

ISSN 1346-7328

国総研資料 第1355号

令和8年7月

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1355

July 2026

うちあげ高予測の手法及び精度検証

姫野一樹・福原直樹・柴田亮・竹下哲也・加藤史訓

Methods and Accuracy Verification of Wave Runup Heights Forecasting

HIMENO Kazuki, FUKUHARA Naoki, SHIBATA Ryo, TAKESHITA Tetsuya, KATO Fuminori

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

うちあげ高予測の手法及び精度検証

姫野 一樹	*
福原 直樹	*
柴田 亮	**
竹下 哲也	***
加藤 史訓	****

Methods and Accuracy Verification of Wave Runup Heights Forecasting

HIMENO Kazuki
FUKUHARA Naoki
SHIBATA Ryo
TAKESHITA Tetsuya
KATO Fuminori

概要

本資料は、波浪うちあげ高予測システムの技術的事項に関する検討成果をまとめたものである。

キーワード：うちあげ高、予測、高潮、高波、精度検証

Synopsis

This note is a summary of findings obtained from research on technical issues to develop a wave runup heights forecasting system.

Key Words : Wave Runup Height, Forecast, Storm Surges,
High Waves, Accuracy Verification

* 河川研究部海岸研究室主任研究官	Senior Researcher of Coast Division, River Department
** 河川研究部海岸研究室長	Head of Coast Division, River Department
*** 河川研究部水防災システム研究官	Research Coordinator for Integrated Water Disaster Management, River Department
**** 河川研究部流域マネジメント研究官	Research Coordinator for Integrated River Basin Management, River Department

目次

1. はじめに	1
2. うちあげ高予測の手法	4
2. 1 うちあげ高予測の全体構成	4
2. 2 うちあげ高予測に用いる波浪の推算方法	6
2. 2. 1 うちあげ高予測に用いる波浪の要件と推算方法	6
2. 2. 2 波浪予測の補正方法	9
2. 3 うちあげ高の算定方法	11
2. 3. 1 予測に用いるうちあげ高算定の要件	11
2. 3. 2 算定方法の概要	14
2. 3. 3 算定方法の使い分け	20
2. 3. 4 うちあげ高算定における消波施設の効果の考慮	22
2. 4 まとめ	24
3. うちあげ高予測の精度検証	25
3. 1 システムの開発過程で実施した精度検証	26
3. 1. 1 平成 21 年（2009 年）台風第 18 号を対象とした定量的検証	27
3. 1. 2 平成 30 年（2018 年）台風第 21 号を対象とした定量的検証	42
3. 1. 3 令和元年（2019 年）東日本台風（台風第 19 号）を対象とした定量的検証	49
3. 1. 4 平成 28 年（2016 年）～令和 5 年（2023 年）の台風・低気圧を対象 とした定性的検証	55
3. 1. 5 緩勾配海岸における現地観測値に対する定量的検証	62
3. 1. 6 まとめ	74
3. 2 予測に用いるうちあげ高算定方法の精度検証	76
3. 2. 1 表法先から砕波点までの勾配が急な海岸での検証	78
3. 2. 2 表法先から砕波点までの勾配が緩い海岸での検証	90
3. 2. 3 まとめ	130
3. 3 うちあげ高予測の総合的な評価	131
3. 3. 1 平成 26 年（2014 年）～令和 5 年（2023 年）の台風等における予警報 の改善効果の検証	132
3. 3. 2 令和 5 年（2023 年）8 月～令和 6 年（2024 年）7 月における浸水被害 の捕捉率・適中率の検証	133
3. 4 まとめ	134

4. まとめと今後の課題	135
5. 資料編	137
(資料1) 浅海波浪モデルの開発	138
(資料2) 潮位・波浪予測の補正方法	197
(資料3) 緩勾配海岸を対象としたうちあげ高算定式の開発	219
謝辞	223
参考文献	224

研究担当者名簿

(研究期間：平成 16 年度（2004 年度）～令和 8 年度（2026 年度）)

所属	役職	氏名	担当期間	担当
河川研究部 海岸研究室	室長	福濱 方哉	H16(2004).4～ H20(2008).3	研究総括
	室長	諏訪 義雄	H20(2008).4～ H28(2016).8	研究総括
	室長・ 主任研究官	加藤 史訓	H16(2004).4～ H26(2014).6 H28(2016).4～ R6(2024).6	研究総括、1～4 章
	室長	柴田 亮	R6(2024).7～ R8(2026).7	研究総括、1～4 章
	主任研究官	竹下 哲也	H26(2014).7～ R1(2019).6	1～2 章
	主任研究官	岩田 伸隆	R1(2019).7～ R3(2021).3	
	主任研究官	井樋世一郎	R3(2021).4～ R4(2022).3	
	主任研究官・ 研究官	姫野 一樹	H25(2013).4～ H28(2016).3 R4(2022).4～ R8(2026).7	1～4 章
	主任研究官・ 研究官	福原 直樹	H30(2018).4～ R2(2020).3 R4(2022).4～ R8(2026).7	2～3 章
	研究官	笹岡 信吾	H21(2009).4～ H23(2011).3	
	研究官	鳩貝 聡	H23(2011).4～ H25(2013).3	
	研究官	湯浅 直美	R2(2020).4～ R5(2023).3	

1. はじめに

太平洋の北西部に位置する我が国では、台風等の低気圧や冬季風浪により高潮や高波が発生し、沿岸部において甚大な被害を受けてきた。特に、高潮による水位上昇が大きくなりやすい地形条件を有する三大湾の沿岸にゼロメートル地帯が存在するなど、高潮による浸水のリスクが高い地域を抱えており、昭和 34 年（1959 年）の伊勢湾台風をはじめ、高潮による甚大な被害を繰り返し受けてきた。また、平成 16 年（2004 年）10 月の台風第 23 号による高知県の菜生海岸における高波災害、平成 20 年（2008 年）2 月の寄り回り波による富山湾沿岸での高波災害をはじめ、平成 30 年（2018 年）9 月の台風第 21 号による兵庫県芦屋市等での浸水被害等が越波により発生している。

高潮災害や高波災害に対応するため、これまで、海岸堤防や護岸等の海岸保全施設の整備により背後地を防護するとともに、高潮警報等に基づく警戒体制の整備や、想定し得る最大規模の高潮による浸水想定区域の指定等の取り組みが進められてきたが、今後、気候変動の影響による平均海面水位の上昇や日本付近での台風の強度の増加等により、沿岸地域への影響が懸念されている。また、高潮や高波による被害の防止及び軽減のため、海岸保全施設の整備、水門等の確実かつ安全な操作に加え、海岸保全施設の設計条件を超える高潮・高波に対し、住民の迅速な避難を実現する高潮警戒避難体制の充実・強化の重要性がますます増している。

このような背景のもと、令和 7 年（2025 年）12 月に気象業務法及び水防法が改正され、国土交通省・気象庁・都道府県が共同で波のうちあげの要素を加味した高潮の予報・警報を行う仕組みが創設され、令和 8 年（2026 年）5 月から実運用が開始された。この仕組みは、国土技術政策総合研究所（以下、国総研）が関係機関と連携して開発・改良を進めてきた「波浪うちあげ高予測システム（以下、うちあげ高予測システム）」によるうちあげ高の予測情報の活用を前提としており、本資料は、うちあげ高予測システムに用いているうちあげ高予測の手法及び精度検証について整理したものである。

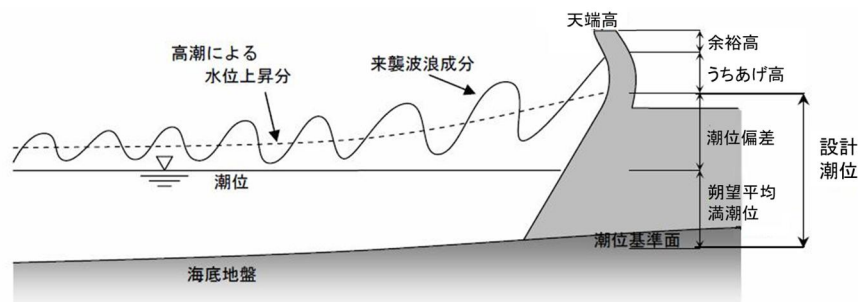


図-1.1 沖合の波浪、うちあげ高の違いと海岸堤防の設計条件

これまで気象庁が発表してきた高潮や波浪の予報・警報は、沿岸での潮位や沖合での波浪を市町村単位で予報するものであったが、沿岸地形の影響を受けながら海岸に到達した波浪が堤防等にうちあがる高さ（図-1.1）までは予測されておらず、堤防等での越波がいつからどの程度の時間生じるのか示すことができていなかった。また、このような波のうちあげ高のリアルタイム予測の技術も確立していなかった。

波のうちあげ高予測を警戒避難情報として活用するには以下の3点の課題解決が必要であった。

- 1) 沖合の波浪・潮位を精度良く予測する技術
- 2) 沖合の波浪から波のうちあげ高を精度良く算定する技術
- 3) 上記の予測技術をシステム化すること

上記1)については、従来から気象庁により運用されている高潮モデル（高潮ガイダンス）（気象庁；2026a）及び沿岸波浪モデル（気象庁；2026b）を用いることとした。これらの予測精度は、気象庁において精度向上が図られてきたが、国総研は、気象庁等の関係機関と連携し、平成16年度（2004年度）から浅海域における波浪を精度良く予測する技術（浅海波浪モデル）を開発し、気象庁により全国22海域（17計算領域）において運用されている。また、上記3)についても、国総研が中心となり、予測技術全体のシステム化を図り、うちあげ高予測システムを開発した。うちあげ高予測システムの全国約500地点での予測情報は、波のうちあげ高を考慮した高潮予測の活用に関する実証実験の一環として、気象庁、各地方整備局等、都道府県及び一部の市町村に提供されている。また、上述した波のうちあげの要素を加味した高潮の予警報は、国総研が開発したうちあげ高予測システムによる予測結果を活用して行われることとなる。

なお、上記3)でシステム化した波のうちあげ高の予測技術を警戒避難体制に活用するためには、上記2)の「沖合の波浪から波のうちあげ高を精度良く算定する技術」の向上が不可欠であり、国総研では、海岸工学における昨今の研究成果を参考にしつつ、波のうちあげ高の算定技術及び精度検証に関する研究を進め、その成果を、土木学会論文集（加藤ら；

2010、2020、姫野ら；2025）等で順次発表してきた。

本資料は、上記１）と３）の概要には触れるものの（２．１、２．２、５章）、主として上記２）の波のうちあげ高の算定技術（２．３）並びにその精度検証（３章）に関する現時点の研究成果をまとめたものである。とりまとめにあたっては、うちあげ高予測システムの利用者が波のうちあげ高の算定手法と算定結果の精度、沖合の波浪、潮位予測を含めた波のうちあげ高予測の現状について理解できるようにするとともに、大学等研究機関や民間企業等に対し、波のうちあげ高予測に関する今後の研究開発の参考とすることを意図したものである。

また、精度検証にあたっては、波のうちあげ高の予測精度には、上記１）の沖合の波浪・潮位の予測精度と、上記２）の沖合の波浪から波のうちあげ高を算定する精度の両方が含まれることから、可能な限りこの２つの要因を切り分けて整理し分析した。加えて、提案されている規則波、不規則波を対象とした波のうちあげ高の各種算定方法の精度検証やその使い分けについても示した。

なお、本資料の構成は、２章においてうちあげ高予測の手法の説明、３章においてうちあげ高予測の精度検証の結果を示し、４章に全体のまとめと今後の課題を整理したものとなっている。

2. うちあげ高予測の手法

2. 1 うちあげ高予測の全体構成

うちあげ高予測システムは、気象庁が予測する潮位（天文潮に潮位偏差を加えた潮位）及び波浪のリアルタイムの予測値をもとに、対象地点の海底勾配等に応じて選択したうちあげ高（一部地点は、越波流量）の算定方法を用いて、対象地点の海底地形及び堤防等の施設形状のほか、消波施設の効果も考慮して、39 時間先までの波のうちあげ高（波の遡上点の標高）を予測し、堤防等の天端高と比較できるように表示するものである（図-2.1.1）。台風の進路によって高潮や波浪が大きく変化することがあり、進路予測には一定の幅があることから、台風接近時には、気象庁が発表する台風の進路予報円の中心及び周囲 4 点（最も速い、最も右寄り、最も遅い、最も左寄り）を通る計 5 コースを対象に、うちあげ高を予測する（図-2.1.2）。うちあげ高の予測値は、気象庁の潮位・波浪予測値の配信（潮位：3 時間間隔、波浪：6 時間間隔）に合わせて更新される。

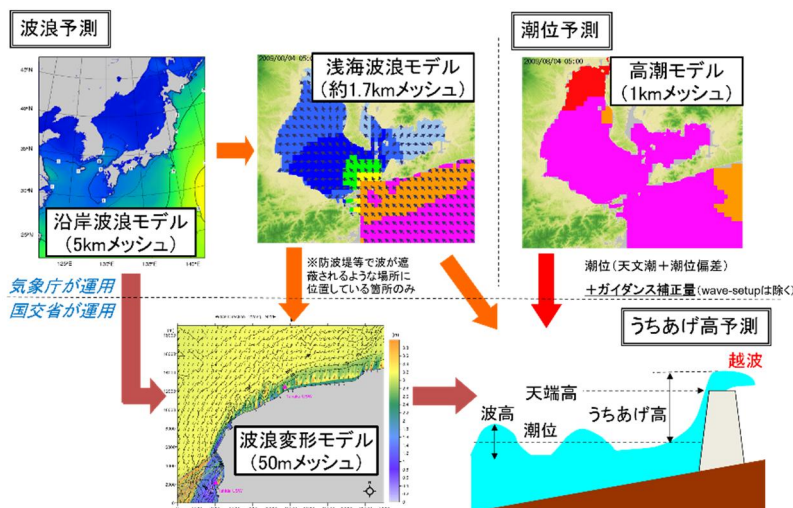


図-2.1.1 うちあげ高予測機能の全体構成

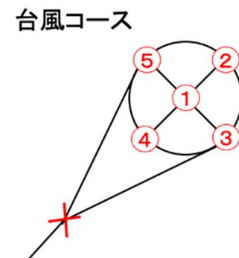


図-2.1.2 台風 5 コース

うちあげ高予測に用いる潮位は気象庁の高潮ガイダンス（計算格子間隔 1 km）の出力値である。高潮ガイダンスは、天文潮と潮位偏差を予測する高潮モデルで考慮されていない波浪効果（wave-setup）、浅海潮、海況要因による補正量を算出し、高潮モデルに加算したものである。ここで、海況要因による補正は、過去 24 時間の毎時観測潮位と予測潮位の差を求め、1 日以上継続しているものを予測の補正量としている。つまり、高潮ガイダンスを用いることで、1 日以上継続する海況要因による異常潮位について、潮位の観測値（実況値）による補正が施されている。ただし、うちあげ高算定方法の基となった実験においては、波浪効果（wave-setup）による潮位上昇が含まれているため、高潮ガイダンスの出力値を用いる

際は、波浪効果（wave-setup）の補正量を差し引く処理を実施している。

また、うちあげ高予測に用いる波浪は、気象庁の浅海波浪モデル（計算格子間隔約 1.7km）の出力値、沿岸波浪モデル（計算格子間隔 5km）もしくは浅海波浪モデルの出力値を沖側境界で与えた波浪変形モデルの出力値のいずれかである。波浪変形モデルは、沖波のさまざまな条件（波高：1m 刻み、周期：1 秒刻み、波向：10 度刻み）について、エネルギー平衡方程式（間瀬ら；1999）による波浪変形計算で対象地点近傍の波高を求め、その沖波波高との比を整理した波浪変形テーブルである。沿岸波浪モデルでは観測値（実況値）の同化が行われているが、浅海波浪モデルの予測値については、観測値（実況値）の同化は行われていないため、予測地点近傍に波浪観測所があり、リアルタイムに観測値が得られる予測地点は、うちあげ高予測システムにおいて補正を実施している。補正方法の詳細については、次節で紹介する。

なお、令和 8 年（2026 年）6 月からは、気象庁が台風、発達した低気圧の実況等を踏まえて、潮位、波浪の予測値を補正した予測値によるうちあげ高の予測も追加し、より精度の高い予測が可能となった。

このようにして得られた潮位・波浪予測値を用いて、海岸管理者等から提供を受けた対象地点の堤防形状や海底地形、消波施設（離岸堤・人工リーフ・消波工）を踏まえて、うちあげ高を算出する。以上をまとめたのが、図-2.1.3 である。以下では、うちあげ高予測システムに入力する波浪の推算方法、うちあげ高算定方法について説明する。

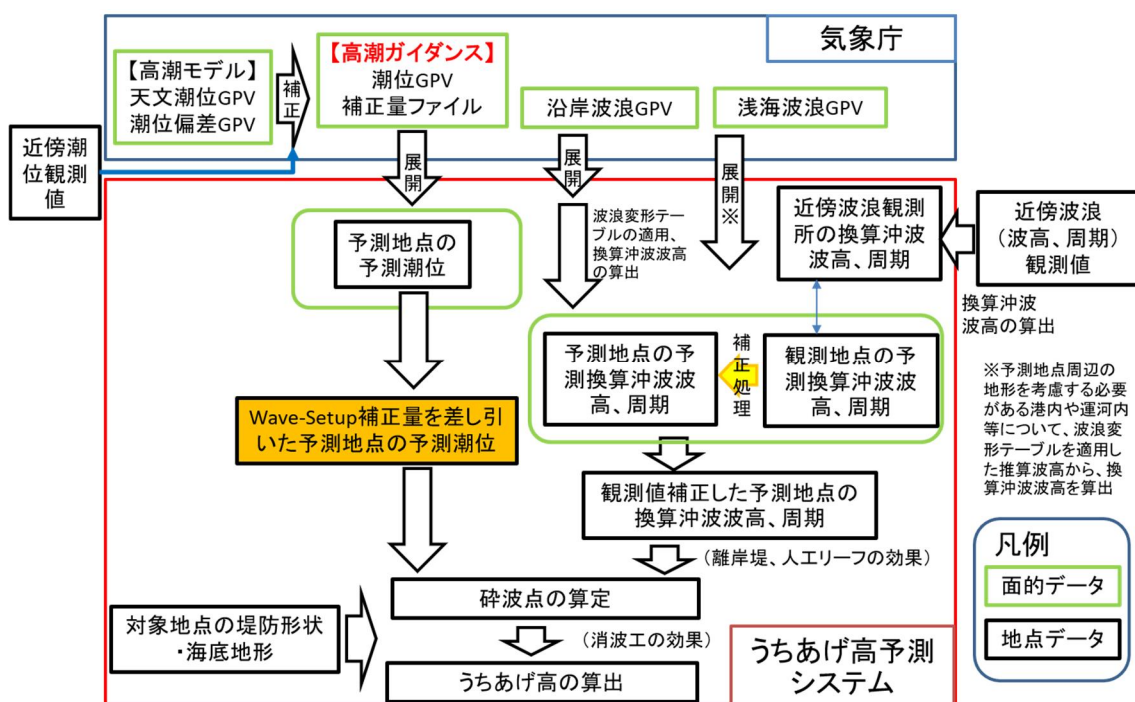


図-2.1.3 入力に用いる潮位、波浪の処理の流れ

2. 2 うちあげ高予測に用いる波浪の推算方法

2. 2. 1 うちあげ高予測に用いる波浪の要件と推算方法

波のうちあげ高の予測結果は海岸堤防の天端高と比較することになるため、予測に用いるうちあげ高の算定方法は海岸堤防の天端高の設定と同様のものが望ましく、その算定に用いる波浪を適切に求める必要がある。海岸堤防の天端高の設定における設計波のうちあげ高の計算には、断面二次元の水理模型実験の結果に基づいて開発された算定図や算定式を用いることが多い。

