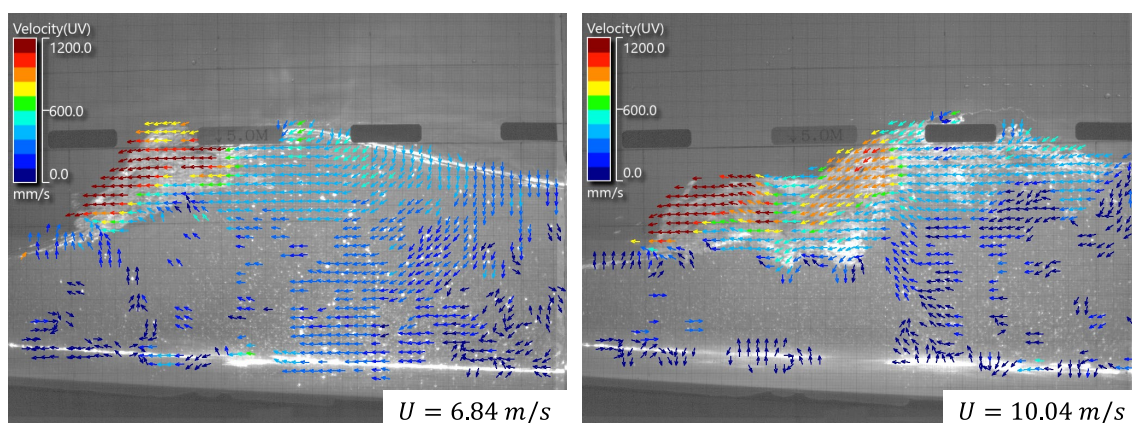


図-5.15 砕波後の表層流れの様子。

5.4.4 砕波形態の変化と越波への影響 ($H_0/L_0 = 0.0128$ の考察)

本実験のジオメトリでは、波形勾配が 0.0128 より小さい波は、直立壁の手前で砕波するか、あるいは砕波しない場合があることが分かった。このため、他の波形勾配をもつ波よりも砕波形態の変化における風の影響がより明らかに現れた。

無風の場合(図-5.16(a)参照)は、段波のようになり、直立壁に衝突する際に、流体内の気泡が破裂する音が聞こえた。中風速の場合(図-5.16(b)参照)は、巻き波砕波(plunging breaker)に近い砕波形態になり、砕波フロントが観察された。高風速の場合(図-5.16(c)参照)も、巻き波砕波を示し、中風速の場合よりも大きく乱れた砕波フロントが確認された。これらの結果は、過去の研究とは一致していない。たとえば、Galloway et al. (1989)や Douglass (1990)は、強い岸向き方向の風的作用によって、崩れ波砕波(spilling breaker)が促進されることを示唆している。しかしながら、本研究では、構造物の存在や、水路の長さが比較的短いというように、実験設定に大きな違いがあるため、既往研究の知見を単純に適用できない可能性がある。

実験による観察から、風による砕波形態の変化は、より巻き波砕波のような乱れた砕波を促進させるように作用し、結果的に砕波によるエネルギー損失を増加させていると考えられる。砕波位置に及ぼす風の影響と同様に、この効果によって、越波流量が高風速作用下で減少したと言える。