断面二次元の水理模型実験の結果に基づいて開発されたうちあげ高の算定方法では、沖からの入射波（沖波）の波高として換算沖波波高を用いる必要がある。換算沖波波高とは、屈折と回折による波高の平面的な変化が考慮された沖波の波高であり、次式のとおりである。

$$H_0' = K_r K_d H_0 \quad (2.2.1.1)$$

ここで、 H_0' は換算沖波波高、 K_d は回折係数、 K_r は屈折係数、 H_0 は沖波の有義波高である。

図-2.1.1 に示した気象庁の沿岸波浪モデルは、浅水変形や屈折が考慮されておらず、空間解像度が比較的粗い（約 5 km 格子）。このため、沿岸波浪モデルでは複雑な地形の効果が考慮できず、うちあげ高予測に用いる波浪として十分な精度を有しているとは言い難い。一方、外洋での沿岸波浪モデルの予測精度は十分に確認されている。

以上のことから、うちあげ高予測に用いる換算沖波波高は、外洋での沿岸波浪モデルの出力値をもとに、浅海での現象の影響を加味して求めることが望ましいと考えられる。その方法としては、以下の 2 つが考えられる。

- 1) 沿岸波浪モデルの出力値を境界条件として、沿岸の複雑な地形や浅海での現象を考慮できる波浪モデル（浅海波浪モデル）により求める方法
- 2) うちあげ高予測の対象地点とその最寄りの沿岸波浪モデルまたは浅海波浪モデルの出力点との間における波浪変形による波高等の変化についてあらかじめ波浪変形計算を行い整理した表（波浪変形テーブル）により求める方法

1) は比較的広い範囲を対象にできることから、複雑な地形を有する内湾や、外洋に面した比較的緩勾配の海岸に適している。浅海波浪モデルは本研究で開発（加藤ら；2009）したものであり、現在、気象庁において図-2.2.1.1 に示す 17 計算領域（22 海域）において運用されている（Japan Meteorological Agency；2026）。その開発における検討内容の詳細は、「5. 資料編 資料 1」に記載する。

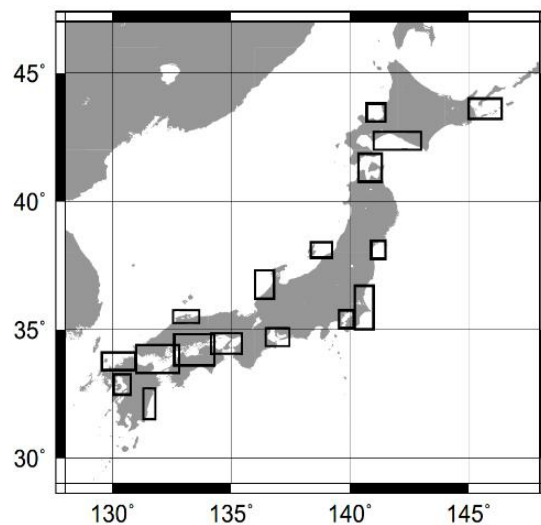


図-2.2.1.1 浅海波浪モデルの計算領域（Japan Meteorological Agency；2026）

一方、2）は数 10 m 程度の解像度の波浪変形計算が可能なことから、比較的急勾配の海岸に加えて、沿岸波浪モデルや浅海波浪モデルの格子間隔では表現できない防波堤等による遮蔽域にある海岸に適している。波浪変形テーブルの作成は、表-2.2.1.1 に示す計算範囲・間隔において、あらかじめエネルギー平衡方程式（間瀬ら；1999）で沖波波高と波浪変形後の波高比を求めることで作成している。波浪変形計算は、50m 格子で計算を実施しており、沿岸の最寄りの波浪を抽出すると砕波後の波浪を抽出してしまうおそれがあるため、あらかじめ波高・周期・波向き毎に波浪変形計算における砕波点を検索し、砕波点の 1 格子沖側の予測値を換算沖波波高として出力する。こうして作成した波浪変形テーブルの入力となる波浪は、図-2.2.1.2 に示すとおり、沿岸波浪モデルまたは浅海波浪モデルの格子のうち、予測地点の位置関係を踏まえ、東西南北最大 4 格子（例では、東西北の 3 格子）のうち、最も波高が高い格子の波浪諸元を波浪変形テーブルの入力値とすることとしている。

表-2.2.1.1 波浪変形計算の計算範囲と間隔

	計算範囲	間隔
波高	1 ～15m	1 m
周期	4～20 秒 (波形勾配が 0.05 以上、 0.005 以下のケースは除く)	1 秒
波向	0 度～350 度 (陸からの波向は除く)	10 度

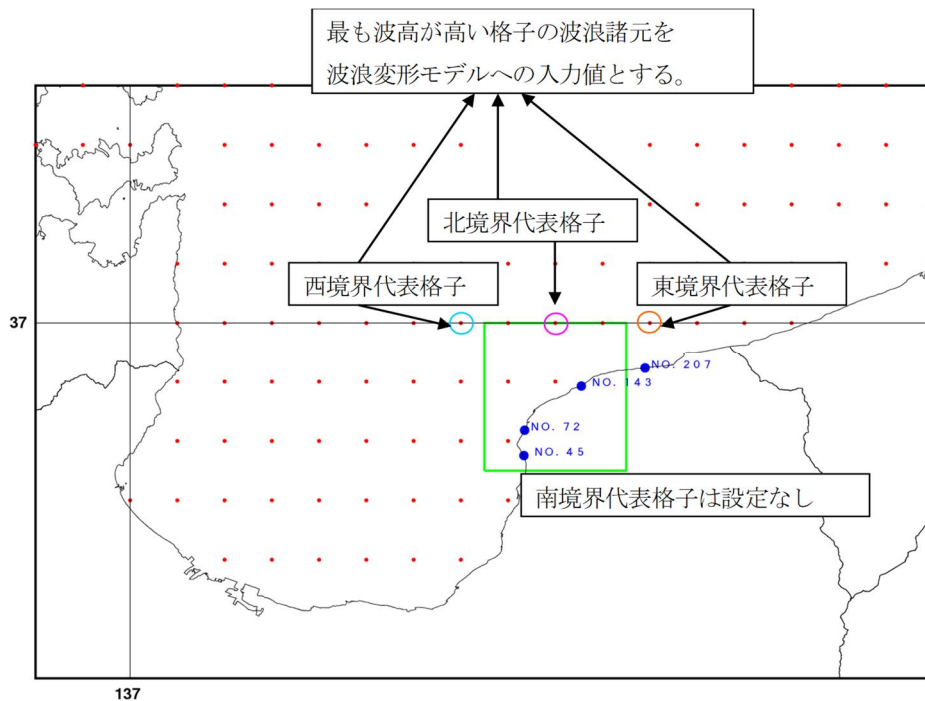


図-2.2.1.2 富山湾での波浪変形テーブルへの入力波の設定

以上の通り、うちあげ高予測システムにおいては、波の浅海域における変形を考慮した浅海波浪モデルの出力値や沿岸波浪モデルもしくは浅海波浪モデルの出力値を沖側境界で与えた波浪変形モデルの出力値を用いるため、次式で表されるある地点の水深での波高 (H_e) が入力値となる。

$$H_e = K_r K_d K_s H_0 \quad (2.2.1.2)$$

ここで、 K_s は浅水係数である。

このことから、波浪うちあげ高予測システムで取り扱う入力波高から換算沖波波高は次式により求められる。

$$H'_0 = H_e / K_s \quad (2.2.1.3)$$

なお、うちあげ高の算定にあたっては、沖波の周期 T から求まる沖波の波長 (L_0) も必要となる。うちあげ高予測で入力波となる条件の深海波では、次式で表される。

$$L_0 = 1.56T^2 \quad (2.2.1.4)$$

2. 2. 2 波浪予測の補正方法

うちあげ高予測に用いる波浪予測の誤差はうちあげ高予測の精度に影響することから、波浪の観測値を用いて沿岸波浪モデルや浅海波浪モデルで得られた波浪予測を補正する方法を検討した。検討の詳細は、「5. 資料編 資料2」を参照されたい。

うちあげ高予測システムでは、予測地点近傍に波浪観測所のある地点について、波浪予測の補正を実装している。具体的には、図-2.2.2.1 に示す3つの手法（カルマンフィルタ、回帰分析、最適内挿法）のいずれかを用いて補正している。なお、カルマンフィルタ、回帰分析については、波浪観測地点における補正量を求めることになるため、予測地点で入力する波浪について、2地点間の補正前予測値の比を用いて調整している。（図-2.2.2.2）

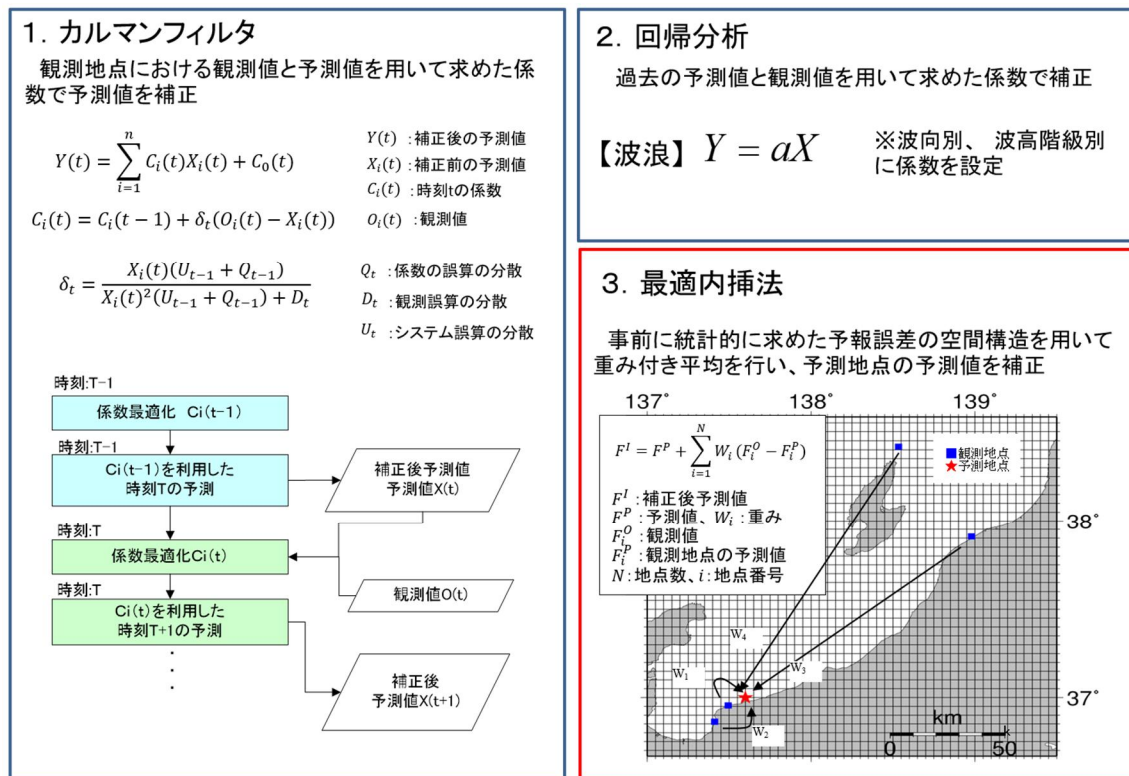


図-2.2.2.1 波浪予測値の補正方法

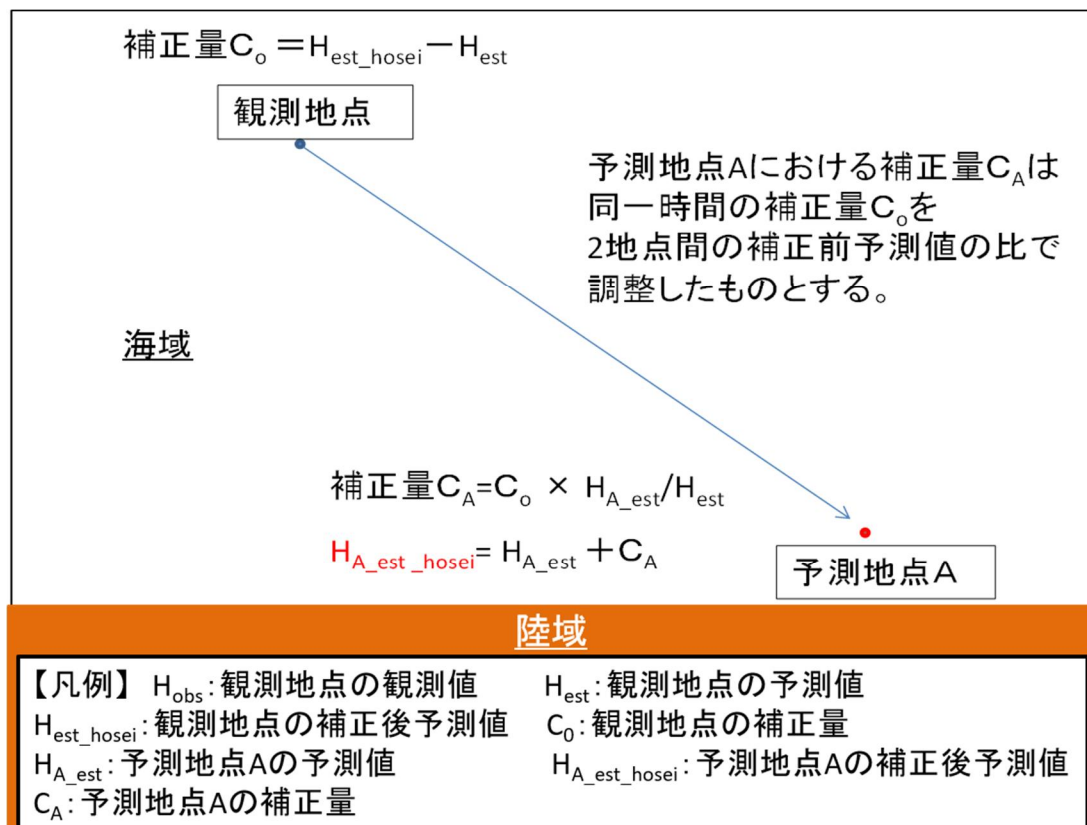


図-2.2.2.2 カルマンフィルタ、回帰分析による入力波の補正方法

2. 3 うちあげ高の算定方法

2. 3. 1 予測に用いるうちあげ高算定の要件

全国の海岸でうちあげ高予測を行うためには、さまざまな海浜断面や堤防等の形状を考慮できるうちあげ高算定法を用いる必要がある。海岸堤防の天端高の設定における設計波のうちあげ高算定によく用いられる改良仮想勾配法では、図-2.3.1.1のように、複雑な海浜断面や堤防等の形状を考慮するため、対象地点の断面図を用いて砕波点から波の遡上点までの面積 A を算出し、砕波点から波の遡上点までの平均的な勾配の逆数である $\cot \beta$ を次式で求めている。

$$\cot \beta = \frac{2A}{(h_b + R)^2} \quad (2.3.1.1)$$

ここで、 h_b は砕波水深、 R はうちあげ高である。

その上で、図-2.3.1.2 を用いて、 $\cot \beta$ と波形勾配 H_0/L_0 から海面からのうちあげ高 R と沖波波高 H_0 との比を求める。

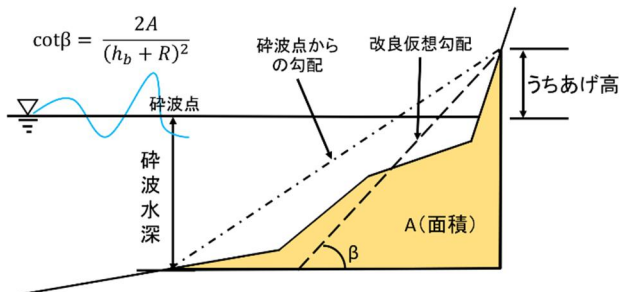


図-2.3.1.1 改良仮想勾配の概念図

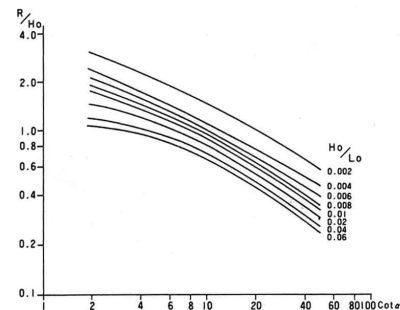


図-2.3.1.2 改良仮想勾配法の算定図

このように、うちあげ高の算定にあたっては、砕波水深の算定が必要である。不規則波の砕波水深の算定には、合田（1975a）の砕波指標がよく用いられる。海岸堤防の天端高の設定にあたっては、この砕波指標を用いて中村らの改良仮想勾配法によりうちあげ高を求めていることが多い。また、後述する加藤ら（2010）では、提案した海底勾配 1/100 程度のうちあげ高算定式について、合田の砕波指標を用いることで、観測値との対応関係が良いことを示している。

一方、玉田ら（2009）は、砕波水深の設定がうちあげ高を算定する上で非常に重要な要素の一つであることをふまえて、不規則波のうちあげと越波の統合算定モデル（IFORM）の研究（例えば、Mase et al. ;2013）において、砕波水深算定図を提案している。この算定図は、

砕波エネルギー減衰項を用いずに計算した有義波高に比べて砕波減衰項を入れた有義波高が 7%減少する地点を砕波点と定義したものである。なお、波高減少率を 7%と設定したのは、合田(1975a)の砕波指標と最もよく適合したためである。また、玉田ら(2015)では、この砕波水深算定図を定式化（次式）し、その後の打上げ・越波統合算定モデル（IFORM）の開発に使用している。

$$\begin{aligned}
 \frac{h_b}{H'_0} &= a_0 + a_1 \exp \left[- \left(\frac{\ln \{ (H'_0/L_0)/a_2 \}}{a_3} \right)^2 \right] \\
 a_0 &= 30.2470 - 27.3440 \exp \left[- \left(\frac{\ln \{ 22.9130i \}}{5.4509} \right)^2 \right] \\
 a_1 &= -9.9467 + 8.9213 \exp \left[- \left(\frac{\ln \{ 29.3880i \}}{3.1264} \right)^2 \right] \\
 a_2 &= 0.0302 - 0.0023 \exp \left[- \left(\frac{\ln \{ 25.9160i \}}{1.7065} \right)^2 \right] \\
 a_3 &= 6.1291 - 3.5001 \exp \left[- \left(\frac{\ln \{ 36.3660i \}}{1.3457} \right)^2 \right]
 \end{aligned} \tag{2.3.1.2}$$

ここで、 L_0 は沖波波長、 H'_0 は換算沖波波高、 h_b は砕波水深、 i は海底勾配であり、モデルの適用範囲は、 $0.002 < H'_0/L_0 < 0.07$ 、 $1/100 < i < 1/10$ である。

図-2.3.1.3 は、合田らの砕波水深算定図と玉田らの砕波水深算定図を比較したものである。海岸堤防の設計波の波形勾配は 0.01-0.04 程度であることが多いが、海底勾配が 1/30 程度より急な場合、砕波水深と沖波波高の比（ h_b/H_0 ）は同程度であることが分かる。一方、海底勾配が 1/100 程度の場合では、玉田らの砕波水深算定図が合田らの砕波水深算定図に比べて、 h_b/H_0 が大きくなるため、改良仮想勾配法では $\cot \beta$ が大きくなりうちあげ高が小さくなる傾向がある。

このように砕波水深の算定方法の違いにより、算出されるうちあげ高は変わることから、各種うちあげ高算定方法と対応関係が確認されている砕波水深の算定方法を用いる必要がある。

以上のことから、予測に用いるうちあげ高の算定にあたっては、海底地形や堤防形状の違いを考慮した改良仮想勾配法をベースとした算定方法とその算定方法に対応する砕波水深の算定方法を用いることとした。