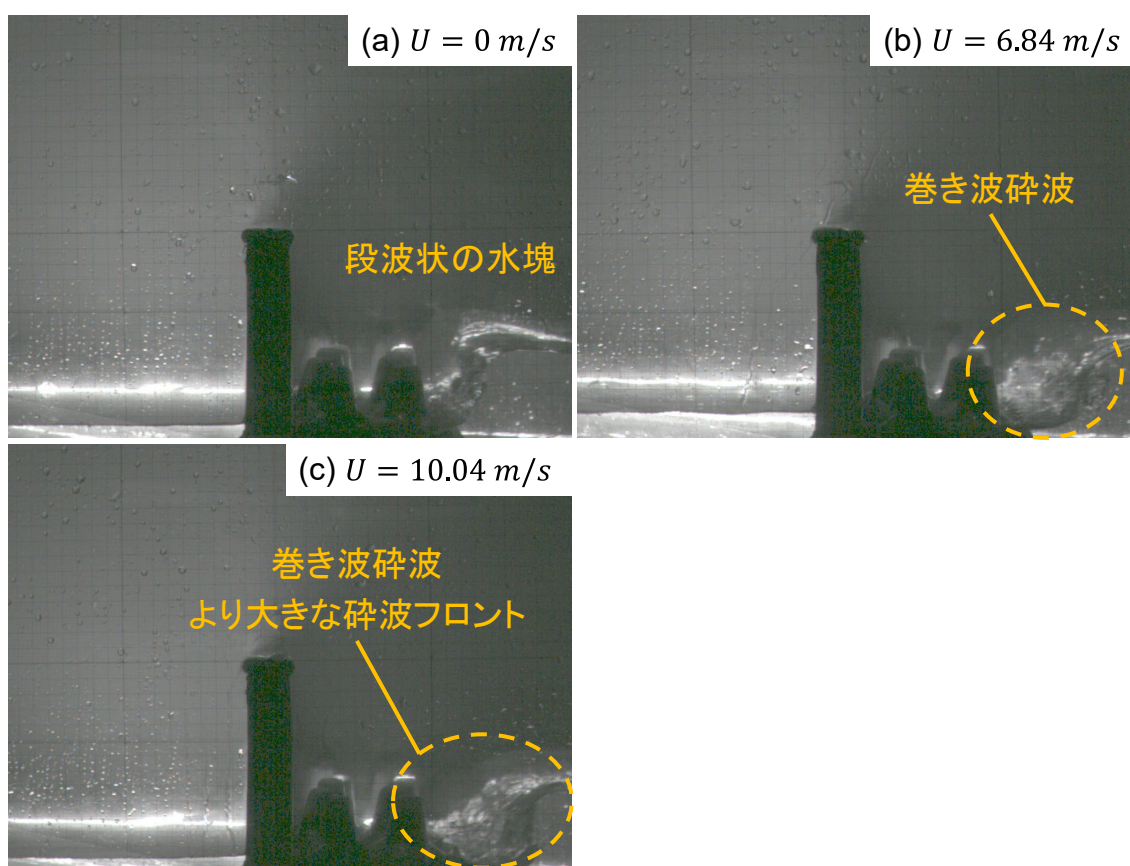


図-5.16 異なる風速における砕波フロントの様子.

5.4.5 間接的な風の影響の各々の寄与について

5.4.2 節から 5.4.4 節では越波流量に間接的に作用する風の影響の存在について議論した。しかしながら、各々の影響が越波流量の変化にどの程度寄与するかは風や波の条件によって異なり、本研究ではその定量的な考察に至っていない。このため、ある波形勾配の波についてどの風速が最大の越波をもたらすかという工学的に重要な考察は本研究で提示した議論だけでは特定できない。一連の物理現象のより進んだ理解のためには、異なる実験条件において考察を重ね個々の風の影響のバランスを考えることが重要である。

5.4.6 風の効果の定式化の提案

越波研究の工学的な目的の一つに、最適な海岸構造物の設計指針の提案が挙げられる。実験系と現実系をつなぐモデル効果や相似則の詳細は明らかではないが、本実験で得られた考察を定式化することは更なる研究に役立つと考えられる。

実際の設計上では、無風状態の越波流量に掛け合わせることで有風時の越波流量を評価する係数が役に立つと考えられる。簡便な定式化を志向するために以下の仮定を行う。

- 図-5.9(a)に示した、越波流量の波形勾配に関する変化を表す直線は二次曲線で近似する。
- 近似に伴う越波流量の過大評価は許容する。
- 係数に用いる変数は風速のみとする。

この仮定の下では、これまで議論してきた風の影響や、物理的考察(たとえば、特定の波形勾配において高風速条件での越波流量が中風速条件よりも小さくなるなど)は完全には反映されていない。将来的な拡張のために可能な限り簡単な形の定式化に留めていることに注意されたい。

近似曲線は図-5.17 に示した。風速補正係数は風速を変数とする指数関数で評価し(González-Escrivá, 2007), 実験結果に最適な定数として次の式を得た。

$$q_{wind} = \exp(\alpha(U)^\beta)q_0 \text{ with } \alpha = 1.15, \beta = 0.48 \quad (5.3)$$

ここで、 q_{wind} および q_0 はそれぞれ有風時と無風時の越波流量を示す。

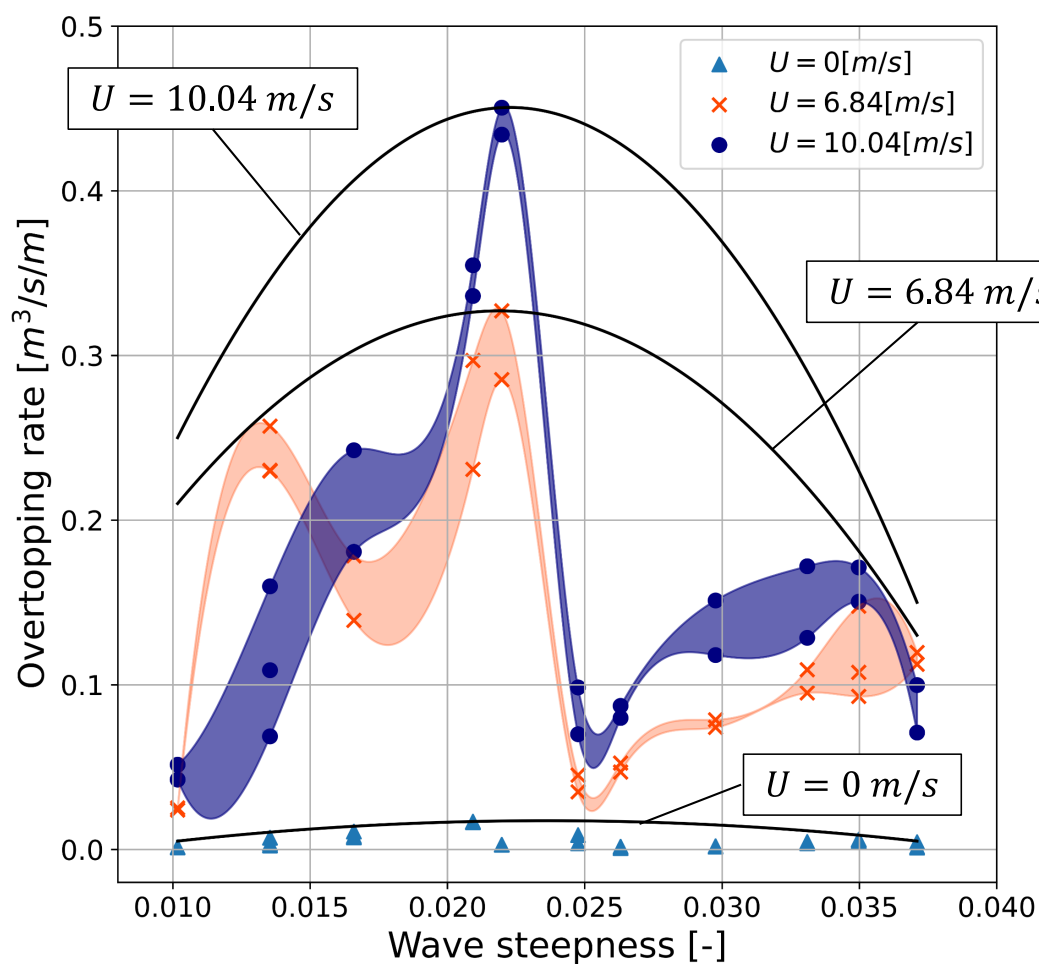


図-5.17 風速補正係数の算出の際に用いた越波流量の近似曲線。

5.4.6 風の観点からみる福浦海岸の越波災害

第2章では、風による越波被害の増加という仮定に帰着した具体的な現象として、築山の斜面における大規模洗掘跡と、頂部でスポット的に発見された塩枯れを挙げた。これらはいずれも本実験の結果から説明できる。洗掘は斜面を遡上する水塊によって生じることが多いが、風によって加速された大きな水塊が斜面まで直接輸送され、洗掘を引き起こす可能性があることが本実験の結果から分かった。築山の斜面は護岸から3 m 後方から始まっており、実験スケールでは、水塊がこれに相当する距離に渡って輸送されることは頻繁に生じていた。また、

越波水塊が風によって飛沫になり、遠くへ輸送される現象は、スポット的な塩枯れを説明している。

5.5 本章のまとめ

本章では、風洞水槽を用いた水理実験を通して、鉛直壁の越波流量の風速による変化を調べた。加えて、部分重複波や砕波といった、越波に至るまでの波の物理的素過程のそれぞれにおける風の影響について、PIV解析に基づく流速構造の考察を通して解明を試みた。

越波流量を入射波の波形勾配について整理すると、風が存在によって越波流量が増加するという傾向だけでなく、極値が存在することがわかった。入射波の波形勾配は部分重複波や砕波といった越波以外の現象にも関連するため、波形勾配によって、越波のプロセスが異なる。最大越波流量は、部分重複波で大きな水塊が高く打ち上がり、同時に砕波が生じる場合に実現される。これは実験水槽の幾何的条件に依存する特定の波形勾配で生じる現象である。

越波水塊に対してPIV解析を実施し、鉛直壁における越波では、遡上水塊を持ち上げる効果と、越波水塊を岸向きに輸送する効果があることが確認された。これは風が越波水塊に直接的に及ぼす影響と言える。鉛直壁周りの質量流量の計算から、風速作用化における越波現象の本質は水塊の質量輸送であると言える。質量流量は越波流量と強く相関していることから、時間平均的な越波流量の代わりに対象構造物の特徴断面を通過する質量輸送の程度を考察することにより、風の作用のような瞬間的な現象の本質的な理解が深まると考えられる。

越波に間接的に作用する物理的素過程(部分重複波, 砕波)についてもPIV解析を行い、風による変化と越波流量への影響を考察した。岸向きの風は部分重複波の腹で打ち上がった水塊を陸域に輸送することがわかった。これは最大越波流量が生じるメカニズムを説明すると同時に、福浦海岸の築山頂部で観察された塩枯れの発生過程も示唆している。さらに、風は砕波位置と砕波形態に影響を及ぼすことも明らかになった。高風速条件では、より深い位置での砕波と強い乱れを伴う砕波が促進され、いずれもエネルギーの損失と越波流量の減少の原因となることが分かった。本研究では、各々の間接的な風の影響の寄与について定量的な議論に至らなかった。したがって、所与の波形勾配について、最大の越波流量をもたらす風速は本研究での考察だけでは特定できない。

本実験で観察された現象は、第2章で取り上げた福浦海岸での越波災害の特徴を説明するものであった。したがって、一連の研究において通貫している、「風によって強化される越波

現象は、風が撃力的に作用する水塊輸送として捉えるべきである」という見方を補強したと言える。

第6章 結論

本研究は沿岸域の強風が越波現象に与える影響について調べた。2019年台風15号が横浜市福浦海岸にもたらした越波・浸水被害の調査で考察された被災状況から、水塊の質量輸送が風作用下の越波現象の本質である可能性を指摘した。この視点による越波機構の解明にあたり、数値流体モデル、水理実験を用いて検討した。以下に、各章で得られた結論を総括する。

第1章では、本研究の背景や目的、期待されるインパクトを述べ、海岸工学・防災工学における本研究の立場を具体的に示した。

第2章では、福浦海岸の被災状況から本研究の主題となる現象として、沿岸域の強風が越波規模を強めた可能性を指摘した。そして、強風作用下の越波現象を捉えるにあたり、本研究での新たな視点として、沿岸域の高波や越波を水塊の質量輸送として捉えることを示した。まず、現地調査、観測データ、および気象一波浪モデルによる波浪追算の結果から、福浦海岸の被災機構の解明を試みた。現地調査では、海岸護岸の破壊や護岸背後の丘の斜面の洗掘跡など大量の水塊が大きな運動量をもって福浦海岸に來襲したことが分かった。さらに、丘頂部の塩枯れからは、ある程度の大きさの水塊が風によって飛来したと判断した。一方で、数値モデルによる波浪追算の結果は、被害状況を説明するには過小なものとなった。今次台風の特徴である強い風や被害の特徴を考慮すると、強烈な岸向きの風が越波規模を強めた可能性がある。このように瞬間的な時間スケールで生じる高波現象について、採用した数値モデルの依拠するエネルギー輸送・位相平均の視点から離れ、水塊の質量輸送という運動学・位相解像の視点からの議論が有効であると考えられる。