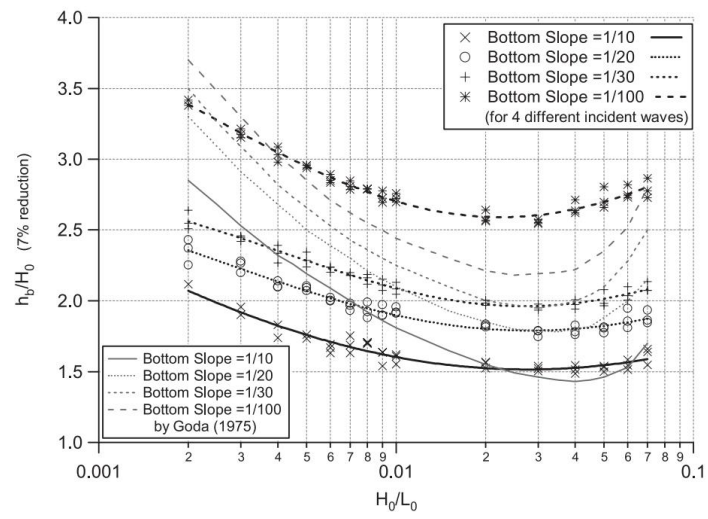


図-2.3.1.3 合田の砕波水深算定図と玉田らの砕波水深算定図の比較（玉田ら；2009）

2. 3. 2 算定方法の概要

(1) うちあげ高の算定方法

うちあげ高予測に用いる算定方法は、表-2.3.2.1 に示された方法から、対象地点の海底勾配に応じて選定している。いずれの式も、海岸堤防の設計において多用されている中村らの改良仮想勾配法と同様に、砕波点から遡上高までの平均的な勾配（仮想勾配）を用いて、潮位から波の遡上点までの高さを計算するものであり、複雑な海浜断面や堤防形状を考慮できる。また、表に示すように、算定方法の元となった実験が、規則波を対象としたものと不規則波を対象としたものに大別される。前節で述べたとおりそれぞれの算定方法に対応する砕波水深の算定方法を用いることが必要である。

本節では、前節で述べた表中の算定方法について説明する。

表-2.3.2.1 うちあげ高の算定方法

番号	算定方法	出典	対象	砕波水深の算定方法
①	改良仮想勾配法	中村ら（1972）	規則波	合田（1975a）
②	改良仮想勾配法1/30	加藤ら（2010、2020）		
③	改良仮想勾配法1/100	加藤ら（2010、2020）		
④	玉田らの式 $R_{2\%}$ 、 $R_{1/3}$	玉田ら（2009）	不規則波	玉田ら（2015）
⑤	改良IFORM $R_{2\%}$ 、 $R_{1/3}$	間瀬ら（2021）		

① 改良仮想勾配法

改良仮想勾配法は、Saville（1958）の仮想勾配法を緩勾配海岸（海底勾配が 1/30 程度より急）に適用できるよう、中村ら（1972）が改良したうちあげ高算定方法である。複雑な海浜断面や堤防形状を有する海岸への波のうちあげ高の評価に広く使われている。図-2.3.1.1 の定義に従い、改良仮想勾配 β を求め式（2.3.1.1）、 $\cot \beta$ と波形勾配 H_0/L_0 から海面からのうちあげ高 R と沖波波高 H_0 との比を図-2.3.1.2 で求める。

式（2.3.1.1）には、両辺に波のうちあげ高が含まれているため、うちあげ高を仮定して改良仮想勾配を計算し、求められた波のうちあげ高と仮定した波のうちあげ高が同じになるまで繰り返し計算を行う。図-2.3.1.2 の算定図は、海底勾配が 1/30 より急な複数の断面で実施した規則波のうちあげ高の実験結果から得られたものである。なお、改良仮想勾配で求まるうちあげ高は、不規則波を対象としたうちあげ高の $R_{50\%}$ （うちあげ高を入射波の 50% の波数で平均した値）に相当することが玉田ら（2009）により指摘されている。

② 改良仮想勾配法 1/30

改良仮想勾配法 1/30 は、中村らによる規則波のうちあげ実験における 7 つの海底断面形状（海底勾配 1/4～1/30）のうち、勾配 1/30 程度の 1 つの海底断面形状での結果から得た近似式であり、式(2.3.2.1)～(2.3.2.4)により表される。用いた実験結果と近似線を図-2.3.2.1 に示す。

$$R/H'_0 = 7.8356 \cot \beta^{-0.8123} \quad (H_o/L_o = 0.005 \sim 0.01) \quad (2.3.2.1)$$

$$R/H'_0 = 7.029 \cot \beta^{-0.859} \quad (H_o/L_o = 0.01 \sim 0.02) \quad (2.3.2.2)$$

$$R/H'_0 = 5.1775 \cot \beta^{-0.7893} \quad (H_o/L_o = 0.02 \sim 0.04) \quad (2.3.2.3)$$

$$R/H'_0 = 4.6587 \cot \beta^{-0.797} \quad (H_o/L_o = 0.04 \sim 0.06) \quad (2.3.2.4)$$

なお、近似式の算定に用いたデータはおおよそ $2 < \cot \beta < 30$ の範囲である。

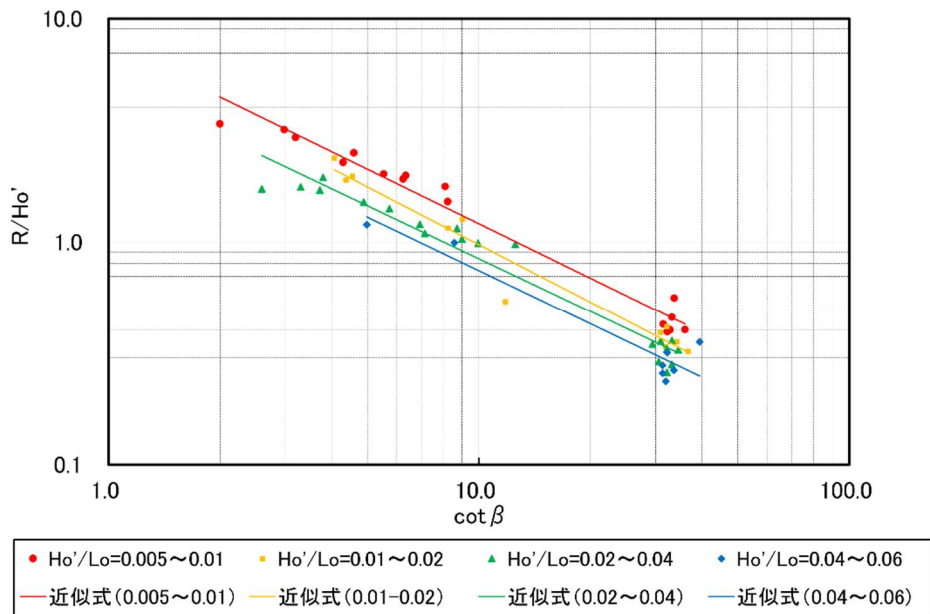


図-2.3.2.1 改良仮想勾配法1/30の算定線

③ 改良仮想勾配法 1/100

改良仮想勾配法 1/100 は、海底勾配 1/100 の海浜断面に設置した表法勾配 1/2 の堤防へのうちあげ高を数値波動水路（CADMAS-SURF）で計算した結果から得た近似式であり、式(2.3.2.5)～(2.3.2.9)により表される。用いた実験結果と近似線を図-2.3.2.2 に示す。その検討の詳細は、「5. 資料編 資料3」に記載する。

$$R/H'_0 = 10.056 \cot \beta^{-0.6788} \quad (H_0/L_0 = 0.006) \quad (2.3.2.5)$$

$$R/H'_0 = 6.8281 \cot \beta^{-0.5935} \quad (H_0/L_0 = 0.008) \quad (2.3.2.6)$$

$$R/H'_0 = 8.2797 \cot \beta^{-0.6839} \quad (H_0/L_0 = 0.01) \quad (2.3.2.7)$$

$$R/H'_0 = 12.061 \cot \beta^{-0.8908} \quad (H_0/L_0 = 0.02) \quad (2.3.2.8)$$

$$R/H'_0 = 16.151 \cot \beta^{-1.0146} \quad (H_0/L_0 = 0.04) \quad (2.3.2.9)$$

改良仮想勾配法1/100は、波形勾配別に算定式が整理されているため、任意の波形勾配の時には、波形勾配に近い2つの算定式を線形に内挿することで、うちあげ高を求めている。なお、近似式の算定に用いたデータはおおよそ $15 < \cot \beta < 60$ の範囲であるが、後述する3.

1. 5の精度検証では、表法先から碎波点の勾配が1/60程度より緩い場合に、 $10 < \cot \beta < 60$ で現地観測された $R_{50\%}$ に概ね対応することが確認されており、式(2.3.2.10)の関係から、 $R_{1/3}$ を求めることができることを示唆している。

$$R_{1/3}/R_{50\%} \approx 1.09 \quad (2.3.2.10)$$

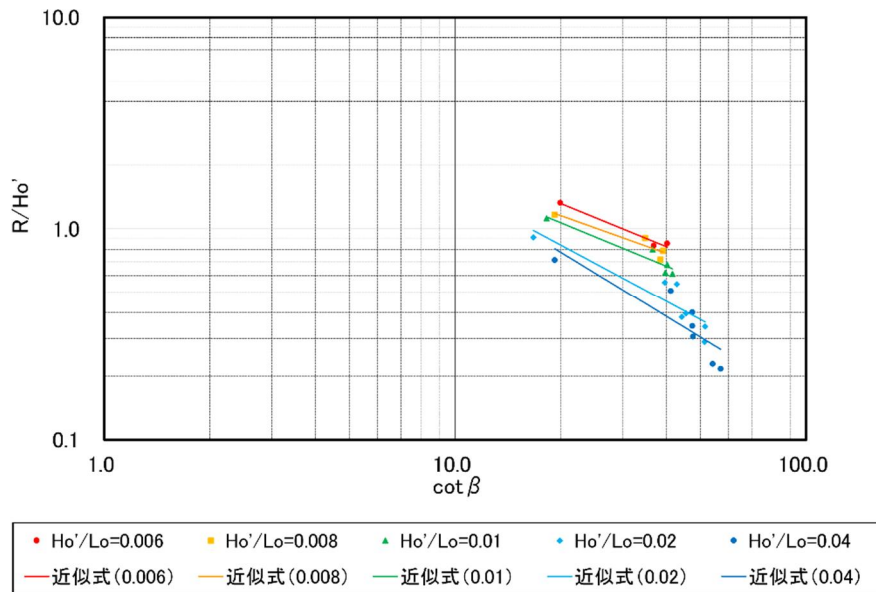


図-2.3.2.2 改良仮想勾配法 1/100 の算定線

④ 玉田らの式

玉田ら(2009)の式は、不規則波のうちあげ実験の結果から得た近似式であり、式(2.3.1.11)～(2.3.1.12)で表される。また、適用範囲は式(2.3.1.13)～(2.3.1.15)である。

$$R_{2\%}/H_0 = 2.99 - 2.73 \exp(-0.57 \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0}) \quad (2.3.2.11)$$

$$R_{1/3}/H_0 = 2.17 - 2.18 \exp(-0.70 \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0}) \quad (2.3.2.12)$$

$$0 < \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0} < 6.0 \quad (2.3.2.13)$$

$$0.009 < H_0/L_0 < 0.06 \quad (2.3.2.14)$$

$$-0.37 < h/H_0 < 0.53 \quad (2.3.2.15)$$

ここで、 $R_{2\%}$ は入射波数の2%の波数に対応する2%超過うちあげ高、 $R_{1/3}$ は入射波数の1/3の数だけうちあげ高を平均した1/3最大うちあげ高、 β は仮想勾配、 h は堤脚水深である。

⑤ 改良IFORM

IFORM (Integrated Formula of wave Overtopping and Runup Modeling) は、Mase et al. (2013) により提案された打上げ・越波統合算定モデルであり、日本全国の多くの海岸保全施設の設置条件に対応する汀線近傍における複合断面の海岸堤防・護岸を対象に開発されたものである。玉田ら (2015) 及び間瀬ら (2016) は、世界各国で実施された各種の越波実験および観測データが登録されているCLASHプロジェクトデータセットにより、堤脚水深が大きい傾斜護岸や直立及び傾斜複合断面護岸のうちあげ高・越波流量を精度よく算定できること等を確認している。さらに、由比ら (2019) は、IFORMで「うちあげ高が天端をわずかに上回る条件での越波流量」の過小評価傾向が確認されていることを踏まえ、同条件での越波流量の算定精度を向上させた改良IFORM (拡張型IFORM) を提案した。

この改良IFORMは、うちあげ高の代表値間の関係がレイリー分布に概ね従うことから、次式により、式 (2.3.2.11) に示したMase et al. (2013) の2%超過うちあげ高 $R_{2\%}$ から $R_{1/3}$ を求められることを示している。

$$2.15R_{1/3} \approx 1.54R_{2\%} \quad (2.3.2.16)$$

図-2.3.2.3は④、⑤で示した各算定式を横軸に surf similarity parameter ($\tan \beta / \sqrt{H_0/L_0}$) を取り、縦軸にうちあげ高と換算沖波波高の比として図化したものである。 $R_{1/3}$ は、どちらの算定式でも概ね同程度となることが確認できる。

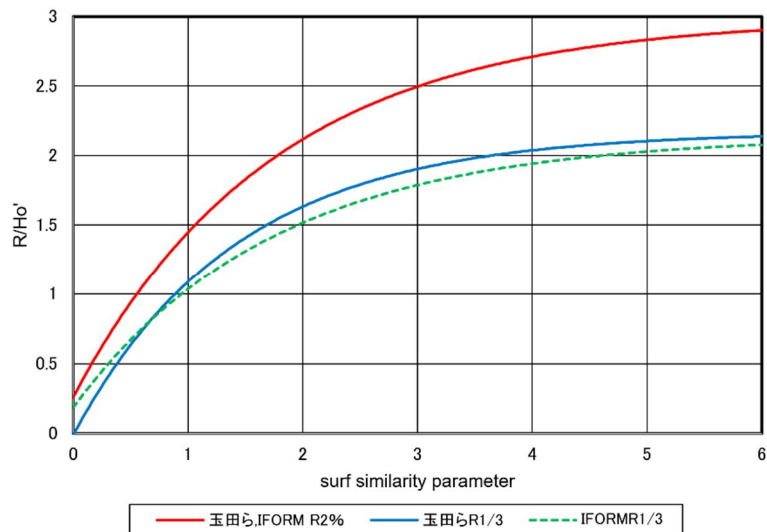


図-2.3.2.3 玉田ら、改良 IFORM の算定線の比較

間瀬ら（2021）は、改良 IFORM による越波流量の過小評価を確認している海底勾配が 1/50 の実験条件において、うちあげ高算定における砕波帯内での周期変化を考慮することで算定精度が向上することを示している。また、姫野ら（2025）は、周期変化を考慮することで、うちあげ高観測値に対する再現性が向上することを示している。

そのため、間瀬ら（2021）が提案した周期補正を考慮した改良 IFORM に従い、緩勾配海岸においては、法先水深（ h_t ）に応じて、図-2.3.2.4 のとおり周期変化を考慮することとした。具体的には、無次元水深（ h_t/H_0' ）が 1.0 となる位置から陸側に向けて線形的に周期が増加し、汀線位置で最大となるように設定している。また、間瀬ら（2021）によると、最大倍率は、海底勾配 1/50 の条件による検証で 1.5 倍となるように設定しているが、海底勾配が異なる場合には、この倍率を調整することが望ましいとしている。そのため、各地点の勾配に応じて、この最大倍率を予測地点の状況に応じて、調整できるよう設定している。

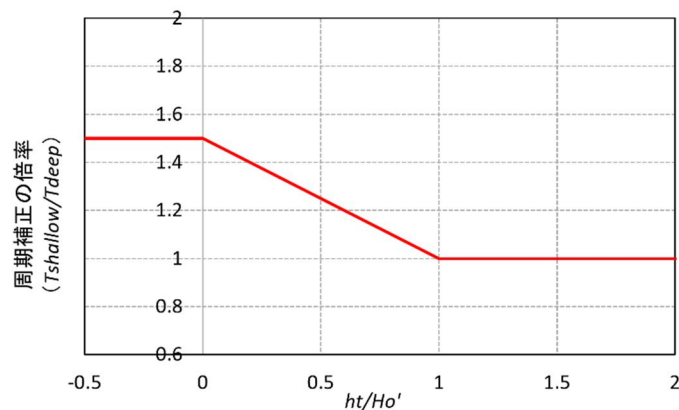


図-2.3.2.4 周期変化の考慮方法

(2) 越波流量の算定方法

海岸保全施設の技術上の基準・同解説(2018)においては、海岸堤防の設計波に対する必要高の算定にあたり、以下の二つの考え方を示している。

- i) 越波流量を求め、堤内地の利用状態に応じて設定した許容量以下におさえるために必要な高さを採用する
- ii) 波のうちあげ高を求め、越水の防止上必要な高さを採用する。

また、一般に堤防の設置位置による必要高の算定方法の選定は、次のとおりとしている。

- i) 設置位置が汀線よりも沖側にある場合には、越波流量から算定する。
- ii) 設置位置が汀線よりも陸側にある場合には、うちあげ高から算定する。

これは、うちあげ高の算定方法が砕波点からの岸側の幾何学的特徴を用いて求めることから、堤防等の設置水深が十分に深く、砕波が発生しない条件では、算定方法の適用範囲外にあることが理由の一つとして挙げられる。

以上のことから、堤防等の設置水深が十分に深いような地点で予測する場合には、越波流量を求める必要がある。そこで、本システムにおいては、うちあげ高と同様に、海岸保全施設の設計によく用いられ、うちあげ高の算定方法と同様に換算沖波波高を用いる①高山ら(1982)の手法もしくは、堤前波高を用いて越波流量を算定する②田中ら(2018)の手法を用いて越波流量を予測する。いずれの手法も合田の越波流量算定図(1975b)とよく整合することが確認されている。

基本的には、①高山らの手法を用いるが、防波堤の遮蔽域にあるような予測地点では、換算沖波波高を適切に求めることが難しいため、②田中らの手法を用いることとした。

2. 3. 3 算定方法の使い分け

前項で述べたとおり、うちあげ高や越波流量の算定方法は、複数提案されているため、予測したい地点の状況に応じて、算定方法を使い分けることが重要である。うちあげ高の算定方法の違いは、予測地点の海底勾配と波の不規則性の考慮の2つに大別される。

図-2.3.3.1 は、規則波を対象とした改良仮想勾配法、改良仮想勾配法 1/30、改良仮想勾配法 1/100 の波形勾配が 0.01 から 0.02 の場合の算定図を比較したものである。緩い海底勾配を対象とした算定図ほど、同じ改良仮想勾配に対して、無次元うちあげ高 (R/H_0') が大きくなる傾向が分かる。これは、山本ら (1999) で示されている改良仮想勾配法により得られたうちあげ高が砕波点から波の遡上点までの平均海底勾配が 1/20 より緩くなると、現地観測されたうちあげ高に対して過小となり、緩くなるにつれてその傾向が大きくなることと合致しており、各算定図がこのような特徴をよく表しているものと考えられる。

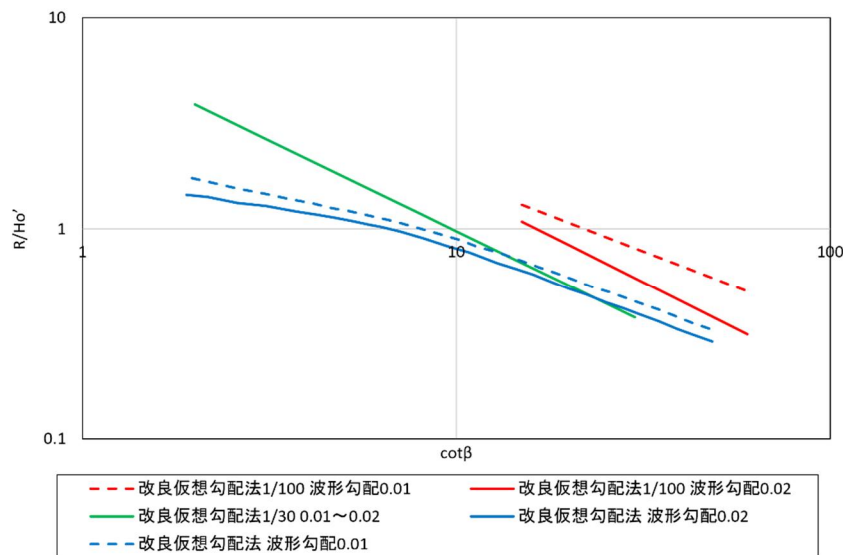


図-2.3.3.1 規則波を対象とした算定図の比較 (波形勾配 0.01-0.02)

また、玉田らは、波の不規則性を考慮したうちあげ高の算定式を提案し、改良仮想勾配法の算定図で求まるうちあげ高が不規則波の上位 50 % 平均うちあげ高 $R_{50\%}$ に相当することを示している。図-2.3.3.2 は、間瀬ら (2026) が改良仮想勾配法の実験結果から砕波帯相似パラメータを用いて再整理した規則波のうちあげ高と不規則波のうちあげ高 (改良 IFORM) を比較した結果である。規則波のうちあげ高が上位 1/3 平均うちあげ高より小さい傾向が確認でき、越波被害を適切に予測するためには、波の不規則性の考慮が重要であることを示唆している。

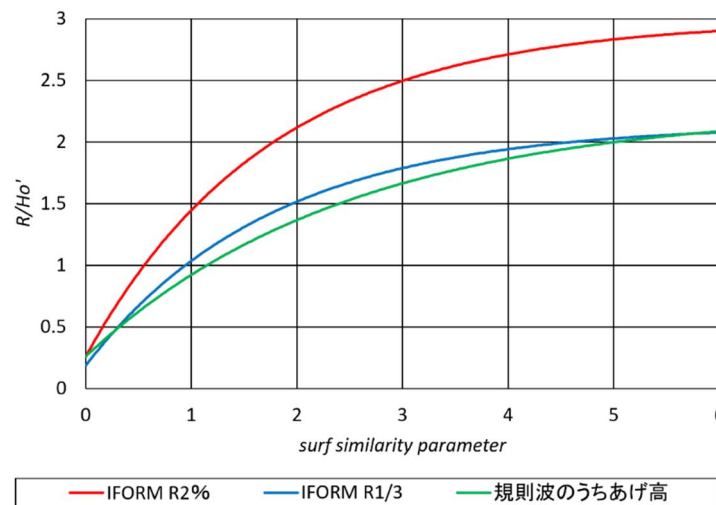


図-2.3.3.2 規則波のうちあげ高と不規則波のうちあげ高の比較

前項まで述べた各算定方法の成り立ちを踏まえた算定方法の使い分けを図-2.3.3.3 に整理する。うちあげ高と越波流量の算定方法は、前述したとおり堤前で碎波が発生するかによって使い分けるが、碎波水深は各地点の海底地形、潮位や波浪条件により異なるため、各予測地点に作用する潮位と波浪を踏まえて決定する必要がある。なお、うちあげ高の算定にあたり、どのようなうちあげ高代表値（規則波のうちあげ高、 $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ ）を用いるかは、現地での越波による被害実態に対して、天端高を越える予測を出すことができるかを踏まえて、決定する必要がある。そのため、3.2では、現地での越波による被害が得られた事例に対して、事例ごとにどのうちあげ高代表値が天端高を越えるか検討を実施した。その検証結果からは、表法先から碎波点までの勾配が急な場合、 $R_{1/3}$ のうちあげ高代表値を用いることで全事例の越波被害を再現できるが、海底勾配が緩い場合は、予測地点の背後地の状況も踏まえてより高い $R_{2\%}$ のうちあげ高代表値を用いることが必要である事例が確認されている。検証事例が得られた予測地点は限られており、さらなる事例検証を通じて、各予測地点の算定方法の使い分けの妥当性を引き続き検討し、必要に応じてこの使い分けを精査していく必要がある。

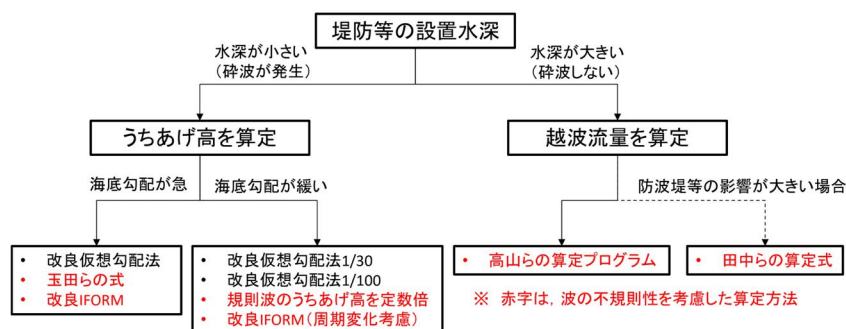


図-2.3.3.3 算定方法の使い分け

2. 3. 4 うちあげ高算定における消波施設の考慮

高潮対策として離岸堤や人工リーフ、消波工が設置されている海岸では、それらの消波効果を考慮して海岸堤防等の天端高が設定されていることが多い。そこで、それらの消波効果を考慮してうちあげ高を予測する方法を検討した。

(1) 離岸堤と人工リーフの考慮方法

図-2.3.4.1の左下部分のように、離岸堤の消波効果は離岸堤海側の入射波高 H_i と離岸堤透過後の波高 H_t の比である透過率 K_t' で、人工リーフの消波効果は換算沖波波高 H_0' と透過後の波高 H_t の比である波高伝達率 K_t で、それぞれ表されることが多い。波高伝達率は、人工リーフ海側での屈折係数 K_s を透過率に乗じた値となる。施設設計においては、離岸堤の透過率や人工リーフの波高伝達率は、離岸堤等の天端高や天端幅、設計波の波高や周期を考慮して定められている。うちあげ高予測は設計波と同程度の高波の際に精度が良いことが求められることから、波浪うちあげ高予測システムにおいては設計波に対する透過率や波高伝達率を用いることとし、図-2.3.4.1の右下部分のように、離岸堤等がない場合の換算沖波波高に透過率等を掛けた値をうちあげ高の予測に用いることとした。

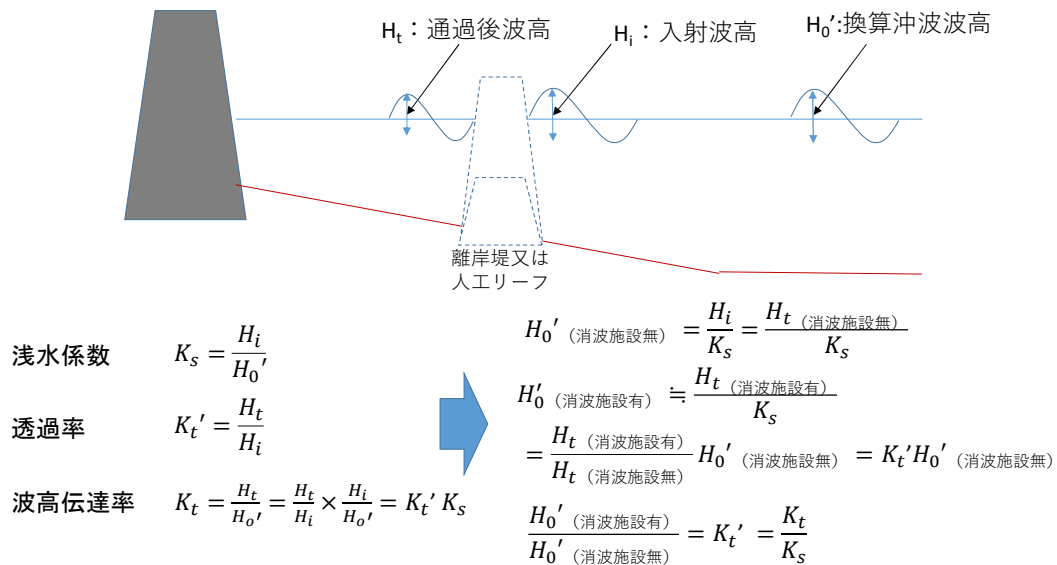


図-2.3.4.1 離岸堤・人工リーフの消波効果の考慮

(2) 消波工の考慮方法

施設設計においては、**図-2.3.4.2**のように、許容越波流量をもとに求められる消波工がある場合の必要天端高 h_c とない場合の必要天端高 h との比を消波工による越波流量の低減効果として考慮して、堤防等の天端高を設定することが多い。越波流量の算定にあたっては、この高山ら（1982）の天端高低減係数（換算天端高係数）を使用することができる。

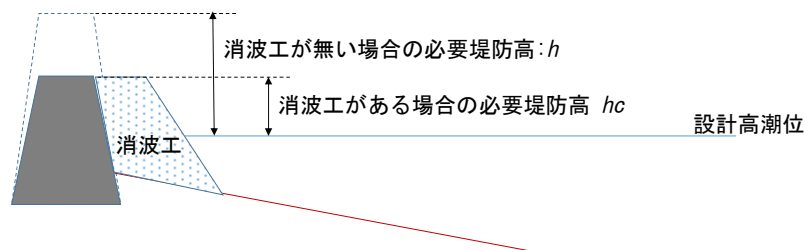


図-2.3.4.2 消波工の消波効果の考慮

一方、消波工のうちあげ高低減効果については、定量的な知見が乏しいため、検討を実施した（姫野ら；2024）。松下ら（2021）の消波工設置断面の水理模型実験で得られたうちあげ高と改良 IFORM で求まるうちあげ高を比較し、うちあげ高低減効果を評価した。その結果、**図-2.3.4.3**に示す消波工の被覆形式ごとに**表-2.3.4.1**のとおりうちあげ高の低減率を得た。法先水深波高比が1以下の条件では、波形勾配により低減率は変化しない傾向にあること、法先水深波高比が1以上では、波形勾配が緩くなるにつれて低減率が大きくなり消波工のうちあげ高低減効果が小さくなる傾向が示されている。この知見を元に、消波工がない条件で求めたうちあげ高に低減率を乗じることで、うちあげ高を予測することとした。

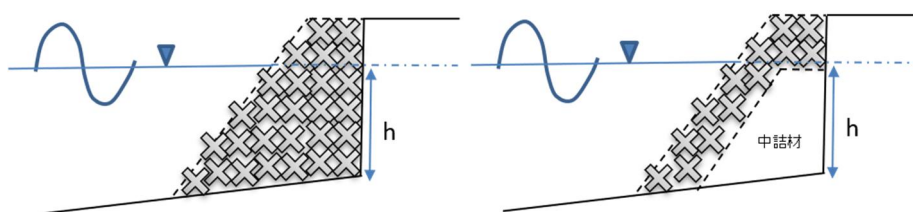


図-2.3.4.3 全断面被覆（左）と2層断面被覆（右）

表-2.3.4.1 うちあげ高の低減率

法先水深波高比		$0.57 \leq h/H_0' \leq 1.00$	$1.00 < h/H_0' \leq 2.00$			
波形勾配 (H_0'/L_0)		0.012-0.062	0.012-0.013	0.022-0.024	0.035-0.036	0.062
全断面被覆 (FL)	最大値	0.62	0.8	0.67	0.57	0.5
	平均値	0.55	0.7	0.58	0.51	0.46
2層断面被覆 (TL)	最大値	0.55	0.79	0.64	0.52	0.46
	平均値	0.49	0.69	0.57	0.48	0.44

2. 4 まとめ

本章ではうちあげ高の予測方法を整理した。概要は、以下に示すとおりである。

- 気象庁の潮位・波浪予測値を入力値として、対象地点の地形や施設形状を考慮してうちあげ高をリアルタイムで予測するシステムの全体構成を整理した。
- うちあげ高予測に使用する波浪の要件を整理した上で、沿岸地形による浅海効果を考慮して波浪を推算する方法を2通り整理した。また、波浪予測について、観測値による補正手法を整理した。
- 予測に用いるうちあげ高の要件を整理し、その算定方法を示した。また、算定方法の使い分けを堤防等の設置位置や海底勾配から整理した。
- うちあげ高算定にあたり、離岸堤、人工リーフと消波工それぞれについて、消波施設の考慮方法を整理した。

3. うちあげ高予測の精度検証

うちあげ高予測に用いている算定式は海岸保全施設の設計にも使われている信頼性があるものであるが、うちあげ高の現地観測がほとんど行われていないことから、うちあげ高予測の精度を現地で確認することが重要である。

そのため、国土技術政策総合研究所では、うちあげ高の現地観測（加藤ら；2011、福原ら；2019、福原ら；2020）等から得られた観測値、越波による被害事例、遡上痕跡に対して、システムの予測精度の検証を実施し、土木学会論文集等でその成果を発表してきた（加藤ら；2010、加藤ら；2020、Himeno et al.；2025、姫野ら；2025）。

まず、3. 1 では、うちあげ高予測システムの精度向上の過程でその都度得られた検証結果を示す。図-2.3.3.3 の算定方法の使い分けを前提にしながら、精度検証の結果を踏まえて、算定方法の改良、消波施設の考慮、入力に用いる潮位・波浪予測値の改良等を実施したものである。このため、これまでの知見を踏まえて改良した新たな高潮の予報・警報に用いる波浪うちあげ高予測システムとは異なる条件での検証結果を多く含んでいる。

そこで、3. 2 では、前節での検証結果を踏まえて、各算定方法の現地観測値との対応の定量的な理解のもと、新たな高潮の予報・警報に用いる前章で述べた波浪うちあげ高予測システムの予測手法に対して、海岸管理者等の協力を得て収集した越波により被害があった事例及び近年高潮・高波の被害をもたらした調査から遡上痕跡が得られた事例について、再整理した精度検証の内容をまとめる。

以上の検証においては、観測値や痕跡値に対する定量的な検証のほか、越波被害を再現できるかという主に見逃しの観点での検証を実施してきた。そこで、3. 3 では、うちあげ高予測を高潮の予警報に見込むことによる効果に関する検証結果や見逃し・空振りを評価した結果を示す。

3. 1 システムの開発過程で実施した精度検証

本節では、うちあげ高予測システムの開発の過程で実施した精度検証事例を紹介する。精度検証の対象とした台風と海域、検証方法を表-3.1.1 に示す。なお、うちあげ高予測の精度は、用いる潮位・波浪予測値に依存するため、表-3.1.1 に示すとおり、潮位・波浪予測値と観測値を比較するとともに、一部の定量的な検証では、観測値を用いた検証や予測値を観測値で補正した検証を実施している。

表-3.1.1 うちあげ高予測の精度検証の事例

節	対象擾乱	対象海域	検証項目	潮位・波浪 予測値の評 価	検証対象の 算定方法
3. 1. 1	平成 21 年 (2009 年) 台風第 18 号	伊勢湾	越波の有無に関する情報との対比	潮位観測値と比較	規則波の算定方法
			ビデオ観測値との比較	潮位・波浪観測値を用いて検証	規則波の算定方法 不規則波の算定方法 ($R_{1/3}$)
3. 1. 2	平成 30 年 (2018 年) 台風第 21 号	大阪湾	痕跡高との比較	潮位、波浪観測値と比較	規則波の算定方法
			越波事例に対する検証		
3. 1. 3	令和元年 (2019 年) 東日本台風 (台風第 19 号)	駿河湾 相模湾	容量式波高計、痕跡高との比較	潮位観測値と比較	規則波の算定方法 不規則波の算定方法 ($R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$)
3. 1. 4	平成 28 年 (2016 年) ~ 令和 5 年 (2023 年) の台風・低気圧	全国	越波被害情報との対比	—	規則波の算定方法
3. 1. 5	令和 5 年 (2023 年) ~ 令和 6 年 (2024 年) の高波浪時 (緩勾配海岸)	胆振海岸 宮崎海岸	ビデオ観測値との比較	潮位・波浪予測値を観測値で補正して検証	規則波の算定方法 不規則波の算定方法 ($R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$)

3. 1. 1 平成 21 年（2009 年）台風第 18 号を対象とした定量的検証

（1）概要

平成 21 年（2009 年）10 月に来襲した台風第 18 号は、図-3.1.1.1 のように、同月 8 日 5 時過ぎに愛知県の知多半島付近に上陸した後、東海地方から東北地方に進んだ。この台風の接近に際し、同月 7 日 21 時 51 分に愛知県内に高潮警報が発表され、伊勢湾では 1m 以上の最大潮位偏差が観測された。高潮は特に三河湾の湾奥で大きく、三河港で最大潮位偏差 2.6m を観測し、田原市内の家屋浸水や三河港での輸出自動車の冠水などが生じた（青木ら；2010）。

そこで、台風第 18 号接近時におけるうちあげ高の予測値が海岸堤防の天端高を超える予測となった愛知県内の海岸を対象に、うちあげ高予測と越波の実態との比較を行った。また、三重県内の伊勢湾西南海岸にて台風第 18 号接近時にうちあげ高の観測を行い、うちあげ高予測に用いるうちあげ高算定式の妥当性を検証した。

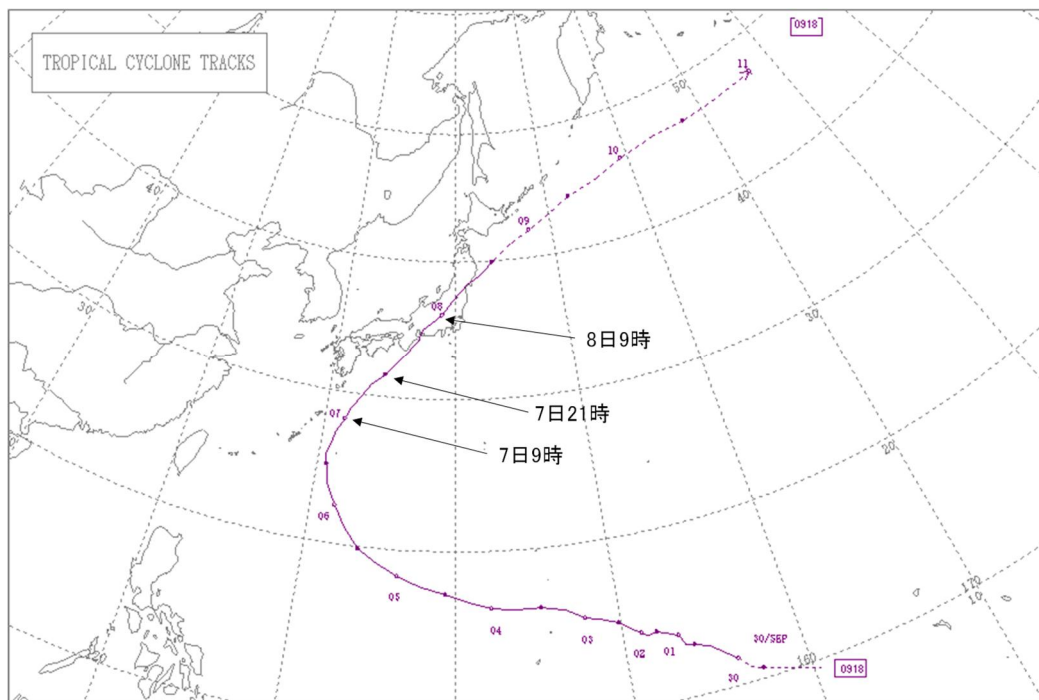


図-3.1.1.1 平成 21 年（2009 年）台風第 18 号の経路（気象庁台風経路図に加筆）

図-3.1.1.2 のように、8 日 0 時の台風の進路予報に対し、実際の台風の位置は、3 時には「予報円中心コース」の近くであり、3～6 時には「最も右寄りのコース」に近づいたものの、6 時には「予報円中心コース」と「最も遅いコース」の中間に、9 時には「最も右寄りのコース」より右側にあった。