第3章では、越波に関する研究について、風が越波にもたらす影響という視点から、議論の変遷を整理し、本研究で明らかにすべき点をまとめた。そして、以降の章で展開される具体的なアプローチについて述べ、既往研究に連なる本研究の立ち位置を明らかにした。越波における風の影響の可能性は古くから指摘されていたものの、設計においては規則波の知見を不規則波に拡張することが主流であり、越波研究の中心的な話題にはならなかった。1990年代には風洞水槽を用いて砕波、斜面遡上、飛沫といった様々な側面からの実験的研究がなされ

たが、現象の統一的な理解や知見の整理は為されなかった。2000年代には越波防止の護岸設計に関する欧州を中心に大規模国際プロジェクトが推進され、風の影響は半経験的に導かれた補正項として設計式に組み込まれたものの、本質的な物理現象を反映しているとは言い難い。2010年代には数値計算手法によるアプローチが見られたが、現象の再現性や計算の安定性の両面からの議論が不足している。以上を踏まえると、水理実験と数値計算の知見が互いに補完し合わずにいることに問題がある。このため、本研究のように「越波現象を水塊の質量輸送と捉える」という一つの視点で数値計算と水理実験の両面から議論を進める必要がある。数値計算は相似則を克服する可能性がある点で高い応用性と適用性が期待できるため、水理実験に先んじて検討を行った。

第4章では、数値計算手法を用いて、現象の再現性の限界や計算安定性についての考察を中心に、水塊の質量輸送の視点から越波を捉えることの妥当性の検証を行った。数値モデルには、離散化・計算手法として有限体積法(FVM法)、界面捕捉手法としてVOF法を採用した。提案した数値モデルを用いて、既往実験を再現すると、風による越波流量の増加という基本的な傾向は再現できているものの、砕波といった複雑な流体现象の再現性は十分ではなく、高風速での過小評価の傾向が確認された。さらに、これらの傾向を踏まえ、提案した数値モデルを不規則波に拡張し、現実スケールの福浦海岸に適用した。高風速で過小評価する数値モデルの傾向を考慮すると、計算結果は現地調査から見積もった値と比較して妥当な値を示した。提案した数値モデルは質量・運動量保存に厳密であり、この点から、本研究における越波の視点は数値解析的にある程度妥当であることが示された。一方、現象の再現においては、風速シアなどの相界面での物理現象のモデルの導入が重要であることが分かったが、FVM-VOF法においては原理的に困難である。また、再現性の検討にあたって、越波水塊に加えて、砕波など越波以前に生じる現象を流速分布の構造から議論することが重要であることが分かった。以上の検討を踏まえ、数値計算で再現できない現象を補う系統的な水理実験の必要性が浮き彫りになった。

第5章では、風洞水槽を用いた水理実験による検討を行った。第4章での考察を踏まえ、PIV解析による流速分布の構造に注目し、越波水塊の風速による振る舞いの違いについて定量的に考察した。さらに、砕波や部分重複波の形成などの越波以前の現象を越波の素過程と見なし、それぞれの風の影響を議論するために系統的な実験デザインを志向した。無風時(風速0 m/s)、中風速(6.84 m/s)、高風速(10.04 m/s)において、越波流量を入射波の波形勾配で整理すると、風速によって越波流量が著しく増加する傾向が確認され、特定の波形勾配

について極値が観察された。この極値は海岸構造物の設計に通常用いられる許容越波流量を大きく超えており、風の作用によって越波規模が非常に大きくなる条件の存在が示された。具体的な風の作用は越波水塊に作用する直接的な影響と、越波以前の砕波や部分重複波の形成に作用する間接的な影響に大別されると考えられる。直立壁を遡上する水塊には風による持ち上げと岸方向への輸送が同時に作用し、このように越波水塊に直接作用する風の影響は直立壁周りの断面を通過する質量流量を計算することにより明らかになった。この点から、水塊の質量輸送が風作用下の越波現象の本質であるという本研究の視点の妥当性は、実験的に示された。一方で、間接的な風の影響を評価するために、砕波と部分重複波について、同様の PIV 解析を用いて風速による運動の変化を流速分布の視点から考察した。越波流量が最大となるような波形勾配を持つ波は、部分重複波の腹で大量の水塊を前方に打ち上げ、その一部が風で輸送されて直接越波することが確認された。さらに、風によって砕波位置や砕波形態も変化し、高風速条件でより多くのエネルギーを消費するように変化することが分かった。これにより、ある波形勾配では高風速条件での越波流量が、中風速の場合よりも却って小さくなるという場合があることが説明できる。以上のように、風は越波水塊や伝播する波に対して複雑な変化をもたらすため、時間平均的な物理量である越波流量に注目した議論では、複雑な物理現象を捉えられない可能性がある。本研究のように、対象の海岸構造物の特徴断面を通過する質量流量に注目する方が、物理的背景の理解および防災における知見の拡充に資すると考えられる。