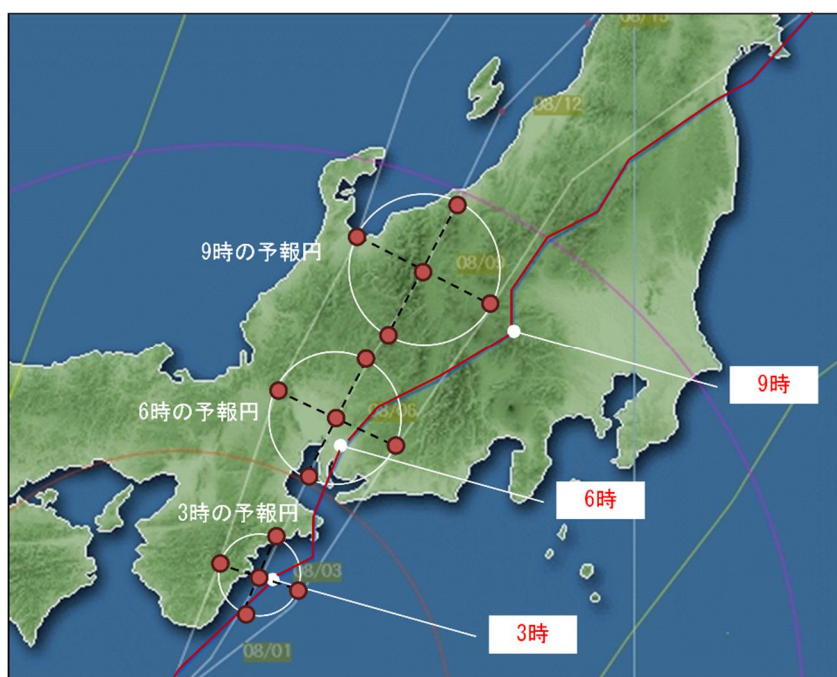


図-3.1.1.2 10月8日0時の台風の進路予報円（白円）、台風5コースの位置（赤円）と実際の経路（赤線）

（2）愛知県内の海岸を対象としたうちあげ高予測の検証

図-3.1.1.3は、台風第18号上陸前の5時点（10月7日3時、9時、15時、21時、8日3時）について、5つの台風コース（図-2.1.2）による各地点のうちあげ高予測の幅を求め、その5時点の平均値を算出したものである。台風コースによる各地点のうちあげ高予測の幅の5時点平均値は、田原海岸野田地区で4mを超える一方、南知多海岸師崎地区では1m程度であり、8海岸全体の平均値で2.4mであった。また、各地点における台風コースによるうちあげ高予測の幅の5時点平均値と天端高との比の5時点平均値は、田原海岸野田地区で1と大きかったが、それ以外の地点については0.6倍程度以下であった（図-3.1.1.4）。

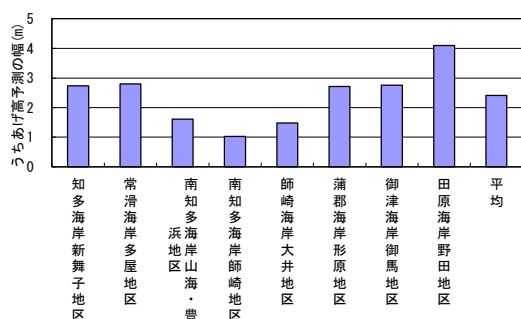


図-3.1.1.3 うちあげ高予測の幅（5時点の平均）

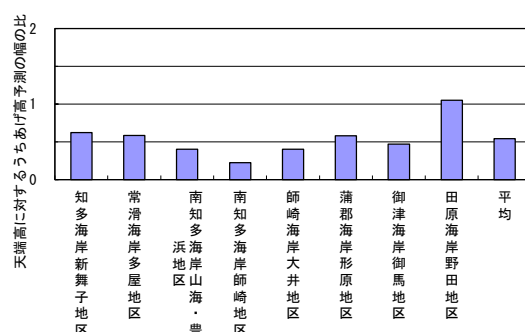


図-3.1.1.4 各海岸の天端高に対するうちあげ高予測の幅の比（5時点の平均）

図-3.1.1.5 は、各地点における台風コースによるうちあげ高予測の幅と天端高との比の時間変化を示している。今回のケースでは、台風が接近しても、うちあげ高予測の幅が小さくなっていない。その理由として、図-3.1.1.2 のように、5 つの台風コースの中に、対象海岸の西側を通るコースと東側を通るコースが含まれていたことが考えられる。

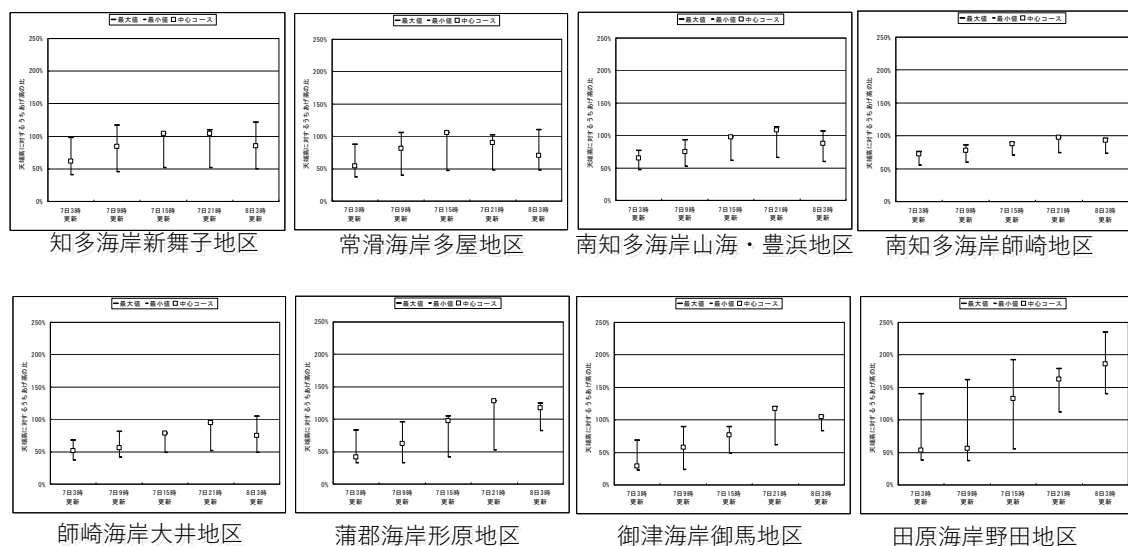


図-3.1.1.5 各地区の天端高に対するうちあげ高予測の幅の比

図-3.1.1.6 は、各予測時点において、うちあげ高が天端高を上回る予測になっていた海岸を示している。7日9時時点では、知多海岸、常滑海岸、田原海岸で、うちあげ高が天端高を上回る予測になっていた。7日15時時点では、前述の3海岸のほか蒲郡海岸でも、うちあげ高が天端高を上回る予測になっていた。7日21時時点では南知多海岸と御津海岸でも、8日3時時点ではさらに師崎海岸でも、うちあげ高が天端高を上回る予測になった。これらの海岸のうち、実際に越波が確認されたのは南知多海岸と田原海岸だけであるが、両海岸での越波は7日21時（台風上陸の8時間前）には予測されていた。

図-3.1.1.7～14 は、各予測地点における台風コース別のうちあげ高予測の更新状況を示している。

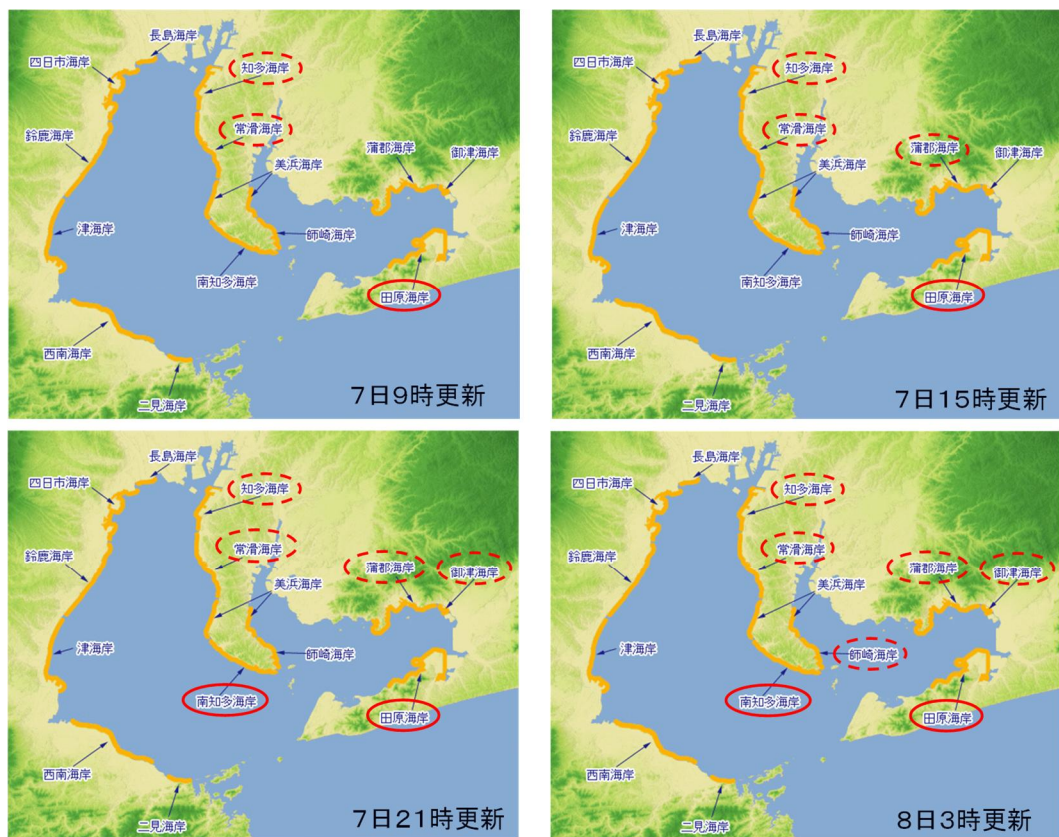


図-3.1.1.6 うちあげ高予測が天端高を越えた海岸
(実線：越波が確認された海岸、破線：越波が確認されなかった海岸)

1) 知多海岸新舞子地区

知多海岸新舞子地区では、7日9時更新以降、8日朝にうちあげ高が天端高を越える予測となっていたが、越波は確認されなかった。うちあげ高が天端高を越えるのは、7日21時更新の予測では中心コースなど3コースあったが、8日3時更新の予測では最も左寄りのコースのみになっていた。8日3時更新の予測における中心コースを台風は通過したため、予測通り越波しなかったと考えられる。

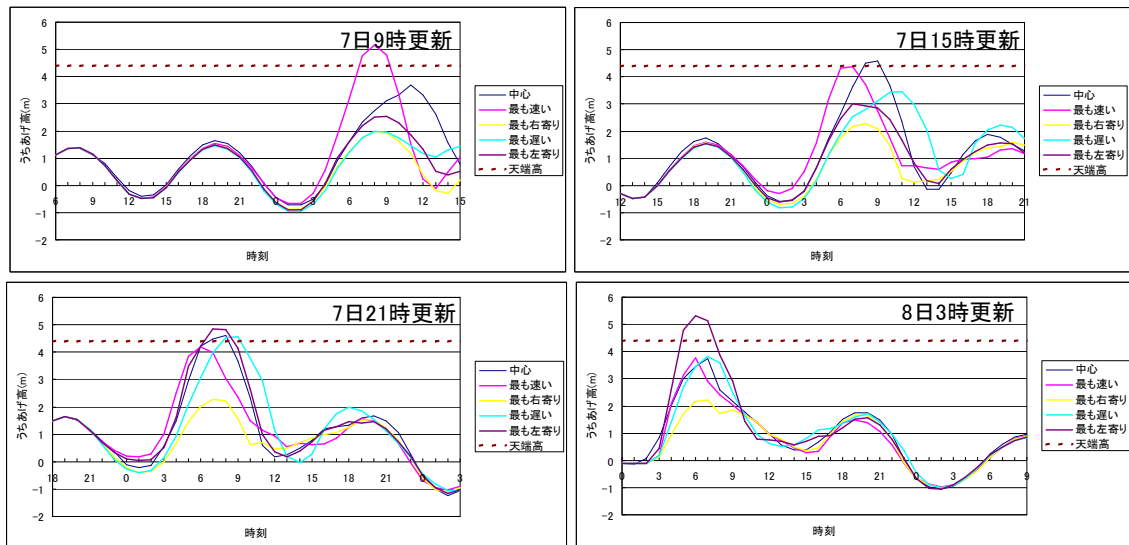


図-3.1.1.7 うちあげ高予測（知多海岸新舞子地区）

2) 常滑海岸多屋地区

常滑海岸多屋地区では、7日9時更新以降、8日朝にうちあげ高が天端高を越える予測となっていたが、越波は確認されなかった。うちあげ高が天端高を越えるのは、7日15時更新の予測では中心コースのみだったが、7日21時及び8日3時更新の予測では最も左寄りのコースのみになっていた。8日3時更新の予測における中心コースを台風は通過したため、予測通り越波しなかったと考えられる。

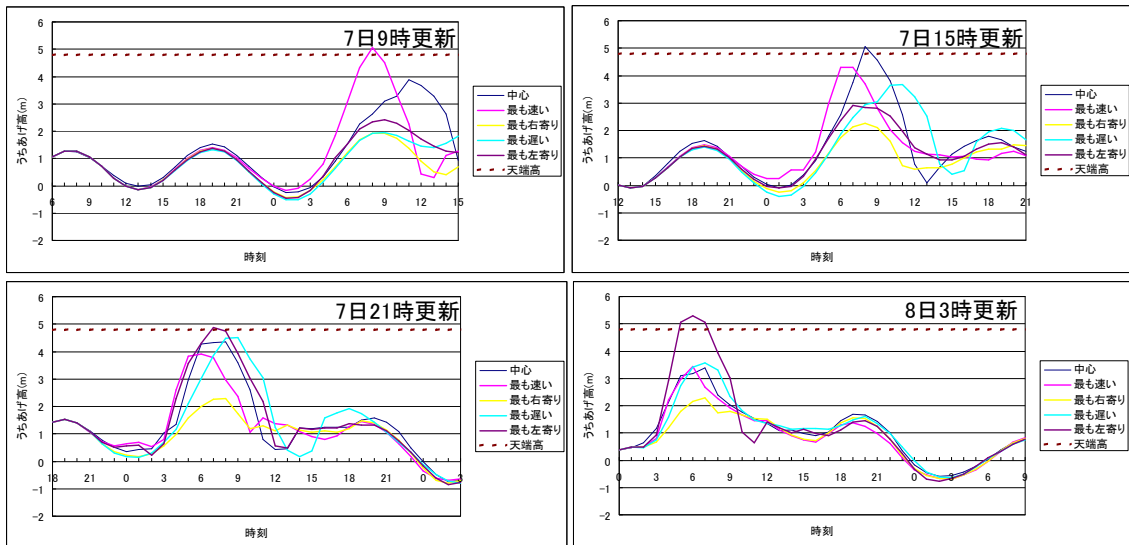


図-3.1.1.8 うちあげ高予測（常滑海岸多屋地区）

3) 南知多海岸山海・豊浜地区

南知多海岸山海・豊浜地区では、7日21時更新以降、8日朝にうちあげ高が天端高を越える予測となり、4～8時に越波が確認された。うちあげ高が天端高を越えるのは、7日21時更新の予測では中心コースと最も遅いコースだったが、8日3時更新の予測では最も左寄りのコースのみになっていた。8日3時更新の予測における中心コース（うちあげ高が天端高を越えない予測）を台風は通過したが、有義波を上回る波が越波したと考えられる。

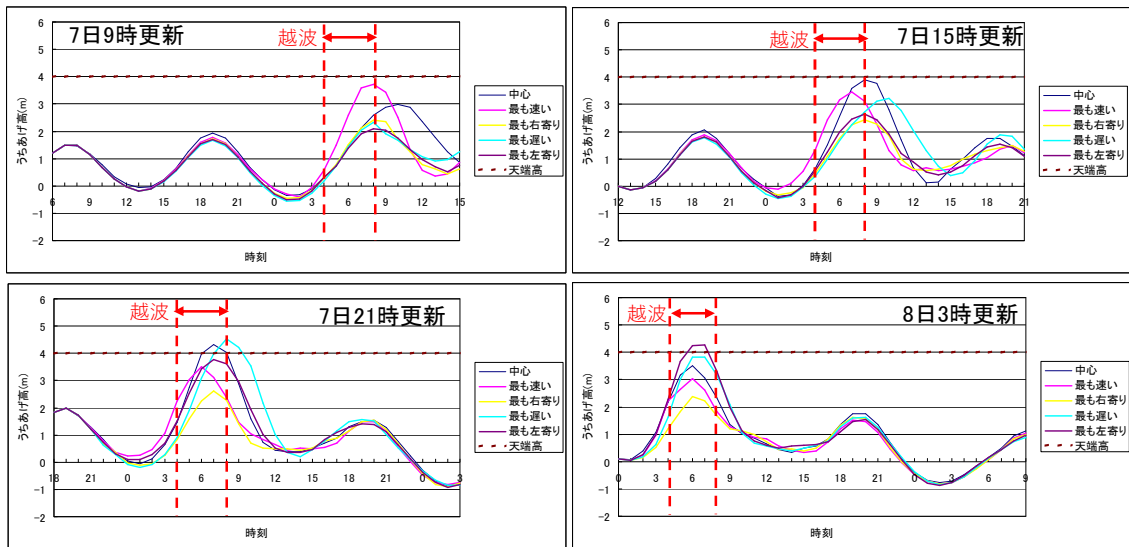


図-3.1.1.9 うちあげ高予測（南知多海岸山海・豊浜地区）

4) 南知多海岸師崎地区

南知多海岸師崎地区では、うちあげ高が天端高を越える予測ではなかったが、4～8 時に越波が確認された。7 日 21 時更新の予測では天端高の 0.13m 下まで、8 日 3 時更新の予測では天端高の 0.32m 下まで、うちあげ高が上がる予測となっていた(いずれも中心コース)。予測されるうちあげ高は有義波のうちあげ高なので、有義波を上回る波が越波したと考えられる。

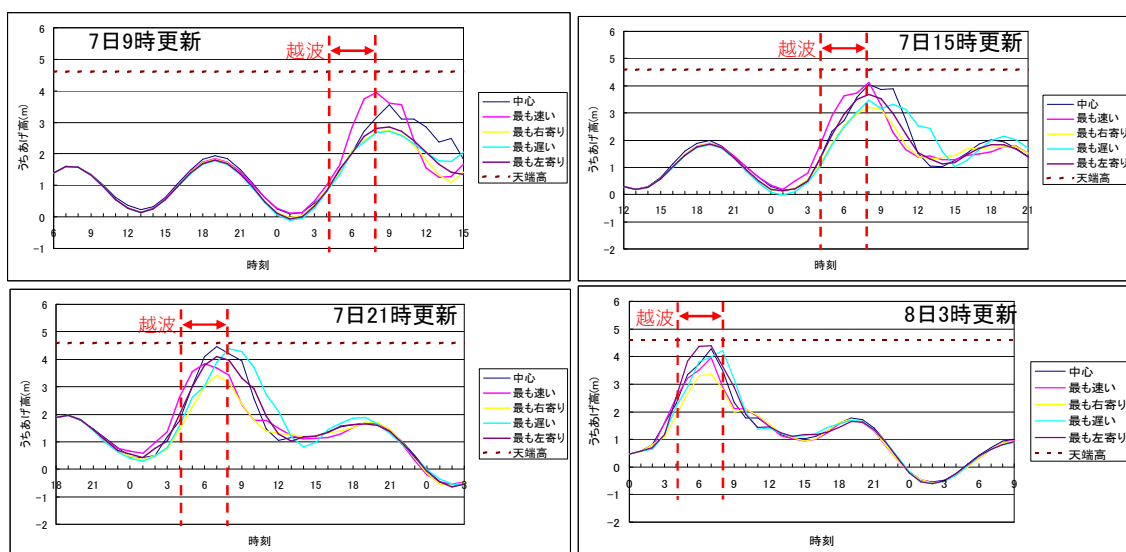


図-3.1.1.10 うちあげ高予測 (南知多海岸師崎地区)

5) 師崎海岸大井地区

師崎海岸大井地区では、8日3時更新の予測では、最も左寄りのコースのみが、うちあげ高が天端高を越える予測となっていたが、越波は確認されなかった。8日3時更新の予測における中心コース（うちあげ高予測が天端高を越えないコース）を台風が通過したため、越波が確認されなかったと考えられる。