最後に、今後の課題について述べる。同テーマの研究は、水理実験を中心に進んでいくと考えられる。本研究の水理実験は、幾何条件に制限があり、異なるスケールにおける実験結果や考察を積み上げていく必要がある。第5章では、個別の素過程についての風の影響の定式化の指針を論じたが、具体的な式を提案するには、さらに多くの実験条件の検討が必要である。工学的には越波流量の算定が最も重要であり、設計式の提案には、砕波などの素過程を含む緻密な実験条件の検討が必要である。また、風洞水槽の実験は、相似則の問題から現実スケールでの適用性に原理的な難しさを抱えている。このため、現地調査もますます重要になると考えられる。

一方で、数値計算では、相境界面の物理現象を反映できるような計算手法によるモデル開発が必須である。界面の捕捉に優れる粒子法や格子ボルツマン法が有効な選択肢となりうる

が、二相が相互作用しながら運動する系での適用例は極めて少なく、アルゴリズムの選択には十分な吟味が不可欠である。

参考文献

泉宮尊司, 湯島智恵美, 石橋邦彦 (2007): 変動風速による海面抵抗係数と風波の応答に関する研究, 海岸工学論文集, 第 54 巻, 土木学会, pp. 41-45.

一般社団法人 可視化情報学会編 (2018): PIV ハンドブック第 2 班, 森北出版, 468p.

神奈川新聞 (2019): 【台風 15 号】10メートル超に高波到達 横浜・金沢区, 2019年9月18日(水).

川崎浩司, 菊雅美 (2011): 風外力を考慮した護岸越波解析のための数値波動水路の提案. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 67(2), I_58 – I_63.

菊雅美 (2011): 風外力を考慮したリーフ地形の波浪変形と護岸越波に関する研究. 名古屋大学.

気象庁: 台風ベストトラックデータ (<https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/rsmc-hp-pub-eg/besttrack.html>)

気象庁: 過去の気象データ (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)

京都大学生存権データベース: 気象庁数値予報データ (<http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/>)

久保田博貴, 鈴木高二朗 (2020): 2019年台風 15 号の高波による護岸の被災要因の検討. 土木学会論文集 B1(水工学), 76(1), 274–283.

合田良實 (1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, 第 9 巻 第 4 号, 3-41.

合田良實, 岸良安治, 神山豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾空港技術研究所報告, 第 14 巻 第 4 号, 3-44.

合田良實 (2008): 耐波工学 港湾・海岸構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 430p.

- 国土交通省港湾局:全国港湾海洋波浪情報網 NOWPHAS (<https://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>)
- 高木泰士, Md Rezuhanul ISLAM, Le Tuan ANH, 高橋篤平, 杉生高行, 古川郁貴 (2020): 2019年9月台風15号による神奈川・千葉・茨城の高波被害および東京湾の波浪追算. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 76(1), 12–21.
- 竹原幸生, 真木正弘, 辻本剛三, 江藤剛治, 高野保英. (2002): 風波発生時における水面近傍の気流・水流の PTV 同時計測. 海岸工学論文集, 第 49 卷, 土木学会, 66-70.
- 東京都港湾局: 東京都の潮位・波浪 (<https://www.kouwan.metro.tokyo.lg.jp/yakuwari/choui/>)
- 国立情報学研究所: デジタル台風 (<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>)
- 光易恒 (2014): 風波の力学における幾つかの問題について, 九州大学応用力学研究所所報, 第 146 号, 49-73.
- 山下裕之, 泉宮尊司, 石橋邦彦 (2002): 風波上の気流の変動特性とエネルギー輸送に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 卷, 土木学会, 71-75.
- 山下裕之, 長谷部純, 泉宮尊司, 黄光偉, 石橋邦彦 (2003): 風波下の乱流の相似構造と乱流エネルギーの生成・逸散に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 卷, 土木学会, 76-80.
- 山城賢, 吉田明徳, 橋本裕樹, 久留島暢之, 入江功 (2004): 越波実験における風洞水槽内風速の現地風速への換算. 海洋開発論文集, 20, 653–658.
- 山城賢, 村上邦宏, 吉田明徳 (2012): 画像解析を用いた水理模型実験における越波量計測. 土木学会論文集 B3(海洋開発), 68(2), I_300 – I_305.
- Battjes, J. A. (1974): Surf similarity. Coastal Engineering Proceedings, 14, 466–480.
- Bihs, H., Kamath, A., Alagan Chella, M., Aggarwal, A., & Arntsen, Ø. A. (2016): A new level set numerical wave tank with improved density interpolation for complex wave hydrodynamics. Computers & Fluids, 140, 191–208.

- Booij, Ris, & Holthuijsen. (1999): A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. *J. Geophys Res C: Oceans*, 104, C4, 7649-7666.
- De Chowdhury, S., Zhou, J. G., Khait, A., Causon, D., Qian, L., Mingham, C., & Pullen, T. (2021): Local overshoot and wind effects on wave overtopping at vertical coastal structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering*, 1-30.
- De Rouck, J., Geeraerts, J., Troch, P., Kortenhaus, A., Pullen, T., & Franco, L. (2005): New results on scale effects for wave overtopping at coastal structures. *Proceedings of International Conference of Coastal Engineering*.
- de Waal Johannes P., Tönjes Patrick, & van der Meer Jentsje W. (1996): Wave Overtopping of Vertical Structures Including Wind Effect. *Coastal Engineering*, 2216-2229.
- Di Leo, A., Dentale, F., Buccino, M., Tuozzo, S., & Carratelli, E. P. (2022). Numerical Analysis of Wind Effect on Wave Overtopping on a Vertical Seawall. *Water*, 14(23), 3891.
- Douglass, S. L. (1990): Influence of wind on breaking waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 116(6), 651-663.
- EA Manual. (1999): Wave overtopping of seawalls, design and assessment manual (R&D Technical Report W178). HR Wallingford Ltd. http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EA_Overtopping_Manual_w178.pdf
- EurOtop. (2007): Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment Manual. http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EAK-K073_EurOtop_2007.pdf
- EurOtop. (2018): Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application (2nd Edition). http://www.overtopping-manual.com/assets/downloads/EurOtop_II_2018_Final_version.pdf
- Galloway, J. S., Collins, M. B., & Moran, A. D. (1989): Onshore/offshore wind influence on breaking waves: An empirical study. *Coastal Engineering*, 13, 305-323.
- Goda, Y. (2010): *Random Seas and Design of Maritime Structures*, Advanced Series on Ocean