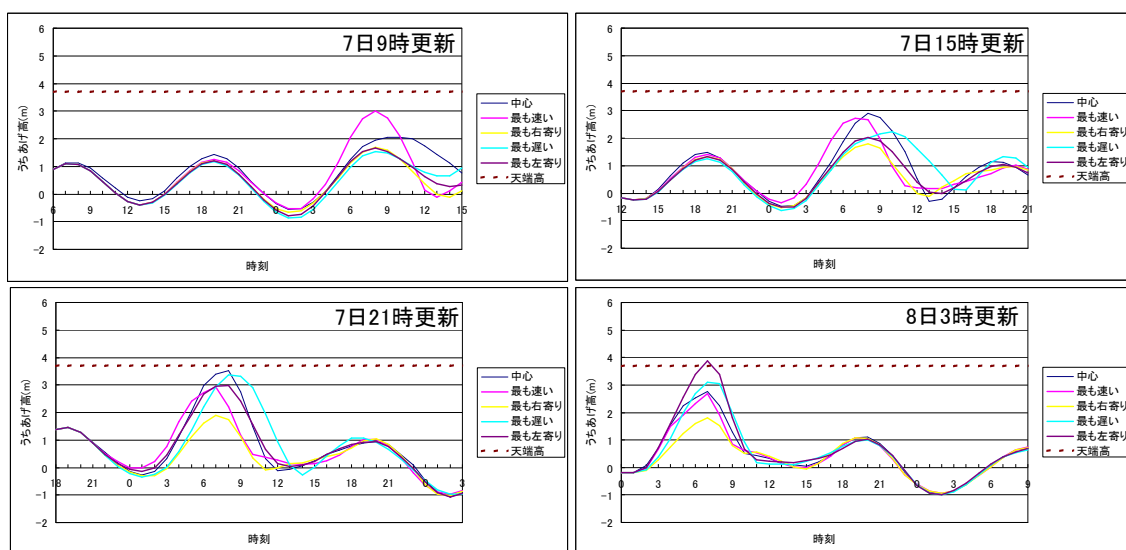


図-3.1.1.11 うちあげ高予測（師崎海岸大井地区）

6) 蒲郡海岸形原地区

蒲郡海岸形原地区では、7日15時更新以降、うちあげ高が天端高を越える予測となっていたが、越波は確認されなかった。うちあげ高が天端高を越えるのは、7日21時更新の予測では中心コースと最も速いコースだけだったが、8日3時更新の予測では最も右寄りのコース以外の全てのコースだった。8日3時更新の予測における中心コース（うちあげ高予測が天端高を越えるコース）を台風が通過したにも関わらず越波しなかった要因の一つとして、うちあげ高計算に用いた予測潮位が過大（予測潮位最大値 3.72m、近傍の観測潮位最大値 1.39m）であったことがあり、観測潮位と予測潮位の差（2.5m 以上）が天端高とうちあげ高の予測値の差（1m 程度）より小さかったことから、主たる要因と考えられる。

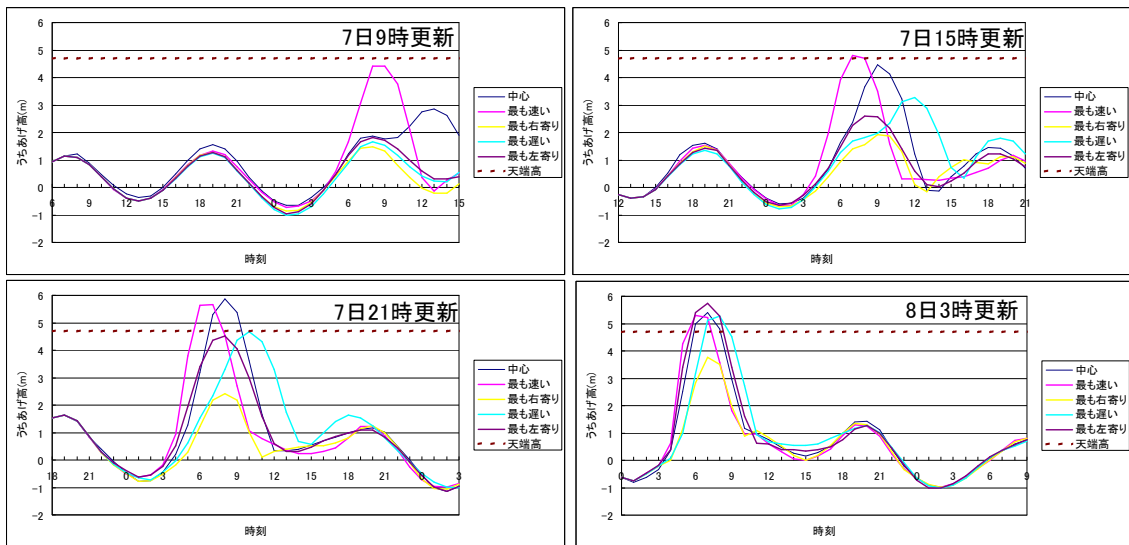


図-3.1.1.12 うちあげ高予測（蒲郡海岸形原地区）

7) 御津海岸御馬地区

御津海岸御馬地区では、7日21時更新以降、うちあげ高が天端高を越える予測となっていたが、越波は確認されなかった。うちあげ高が天端高を越えるのは、7日21時更新の予測では中心コースと最も速いコースだけだったが、8日3時更新の予測では最も右寄りのコース以外の全てのコースだった。8日3時更新の予測における中心コース（うちあげ高予測が天端高を越えるコース）を台風が通過したにも関わらず越波しなかった要因の一つとして、うちあげ高計算に用いた潮位予測が過大（予測潮位最大値 4.33m、近傍の観測潮位最大値 3.15m）であったことがあり、観測潮位と予測潮位の差（1.2m 程度）が天端高とうちあげ高の予測値の差（1m 程度）より小さかったことから、主たる要因と考えられる。

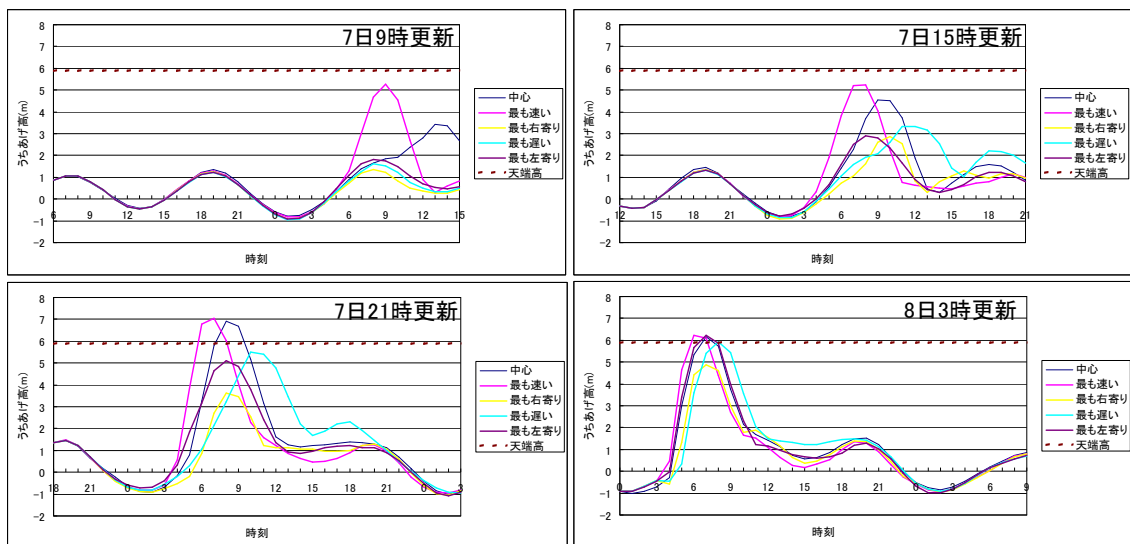


図-3.1.1.13 うちあげ高予測（御津海岸御馬地区）

8) 田原海岸野田地区

田原海岸野田地区では、7日3時更新以降、うちあげ高が天端高を越える予測となり、越波が8日6～7時に確認された。うちあげ高が天端高を越えるのは、7日15時更新の予測では中心コースと最も速いコースのみで、7日21時更新の予測と8日3時更新の予測では全てのコースだった。越波の発生は予測通りであったが、うちあげ高予測が9mに達するなど天端高を5m程度越えるような過大な値となっていた。8日3時更新の予測では、うちあげ高予測に用いた予測潮位の最大値は3.25m、予測波高の最大値は1.55mであり、予測潮位からのうちあげ高（うちあげ高－予測潮位）は約6mと予測波高に比べて異常に高かった。このように過大予測の一因としてうちあげ高算定式が考えられることから、この地区に適用されていたうちあげ高算定式（改良仮想勾配法 1/30）は他の算定式に切り替える必要があると考えられる。

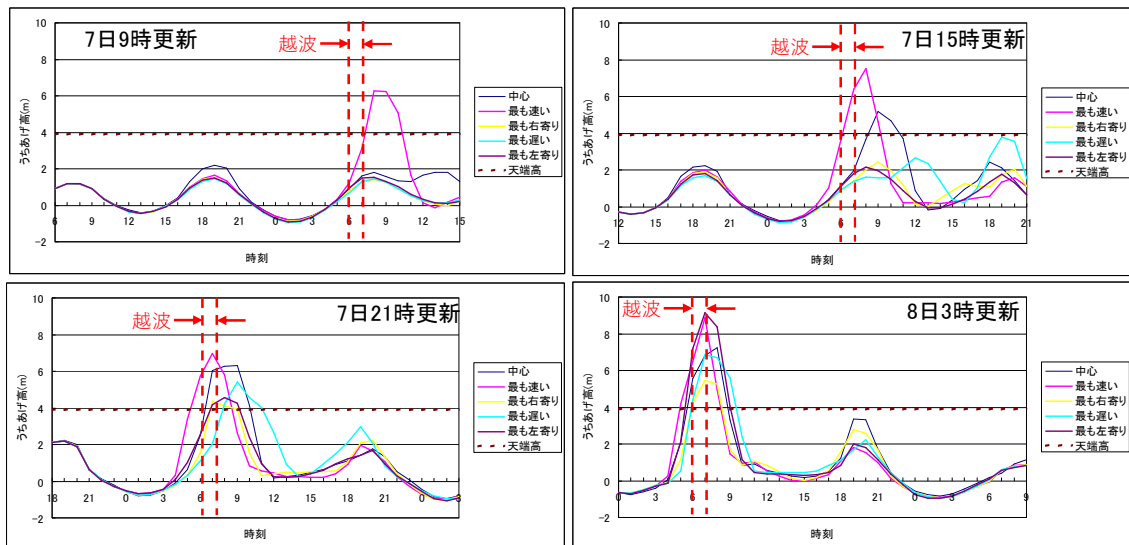


図-3.1.1.14 うちあげ高予測（田原海岸野田地区）

9) まとめ

以上のように、うちあげ高予測が実態と異なっていた2地点のうち、うちあげ高が天端高を越える予測だったが越波しなかった蒲郡海岸形原地区及び御津海岸御馬地区は潮位予測に問題があったことが明らかになった。また、予測通り越波したがうちあげ高予測が明らかに過大だった田原海岸野田地区については、うちあげ高算定式の選定に一因があったことが明らかになった。

(3) 伊勢湾西南海岸を対象としたうちあげ高算定式の検証

台風第 18 号の経路の西側に位置する伊勢湾西南海岸（図-3.1.1.15）において、平成 21 年（2009 年）10 月 8 日 7～17 時の毎正時にうちあげ高観測を実施した。図-3.1.1.16 のように、近傍の浜田観測所（水深 20m）では、4 時に有義波高 4.83m を観測したが、うちあげ高の観測期間中については、波高は 1.6m 以下、周期は 5 秒以下であった。また、波向は、9 時が ESE で、それ以外の時刻では N～ENE であった。なお、観測期間中の津松阪港の潮位は、8 時が最高（T.P. +0.88m）で、14 時が最低（T.P. -0.47m）であった。

観測及び計算に必要な各測線の地形データは、あらかじめ深淺測量及び海浜測量で取得した。伊勢湾西南海岸では、観測地点の汀線付近には緩傾斜堤防が設置されており（写真-3.1.1.1）、その法先（T.P. +1.8m）から水深 5m までの勾配は 1/300 程度である。

うちあげ高の観測は、以下のような手順で行った。

- ・毎正時 20 分間のうちあげをビデオカメラで撮影し、0.5 秒間隔で静止画像から堤防法面上の水面高を読み取る。
- ・20 分間の水面高データからゼロアップクロス法により各波の最高到達高さを求め、20 分間における上位 1/3 平均値を算出する。ここで、上位 1/3 平均値の算出に用いる波数は、入射する波の数（近傍の波浪観測地点において観測された波数）を用いた。
- ・算出した上位 1/3 平均値から観測潮位を差し引いた値を各時刻のうちあげ高（ $R_{1/3}$ ）とする。

うちあげ高の計算は、表-3.1.1.1 に示す方法のうち、各海岸の海底勾配等に適したもので行った。玉田ら(2009)は、砕波水深の設定がうちあげ高を算定する上で非常に重要な要素の一つであることをふまえて、不規則波の砕波水深算定図を提案している。また、不規則波の砕波水深算定には、合田(1975a)の砕波指標がよく使われている。そこで、玉田らの砕波水深算定図とうちあげ高の各算定式と組み合わせて比較することとし、改良仮想勾配法と改良仮想勾配法 1/100 については合田の砕波指標を組み合わせるケースも設定した。

うちあげ高の計算では、各測線の地形データ、うちあげ高観測地点近傍での潮位観測値、近傍での波浪観測値から算定した換算沖波波高を用いた。

うちあげ高の観測値と計算値を図-3.1.1.17 に示す。合田の砕波水深算定法と改良仮想勾配法 1/100 の組み合わせによる計算値が最も観測値に近い時間帯が多かった。また、改良仮想勾配法 1/100 や改良仮想勾配法では、砕波指標による計算値の差が見られ、合田の砕波指標の方が玉田らの砕波水深算定図よりうちあげ高が大きかった。

以上のことから、海底勾配が 1/300 程度の伊勢湾西南海岸では、改良仮想勾配法 1/100 を適用するのが最適であることがわかった。

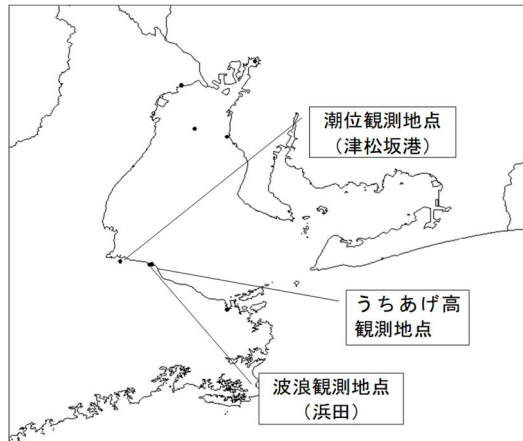


図-3.1.1.15 うちあげ高と波浪・潮位の観測地点

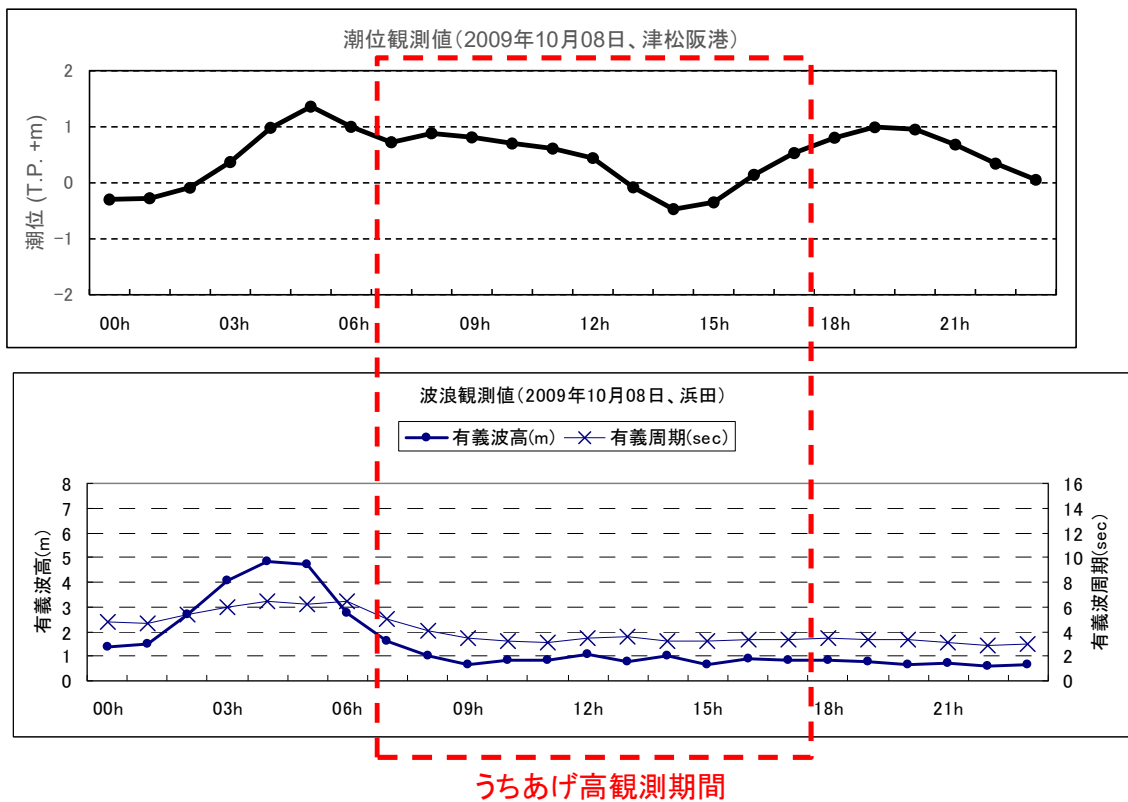


図-3.1.1.16 潮位観測値 (津松坂港) 及び波浪観測値 (浜田)

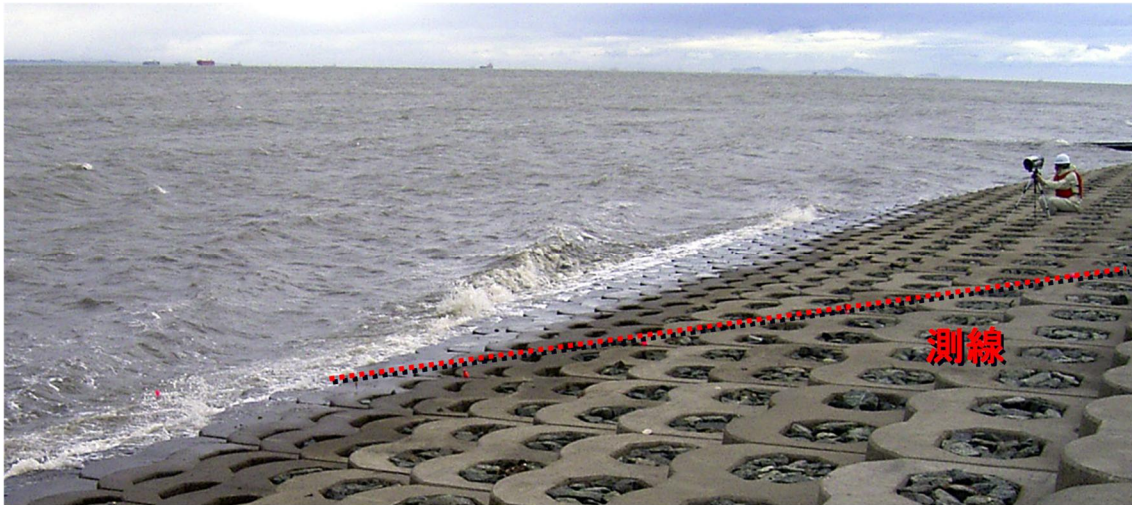


写真-3.1.1.1 伊勢湾西南海岸でのうちあげ高観測

表-3.1.1.1 うちあげ高の算定方法

算定方法		①	②	③	④	⑤	⑥
碎波水深	合田	○	○				
	玉田ら			○	○	○	○
うちあげ高	改良仮想勾配法	○		○			
	改良仮想勾配法 (1/100)		○		○		
	玉田ら ($R_{1/3}$)					○	
	Mase ($R_{1/3}$)						○

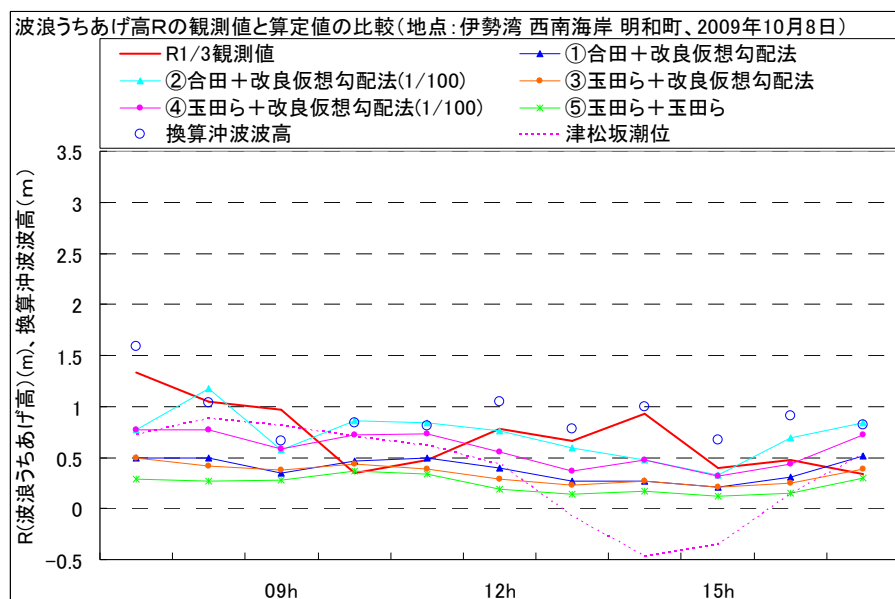


図-3.1.1.17 各算定式による計算結果と観測値の比較

3. 1. 2 平成 30 年（2018 年）台風第 21 号を対象とした定量的検証

（1）概要

平成 30 年（2018 年）台風第 21 号は、図-3.1.2.1 のとおり 8 月 28 日に発生し、徳島県に 950hPa で上陸、その後淡路島、兵庫県神戸市を通過した。台風第 21 号は、上陸時の移動速度も速く、近畿を中心とした広い範囲に、近年にない強風及び高潮・高波をもたらした。特に大阪湾においては、大阪の検潮所で T.P.+3.29m を記録し、観測史上最高の潮位となった。

大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会（2019）によると、特に、南芦屋浜背後に位置する兵庫県芦屋市涼風町において、9 月 4 日 14～15 時頃、越波により浸水被害が発生した。また、2018 年台風第 21 号 Jebi 沿岸災害調査団によると、同地点の近傍で T.P.+5.58m の遡上痕跡が確認されている。（Mori et al.;2019）

そこで、2018 年台風第 21 号 Jebi 沿岸災害調査団による痕跡値が得られている事例について、うちあげ高の予測精度についての検証を表-3.1.2.1 及び図-3.1.2.2 に示す地点で実施した。南芦屋浜をはじめいくつかの地点については、浸水被害発生時はうちあげ高予測を行っていなかった。そのため、当時の気象庁の波浪・潮位の予測値を元にうちあげ高の再現計算を行い、算定精度の検証を実施した。

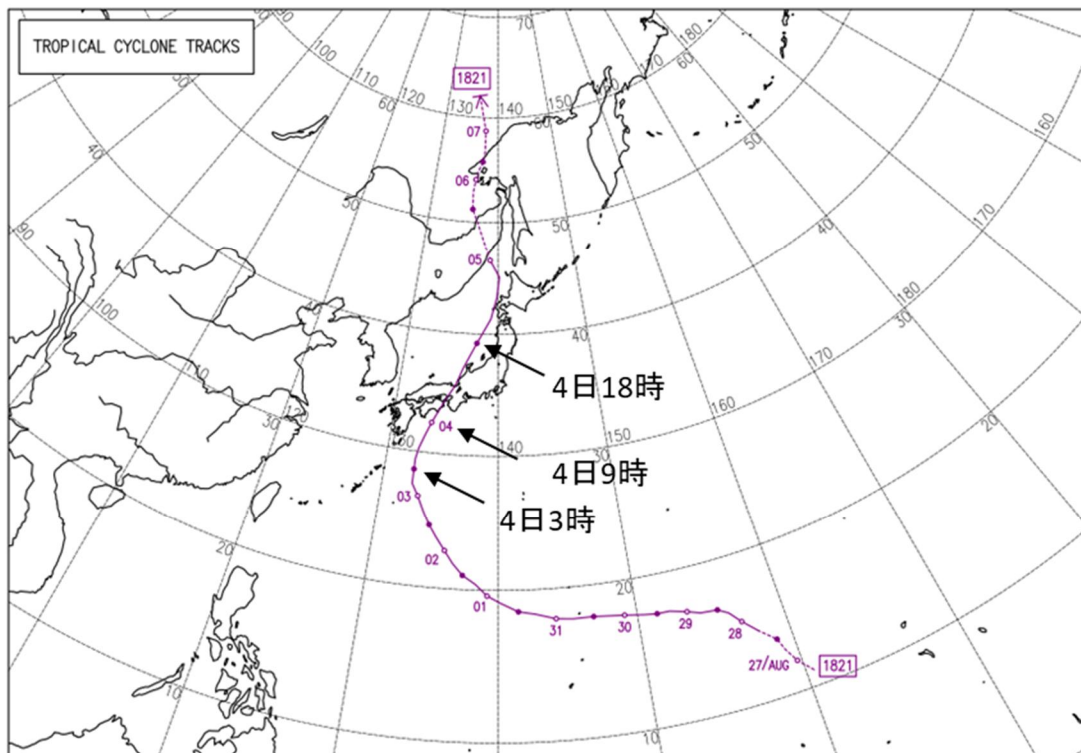


図-3.1.2.1 平成 30 年（2018 年）台風第 21 号の経路（気象庁台風経路図に加筆）

表-3.1.2.1 検証事例一覧

番号	湾	海岸名	地区海岸名	予測地点名	天端高 (T.P.m)	使用している波 浪GPVデータ	波浪変形 計算の有 無	痕跡値(T.P.m) (2018年台風21号Jebi 沿岸災害調査団 (2018)による予測地点 近傍の痕跡値)
①	紀州灘沿岸	周参見漁港海岸	平松地区	すさみ町周参見地先	8.20	沿岸波浪GPV	○	3.78
②	紀州灘沿岸	白浜海岸	中・大浜	白浜町中地先	9.00	沿岸波浪GPV	○	9.17
③	紀州灘沿岸	日高港海岸	浜の瀬・田井・吉原	美浜町大字濱ノ瀬地先	8.50	沿岸波浪GPV	○	5.71～7.15
④	大阪湾・播磨灘	岡田漁港海岸	岡田	泉南市りんくう南浜地先	4.40	浅海波浪GPV		2.26～2.33
⑤	大阪湾・播磨灘	二色港海岸	貝塚	貝塚市澤地先	4.70	浅海波浪GPV		1.86
⑥	大阪湾・播磨灘	尼崎西宮芦屋港海岸	芦屋	芦屋市涼風町地先	4.90	浅海波浪GPV	○	5.58
⑦	大阪湾・播磨灘	神戸港海岸	須磨	神戸市須磨区須磨浦通地先	3.98	浅海波浪GPV	○	2.62～3.02

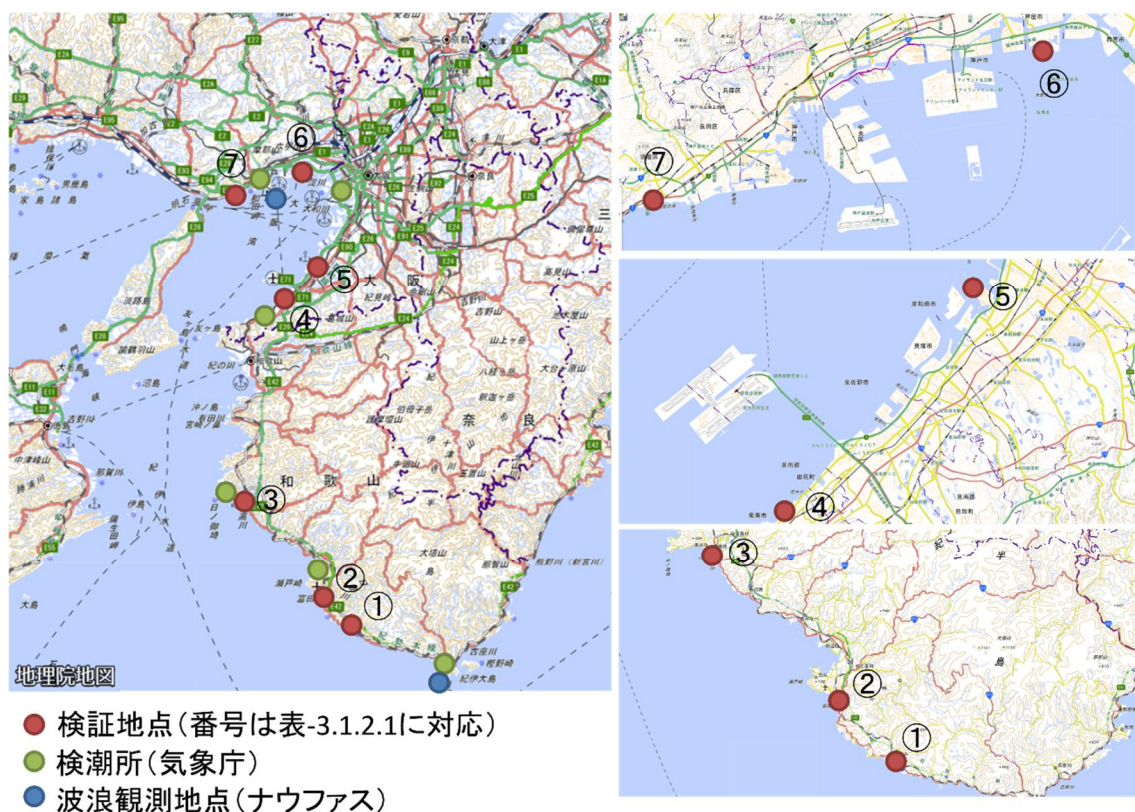


図-3.1.2.2 精度検証地点等の位置 (左：全体図、右：予測地点詳細図)

(2) うちあげ高予測の検証方法

検証に用いる気象庁の波浪及び潮位の予測値については、「予報円中心コース」による予測値を用いた。うちあげ高の算定に用いる換算沖波波高の算出にあたっては、2.1.2で説明した方法と同様に、表-3.1.2.1 に示すとおり、沿岸波浪モデルの出力値を用いる地点は、全て波浪変形テーブルを適用し算出した。浅海波浪モデルの出力値を用いる地点は、浅海波浪モデルの出力値から得られた換算沖波波高を用いたが、港湾の防波堤等がある地点のみ波浪変形テーブルを適用し算出した。

また、うちあげ高算定に必要となる地形は、陸域については、堤防等の形状は管理者から提供を受けた断面図及び国土地理院の DEM2、海域は海上保安庁の海図を用いて作成した。作成した地形データから、精度検証地点の海底勾配を踏まえ、表-2.3.2.1 から中村らの改良仮想勾配法、改良仮想勾配法 1/30、改良仮想勾配法 1/100 のいずれかのうちあげ高の算定式を選択した。ただし、海底勾配が 1/100~1/30 であった地点については、海底勾配に応じ、改良仮想勾配法 1/30 の式と改良仮想勾配法 1/100 の式によるうちあげ高を内挿することとした。すなわち、海底勾配が $1/a$ の場合（ただし、 $25 < a < 100$ ）、改良仮想勾配法 1/30 の式の割合を X 、改良仮想勾配法 1/100 程度の式の割合を Y として、以下の式(3.1.2.1)~(3.1.2.2)を解き、内挿の割合を求めた。

$$\frac{1}{30}X + \frac{1}{100}Y = \frac{1}{a} \quad (3.1.2.1)$$

$$X + Y = 1 \quad (3.1.2.2)$$

以上により得られた算定結果を痕跡値と比較した。

(3) うちあげ高予測の検証結果

1) 潮位予測値の精度

検証地点近傍にある気象庁の串本、白浜、御坊、淡輪、神戸、大阪の検潮所 (図-3.1.2.2) の観測値と潮位観測地点近傍の潮位 GPV の予測値を比較した結果が、図-3.1.2.3 である。潮位予測値は、気象庁の高潮ガイダンス GPV データで、過去 1 時間の予想の最大値が 1 時間間隔で出力されている。また、データは 3 時間毎に更新されるため、初期時刻から 3 時間後までの直近予測値をつなぎ合わせたものである。なお、潮位の観測値は予測値と同様に毎正時から 1 時間前までの 10 分毎の潮位の最大値をプロットした。

台風が通過した予測初期時刻 9 月 4 日 12 時~15 時頃に着目すると、潮位予測値のピーク時刻と観測値のピーク時刻は概ね整合している。紀州灘沿岸に位置する串本、白浜、御坊については、ピークの観測値に対してピークの予測値が過小評価傾向であるが、大阪湾・播磨灘に位置する淡輪、神戸、大阪については、概ね同程度であった。紀州灘沿岸については、Yamanaka et al. (2022) によると気象庁の高潮モデルの格子間隔 (約 1km 間隔) では再現できない 7 分程度の副振動があったとされており、この影響で予測値が観測値に対して、過小

になったものと考えられる。

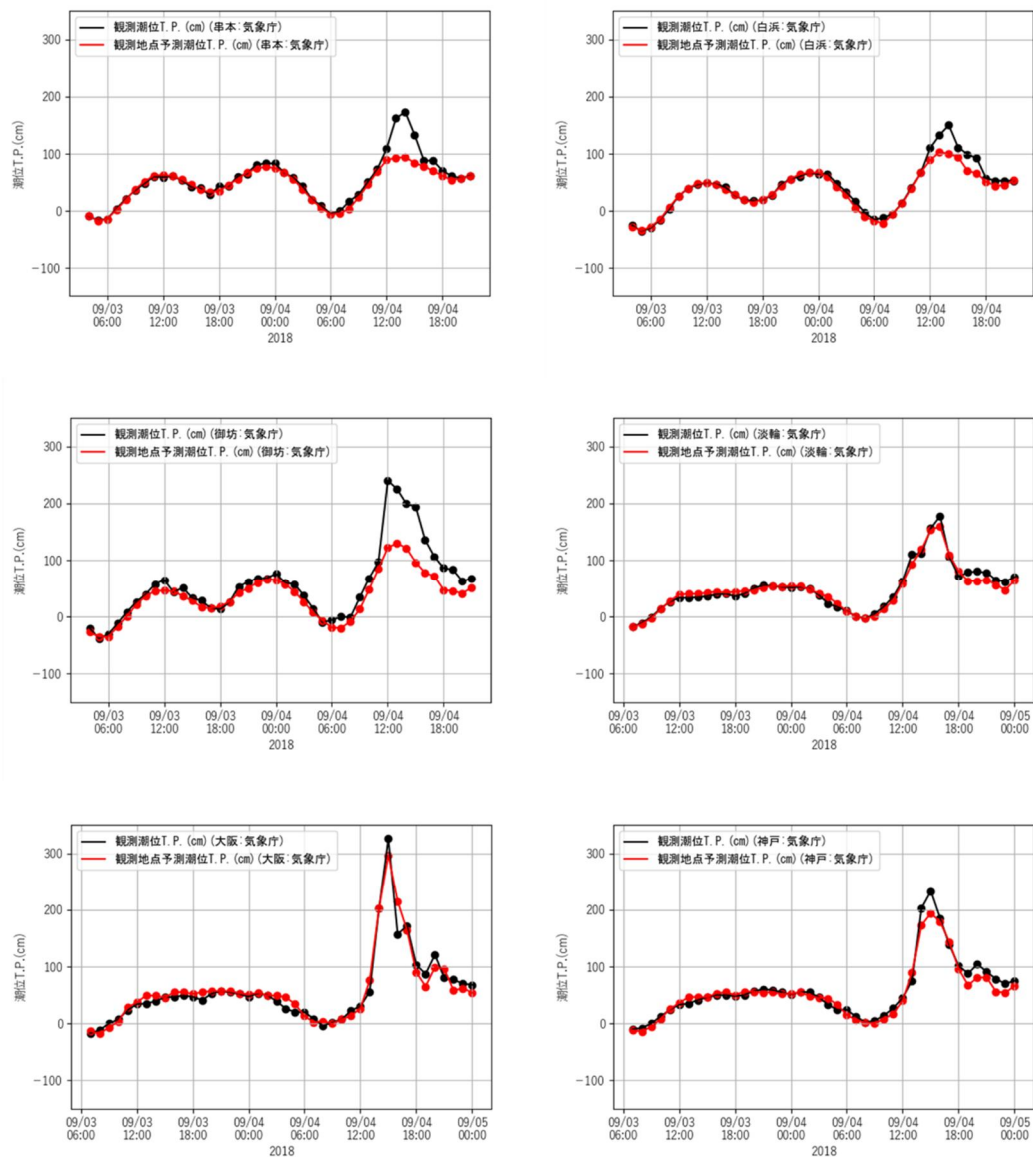


図-3.1.2.3 潮位観測値と予測値の比較

2) 波浪予測値の精度

検証地点近傍にあるナウファス潮岬及び神戸（図-3.1.2.2）の波浪、周期の観測値と波浪観測地点近傍の波浪GPVの予測値を比較した結果が、図-3.1.2.4である。波浪の予測値は、気象庁の沿岸波浪モデル（潮岬）、もしくは浅海波浪モデル（神戸）で毎正時1時間毎の予測値であり、潮位と同様に3時間毎に更新されるため、初期時刻から3時間の直近予測値をつなぎ合わせたものである。観測値は、予測値と同様に毎正時のものとした。

両地点において、波高のピーク時刻は概ね一致しており、ピーク時刻周辺の予測周期は観測周期と同程度であった。一方、波高のピーク値は、ナウファス神戸は予測値の方が観測値より1m弱大きく、ナウファス潮岬は予測値の方が観測値より2m程度小さかった。