Engineering, Volume 33, World Scientific, 708p.

González-Escrivá, J. A. (2007): The role of wind in wave runup and overtopping of coastal structures. In *Coastal Engineering 2006*, World Scientific, 4766–4778.

González-Escrivá, J. A., Garrido, J. M., Medina, J. R., & Geeraerts, J. (2005): Laboratory real storm reproduction using wind. *Coastal Engineering 2004 - 29th International Conference*, 677–689.

González-Escrivá, J. A., Medina, J. R., Garrido, J., & de Rouck, J. (2003): Wind effects on runup and overtopping: influence on breakwater crest design. In *Coastal Engineering 2002*, World Scientific, 2251-2263.

Gotoh, H., Okayasu, A., Watanabe, Y. (2013): *Computational wave dynamics*, Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 37, World Scientific, 234p.

Hashida, M., Matsunaga, N., & Irie, I. (1997): Landward Transport of Spray Generated from a Wave Absorbing Sea Wall. *25th International Conference on Coastal Engineering 1996*.

Hieu, P. D., Vinh, P. N., Van Toan, D., & Son, N. T. (2014): Study of wave–wind interaction at a seawall using a numerical wave channel. *Applied Mathematical Modelling*, 38(21), 5149–5159.

Hirt, C. W., & Nichols, B. D. (1981): Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.

Inagaki, N., Shibayama, T., Esteban, M., & Takabatake, T. (2021): Effect of translate speed of typhoon on wind waves. *Natural Hazards*, 105(1), 841–858.

Inagaki, N., Shibayama, T., Takabatake, T., Esteban, M., Mäll, M., & Kyaw, T. O. (2022): Increase in overtopping rate caused by local gust-winds during the passage of a typhoon. *Coastal Engineering Journal*, 1–19.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of*

- Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.
- Iwagaki, Y., Tsuchiya, Y., & Inoue, M. (1966): On the effect of wind on wave overtopping on vertical seawalls. *Bulletin Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University*, 16(1), 11–30.
- Kiku, M., & Kawasaki, K. (2014): Proposal of numerical wave flume for wave overtopping computation considering wind external force. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 8.
- Komen, G. J., Hasselmann, S., & Hasselmann, K. (1984): On the Existence of a Fully Developed Wind-Sea Spectrum. *Journal of Physical Oceanography*, 14(8), 1271–1285.
- Kortenhaus, A., Oumeraci, H., Geeraerts, J., de Rouck, J., Medina, J. R., & González-Escrivá, J. A. (2005): Laboratory effects and further uncertainties associated with wave overtopping measurements. *Coastal Engineering 2004*, 4456–4468.
- Kossin, J. P. (2018): A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. *Nature*, 558(7708), 104–107.
- Kossin, J. P. (2018): Author Correction: A global slowdown of tropical-cyclone translation speed. *Nature*, 564(7735), E11–E16.
- Lorke, S., Bomschein, A., Schuttrumpf, H., & Pohl, H. R. (2012): Influence of wind and current on wave run-up and wave overtopping. RWTH Aachen University.
- Medina, J. R. (1999): Wind Effects on Runup and Breakwater Crest Design. 26th International Conference on Coastal Engineering 1998, 1068-1081.
- Mori, N., Shimura, T., Yoshida, K., Mizuta, R., Okada, Y., Fujita, M., Khujanazarov, T., & Nakakita, E. (2019): Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using 60-km resolution atmospheric global circulation model. *Coastal Engineering Journal*, 61(3), 295–307.

- Nakamura, R., Shibayama, T., Esteban, M., Iwamoto, T., & Nishizaki, S. (2020): Simulations of future typhoons and storm surges around Tokyo Bay using IPCC AR5 RCP 8.5 scenario in multi global climate models. *Coastal Engineering Journal*, 62(1), 101–127.
- Pearson, J. M., Bruce, T., Allsop, W., & Gironella, X. (2003): Violent wave overtopping – Measurements at large and small scale. *Coastal Engineering 2002 - Solving Coastal Conundrums - 28th International Conference*, 2227–2238.
- Pullen, T., Allsop, W., & Bruce, T. (2007): Wave overtopping at vertical seawalls: Field and laboratory measurements of spatial distributions. *Coastal Engineering 2006 - 30th International Conference*, 4702–4713.
- Pullen, T., Allsop, W., Bruce, T., & Geeraerts, J. (2005): Violent wave overtopping at Samphire hoe: Field and laboratory measurements. *Coastal Engineering 2004 - 29th International Conference*, 4379–4390.
- Pullen, T., Allsop, W., Bruce, T., & Pearson, J. (2009): Field and laboratory measurements of mean overtopping discharges and spatial distributions at vertical seawalls. *Coastal Engineering*, 56(2), 121–140.
- Rattanapitikon, W., Vivattanasirisak, T., & Shibayama, T. (2003): A proposal of new breaker height formula. *Coastal Engineering Journal*, 45(1), 29–48.
- Suzuki, T., Tajima, Y., Watanabe, M., Tsuruta, N., Takagi, H., Takabatake, T., Suzuki, K., Shimozono, T., Shigihara, Y., Shibayama, T., Kawaguchi, S., & Arikawa, T. (2020): Post-event survey of locally concentrated disaster due to 2019 Typhoon Faxai along the western shore of Tokyo Bay, Japan. *Coastal Engineering Journal*, 62(2), 146–158.
- Tamura, H., Kawaguchi, K., Iwamoto, T., & Fujiki, T. (2021): Coastal destruction and unusual wave spectra induced by Typhoon Faxai in 2019. *Coastal Engineering Journal*, 63(1), 92–105.
- U S. Army Coastal Engineering Research. (1984): *Shore protection manual Volume II*, 652p.
- van der Meer, J., & Bruce, T. (2014): New physical insights and design formulae on wave overtopping at sloping and vertical structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean*

Engineering, 140(6).

van der Meer, J. W., Verhaeghe, H., & Steendam, G. J. (2009): The new wave overtopping database for coastal structures. *Coastal Engineering*, 56(2), 108–120.

van Gent, M. R. A., van den Boogaard, H. F. P., Pozueta, B., & Medina, J. R. (2007): Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures. *Coastal Engineering*, 54(8), 586–593.

Ward, D. L. (1998): Wind effects on runup and overtopping of coastal structures. Texas A&M University.

Ward, D. L., Wibner, C. G., Zhang, J., & Edge, B. (1995): Wind effects on runup and overtopping. 24th International Conference on Coastal Engineering 1994.

Ward D. L., Zhang J., Wibner C. G., & Cinotto C. M. (1997): Wind effects on runup and overtopping of coastal structures. 25th International Conference on Coastal Engineering 1996, 2206–2215.

Xie, Z. (2017): Numerical modelling of wind effects on breaking waves in the surf zone. *Ocean Dynamics*, 67(10), 1251–1261.

Yamaguchi, M., Chan, J. C. L., Moon, I.-J., Yoshida, K., & Mizuta, R. (2020): Global warming changes tropical cyclone translation speed. *Nature Communications*, 11(1), 47.

Yousefi, K., Veron, F., & Buckley, M. P. (2020): Momentum flux measurements in the airflow over wind-generated surface waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 895.

研究業績一覧

a. 論文

1. Takabatake, T., Mäll, M., Chenxi, D., **Inagaki, N.**, Kishizaki, D., Esteban, M., Shibayama, T. (2020): Physical modeling of tsunamis generated by subaerial, partially submerged, and submarine landslides, Coastal Engineering Journal, 62(4), 582-601.
2. **Inagaki, N.**, Shibayama, T., Esteban, M., Takabatake, T. (2021): Effect of translate speed of typhoon on wind waves. Nat Hazards 105, 841–858.
3. Esteban, M., Takabatake, T., Achiari, H., Mikami, T., Nakamura, R., Gelfi, M., Panalaran, S., Nishida, Y., **Inagaki, N.**, Chadwick, C., Oizumi, K., Shibayama, T. (2021): Field Survey of Flank Collapse and Run-up Heights due to 2018 Anak Krakatau Tsunami, Journal of Coastal and Hydraulic Structures, 1, 1.
4. Takabatake, T., Han, D. C., Valdez, J. J., **Inagaki, N.**, Mäll, M., Esteban, M., Shibayama, T. (2022): Three-dimensional physical modeling of tsunamis generated by partially submerged landslides. Journal of Geophysical Research: Oceans, 127, e2021JC017826.
5. **Inagaki, N.**, Shibayama, T., Takabatake, T., Esteban, M., Mäll, M., Thit O. K. (2022): Increase in overtopping rate caused by local gust-winds during the passage of a typhoon, Coastal Engineering Journal, 64:1, 116-134.

b. 講演

1. **稲垣直人**, 柴山知也, 高嶋知行, Miguel Esteban (2020): 台風の移動速度の変化が高波の波高に与える影響, 第 28 回海洋工学シンポジウム, 遠隔システムによる開催, 2020 年 9 月 29 日-30 日.
2. **Inagaki, N.**, Shibayama, T., Esteban, M., Takabatake, T. (2020): EFFECT OF TRANSLATE SPEED OF TYPHOONS ON WIND WAVES, presented at the 37th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), virtual conference (vICCE 2020), October 6-9, 2020.
3. Esteban, M., Achiari, H., Takabatake, T., Nakamura, R., Mikami, T., Panalaran, S., Gelfi, M., **Inagaki, N.**, Nishida, Y., Chadwick, C., Oizumi, K., Shibayama, T. (2020): FIELD SURVEY

OF 2018 KRAKATAU TSUNAMI, presented at the 37th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), virtual conference (vICCE 2020), October 6-9, 2020.

4. 稲垣直人, 柴山知也, M. Esteban, 高島知行 (2021): 台風の移動速度の変化が高波の波高に与える影響, 第 68 回海岸工学講演会(オンライン開催), 2021 年 11 月 10 日-12 日.
5. 高島知行, D. Han, J. Valdez, 稲垣直人, 澤辺大輔, T. Zhang, 木場隆文, B. Zhao, M. Mäll, M. Esteban, 柴山知也 (2021): 地すべり津波を対象とした平面水槽による水理模型実験, 第 68 回海岸工学講演会(オンライン開催), 2021 年 11 月 10 日-12 日
6. Inagaki, N., Shibayama, T., Nakamura, R., Ishibashi, K., Esteban, M. (2022): EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS INTO THE EFFECT OF STRONG WINDS ON WAVE OVERTOPPING AT A VERTICAL SEAWALL, presented at 38th International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Sydney, December 4-9, 2022.

c. 著書

1. Inagaki, N., Shibayama, T.: "4.2 Typhoon Faxai, 2019" and "9.1.8 History of tsunami and storm surge in Japan" in Coastal Disaster Surveys and Assessment for Risk Mitigation, Edited by Shibayama, T., Esteban, M. CRC Press, Taylor & Francis.

謝辞

筆者の修士・博士課程はコロナ禍の影響を強く受けました。その情勢にあつて、ここに感謝の気持ちを表明したいと思える人が多くいることが筆者にとっての幸せです。

まず、本研究の主査として、また指導教員として4年半のご指導ご鞭撻を賜りました早稲田大学教授・柴山知也先生には深甚なる感謝を申し上げます。先生には博士課程の卒業だけでなく、その後大学教員として活躍することを見据え、たくさんの機会を与えてくださいました。「現地調査、数値計算、水理実験とあらゆる研究手法を駆使し、英語で論文を投稿する」という基本方針はこの博士研究として結実させられたと思います。また、先生の学生に対する絶妙な距離感は参考になりました。温かく見守りつつも教えすぎない先生の指導スタイルは筆者の自由な着想を伸ばしてくれたように思います。「人を育てられる研究者」を理想像とする筆者にとって先生の指導を受けられたことは天祐でした。

早稲田大学国際教育センター教授・Miguel Esteban 先生には、本研究の副査としてだけでなく、英語での学術論文執筆にあたって多くのご支援を賜りました。先生は気が付くと海外に居り、その多忙さに驚嘆する一方で、世界を駆けてたくさんの研究者と交流する姿に憧れておりました。

早稲田大学教授・関根正人先生ならびに早稲田大学教授・榊原豊先生には、本論文の副査として貴重な時間をいただきました。偶々お会いした際には、研究や体調について温かくお声掛けいただき、大変励みになりました。学部時代から授業を通して特に厚くご指導を賜りました両先生方に、重ねて感謝申し上げます。

東京都市大学准教授・三上貴仁先生にも、本論文の副査として貴重なご意見をいただきました。先生にはインドネシアとモーリシャスでの現地調査でもお世話になりました。先生は常に冷静でいながらも温かい雰囲気があり、研究者だけではなく人としても見習いたいところが多いです。

近畿大学准教授・高島知行先生には、先生が早稲田大学に在籍していた時に多くのご指導を賜りました。数値解析・水理実験・現地調査の全てに秀で、質の高い論文を瞬時に書き上

げる先生は正に筆者の目標とする人物です。研究者として、社会人として、柴山研究室の偉大な兄弟子として、先生を尊敬しております。

柴山研究室・秘書の松丸恵美子氏には、数々の事務作業で多くのご支援をいただきました。出張や機材購入など、松丸さんなしには行えなかったと思います。また、何気ない会話にも付き合っただき、筆者の精神衛生面で大きな貢献をしてくださいました。

新潟大学工学部・海岸研の皆様には、新潟滞在時にお世話になりました。准教授・中村亮太先生は常に楽しそうに、情熱的に研究・指導をされていて、刺激を受けました。プライベートでお話する機会も多く、大学教員としての仕事や生活が身近にイメージできるようになりました。技術職員・石橋邦彦氏には、水理実験や新潟海岸での現地調査を通して多くのことを勉強させていただきました。実験設備・機材の管理など実務的なことだけではなく、大学教員としての心構えなどの薫陶も受けました。実験で観察された現象について、夜遅くまで議論したことは、新潟に滞在している期間で最も充実した時間でした。海岸研の学生諸君(小原裕貴君、矢崎真君、青木雄大君、片山大地君、樺澤証樹君、高山遼太君、宮下雄成君、兼村瑤望君、佐藤佑真君、志村雄大君、外山亜里君、西田昂平君、武士俣光司君)には水理実験の補助をしていただきました。長時間の拘束、集中力を要する作業が多かったですが、積極的に参加いただき、実験が円滑に進みました。彼らの補助なしには実験は完遂しておりませんでした。

高校・大学・米国留学時代の友人は、折に触れて食事や旅行に誘ってくださいました。研究室に籠りがちな筆者にとって良い刺激になったと同時に、他愛無い話にも付き合っただきました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員奨励費(研究代表者:早稲田大学・稲垣直人, 課題番号:21J20393)の助成を受けたものであることを付記し、感謝申し上げます。

最後に、筆者を応援し支えてくれた家族に深い感謝と愛情を捧げたいと思います。両親には、これまでの生活の基盤を支えていただきました。多大な負担をかけても筆者の選択を信じ応援してくれた父と、綺麗な家と温かく美味しい食事を提供してくれた母の愛情なしには、これまでの人生を歩んで来られませんでした。研究者・教育者でもあった祖母は研究の道へ進む筆者を常に応援し、励ましてくれました。祖母の住む佐賀県唐津市は筆者のもう一つの家です。美しい唐津の海と虹の松原は筆者の幼い日々の思い出を彩っており、海岸工学への道を歩ませてくれたのだと思います。