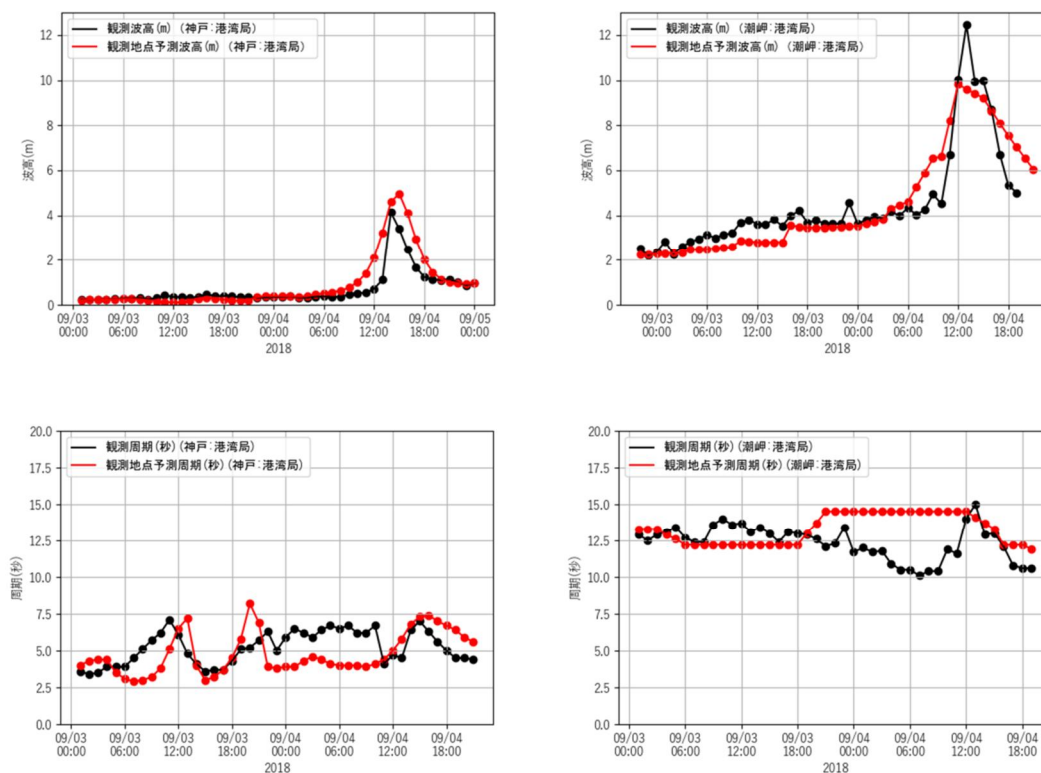


図-3.1.2.4 波浪観測値（波高、周期）と予測値（波高、周期）の比較

3) うちあげ高算定値と痕跡値の比較

初期時刻から3時間までの気象庁の潮位・波浪予測値を用いて、うちあげ高算定値がピークとなった値と痕跡値を比較することで、うちあげ高の算定精度を確認した。図-3.1.2.5は、事例毎の算定値のピークと痕跡値（痕跡値が算定地点近傍でいくつかあるものはその平均値）を比較したものである。

事例①を除き、うちあげ高の算定値がピークとなった値と痕跡値の差は1m以内に収まった。事例①（すさみ町周参見地先）については、串本や白浜の潮位観測値に比べて予測値が1m弱小さかったこと、ナウファス潮岬の波高が観測値に比べて予測値が2m程度低かったことから、潮位・波浪の予測値の過小傾向が影響し、うちあげ高算定値が低くなったものと考ええる。

以上により、潮位・波浪の予測値の精度が高ければ、うちあげ高予測システムの算定方法で、現地の痕跡値を概ね再現することを確認出来た。

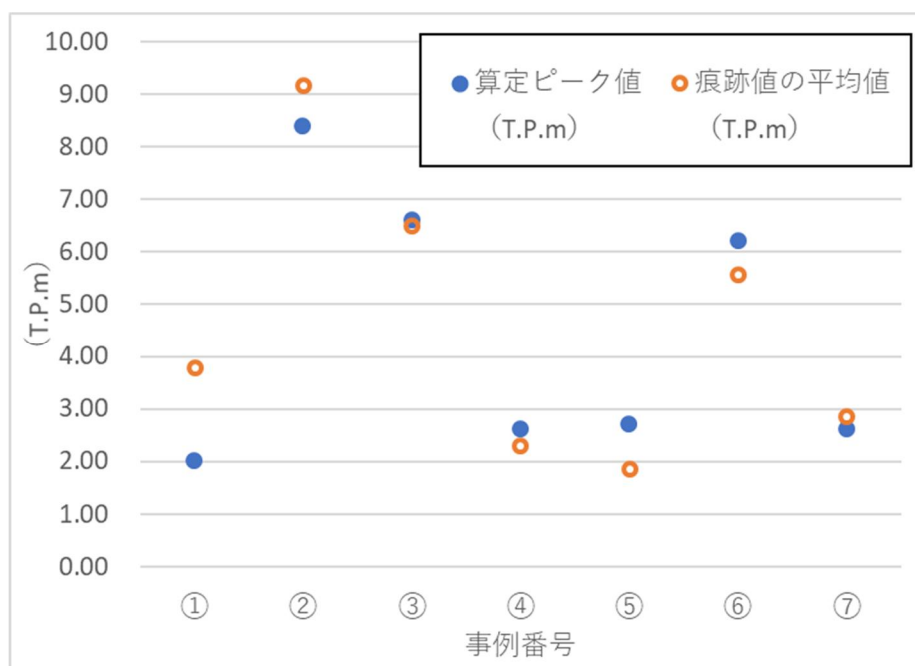


図-3.1.2.5 うちあげ高算定精度検証結果

(4) うちあげ高予測のリードタイムの検証

防災対応を行う上で、いつの時点でうちあげ高が天端高を超える予測となると分かるかが重要である。そこで、大きな浸水被害のあった事例⑤（芦屋市涼風町地先）において、台風中心コースの波浪・潮位予測値（予測初期時刻：9月3日18時、4日00時、06時、12時）を用いて浸水のあった時刻（9月4日14-15時）にうちあげ高が天端高を超えていたか確認を行った。図-3.1.2.6は、予測初期時刻毎の9月4日13時から18時のうちあげ高算定値と天端高を重ねたものである。予測初期時刻9月4日6時、12時では、浸水被害のあった9月4日14時から15時のうちあげ高算定値が天端高を超えていた。波浪うちあげ高予測システムでは、予測初期時刻から約3時間後に計算結果が表示されることから、概ね5時間前にはうちあげ高が天端高を超える時刻を予測できていたことが分かった。また、それ以前の予測初期時刻でも、うちあげ高が天端高を超えており、概ね1日前には浸水の危険性を把握することが可能であることが分かった。

以上のことから、気象庁の潮位、波浪予測値を用いたうちあげ高の再現計算により、平成30年（2018年）台風第21号における南芦屋浜の浸水被害発生危険性を事前に予測できることが確認できた。

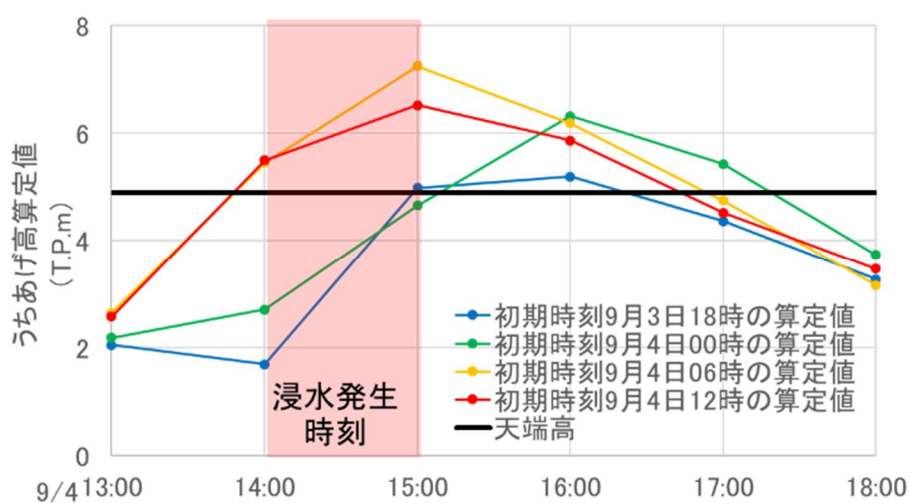


図-3.1.2.6 浸水発生事例における予測リードタイムの検証

3. 1. 3 令和元年（2019 年）東日本台風（台風第 19 号）を対象とした定量的検証

（1）概要

令和元年（2019 年）東日本台風（台風第 19 号）による周期の長い高波が観測された駿河湾及び相模湾を対象に、うちあげ高の現地観測結果を用いてうちあげ高予測の検証を行った。

（2）うちあげ高予測の検証方法

予測検証は駿河湾に面する駿河海岸と相模湾に面する西湘海岸周辺で行った。図-3.1.3.1 のように、駿河海岸の予測地点は大井川河口の北東約 5 km に位置する。図-3.1.3.2 のように、予測地点の砂浜幅は約 50 m、水深 4 m 以浅の海底勾配は約 1/9、水深 4 m 以深の海底勾配は約 1/80 である。一方、西湘海岸は、図-3.1.3.3 に示された相模湾沿岸のうち小田原海岸、二宮海岸、大磯海岸を指しており、これらに平塚海岸を加えた各海岸の一地点を予測地点とした。図-3.1.3.4 のように、海底勾配は、小田原海岸で約 1/8、二宮海岸で約 1/25、大磯海岸で約 1/40、平塚海岸で約 1/50 である。



図-3.1.3.1 駿河湾における検証地点

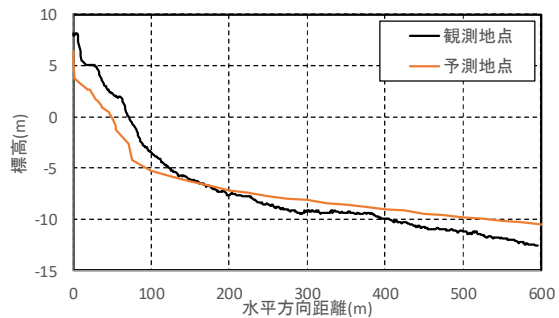


図-3.1.3.2 駿河海岸の断面形状



図-3.1.3.3 西湘海岸周辺における検証地点

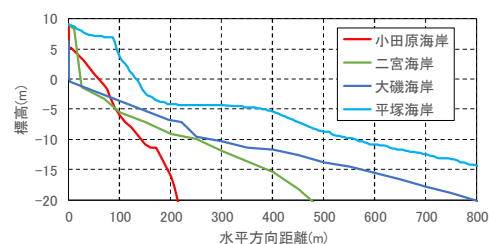


図-3.1.3.4 西湘海岸周辺の断面形状

駿河海岸では、海岸堤防の波返工に観測機器を固定できることから、写真-3.1.3.1 のように容量式波高計（測定範囲 3.8 m，サンプリング間隔 0.1 秒）3 台を焼津工区測線 No.15 の堤防前面（うちあげ高予測地点の北東約 3 km）に沿岸方向 5 m 間隔で 2019 年 9 月 20 日

に設置し、台風第 19 号が接近した 10 月 12 日に観測した毎正時 20 分間のうちあげ高の最大値を検証に用いた。一方、西湘海岸周辺については、台風通過後に実施された遡上痕跡の計測結果（Shimozono et al.;2020）を用いて、うちあげ高の予測値を検証した。



写真-3.1.3.1 うちあげ高の観測機器（駿河海岸）

（3）検証結果

1）駿河海岸

駿河海岸の駿河海洋観測所（うちあげ高観測地点の南西約 5 km、水深 45 m）では、10 月 11 日午後から有義波高 4 m 以上、有義波周期 14 秒程度の高波が観測され、10 月 12 日 6 時に有義波高 6.8 m を観測した後、同日午後から有義波高が再度増大し、同日 17 時には既往最大に匹敵する有義波高 8.6 m、有義波周期 13.8 s を観測した（図-3.1.3.5）。また、国土地理院の焼津験潮場（焼津漁港内、うちあげ高観測地点の北約 5 km）では、同日 18 時 4 分に、既往最高潮位を 0.4 m 上回る T.P.1.8 m の潮位を記録した。潮位と波高のピークがほぼ重なったため、駿河海岸の焼津工区では広範囲で越波が生じた。

うちあげ高観測値と各初期時刻のうちあげ高予測値の時系列を図-3.1.3.6 に示す。うちあげ高の観測範囲は T.P. 6.9~10.7 m であり、その範囲に入る波のうちあげがなかった時刻についてはデータがプロットされていない。また、データがプロットされている時刻についても、各 20 分間に検出された波の数は最大 6 である。うちあげ高予測値（改良仮想勾配法 1/100）は 12 日 4 時にピークとなり、その時間最大値は T.P. 9.0 m 程度で、うちあげ高の観測値と概ね一致していた。ただし、うちあげ高予測値が 5.0 m 程度だった 12 日 11 時にうちあげ高観測値が 8.4 m になるなど、予測値より高いうちあげ高が観測される時間帯があった。なお、うちあげ高予測に用いた潮位の予測値と焼津験潮場の観測値の差は、うちあげ高予測値のピーク前後の時間帯では 0.2 m 以下であった。

予測地点は観測地点より浜幅が狭いが水深 5.0 m 以深の海底勾配が緩いため、観測地点の地形・施設形状データを用いて 10 月 12 日の毎正時のうちあげ高を推算した。その結果を図-3.1.3.7 に示す。玉田らの式 $R_{2\%}$ の推算値が観測値とほぼ一致する一方、改良仮想勾配法 1/30 や玉田らの式 $R_{1/3}$ の推算値は観測値より小さくなった。なお、改良仮想勾配法 1/100 に

については、仮想勾配が近似式の算定に用いたデータの範囲から外れたので、推算値を表示していない。

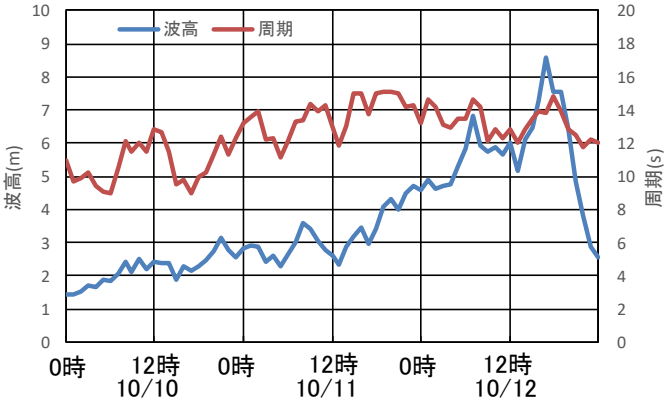


図-3. 1. 3. 5 駿河海洋観測所の波浪観測値

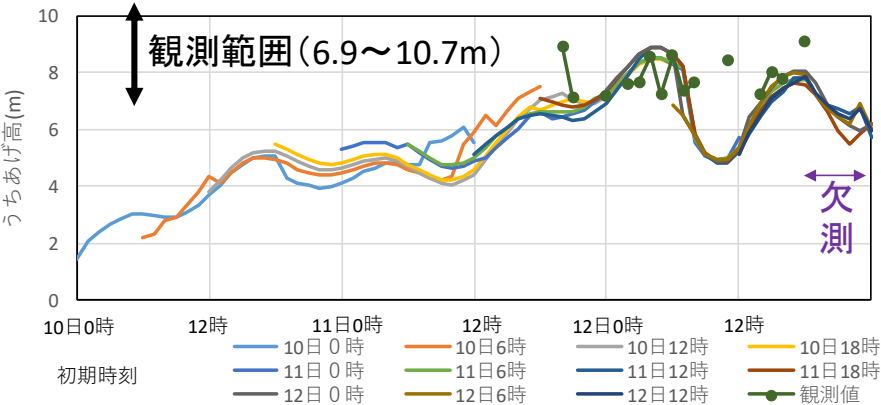


図-3. 1. 3. 6 予測値と観測値の比較（駿河海岸）

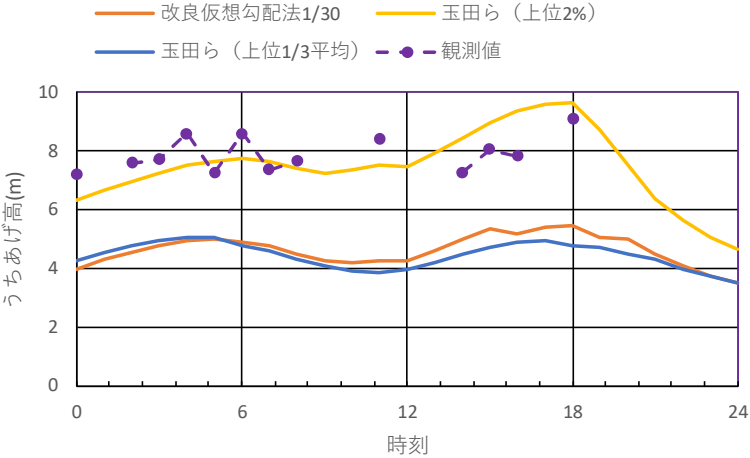


図-3. 1. 3. 7 推算値と観測値の比較（駿河海岸、10 月 12 日）

2) 西湘海岸周辺

西湘海岸周辺では、小田原海岸の水深 13 m に設置されていた波高計で、10 月 12 日 20 時に、有義波波高 8.1 m、有義波周期 11.2 s を観測した（図-3.1.3.8）。また、気象庁の小田原検潮所では、同日 16 時 50 分に既往最高潮位とほぼ同じ T.P.1.22 m（平滑値）を記録した。この高波により、小田原海岸の一部では、越波による家屋被害が生じた。

対象 4 海岸におけるうちあげ高の計測値（遡上痕跡の計測結果）と各初期時刻のうちあげ高予測値の時系列を図-3.1.3.9～12 に示す。図-3.1.3.9 のように、小田原海岸のうちあげ高予測値（玉田らの式 $R_{1/3}$ ）は 12 日 18 時前後に高くなっており、その時間最大値は T.P.10 m 程度で、計測値とほぼ一致した。なお、小田原海岸のうちあげ高予測に用いた潮位の予測値と小田原検潮所の観測値の差は、うちあげ高予測値のピーク前後の時間帯では 0.1 m 以下であった。また、図-3.1.3.10 及び図-3.1.3.11 のように、二宮海岸のうちあげ高予測値（玉田らの式 $R_{1/3}$ ）や平塚海岸のうちあげ高予測値（改良仮想勾配法 1/100）も同様に変化し、その時間最大値は計測値とほぼ一致した。一方、図-3.1.3.12 のように、大磯海岸のうちあげ高予測値（改良仮想勾配法 1/100）の時間最大値は T.P.11.0 m 程度で、遡上痕跡の計測結果より約 4.0 m 高かった。

予測値が遡上痕跡より高かった大磯海岸を対象に、12 日 12 時を初期時刻とする潮位・波浪予測値を用いて、複数の算定式のうちあげ高を推算したところ、計測値と比べ、玉田らの式 $R_{2\%}$ の推算値はやや大きく、改良仮想勾配法 1/30 や玉田らの式 $R_{1/3}$ はやや小さかった（図-3.1.3.13）。

なお、Mase et al. (2013)は、最大うちあげ高が玉田らの式 $R_{2\%}$ の 1.54 倍になるとしているが、今回の検証では、Mase et al. (2013)の最大うちあげ高より玉田らの式 $R_{2\%}$ の方が計測値に近い結果となった。

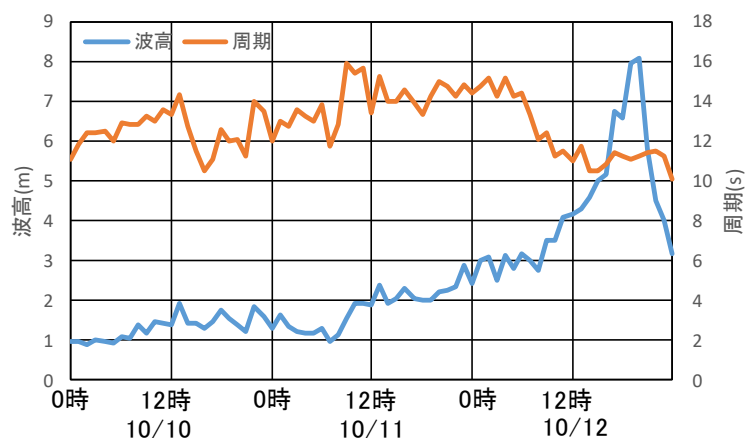


図-3.1.3.8 小田原海岸沖の波浪観測値

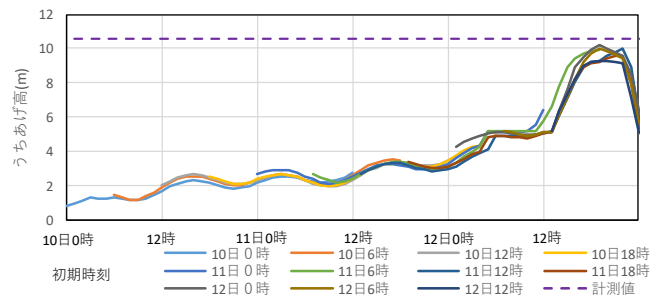


図-3.1.3.9 予測値と計測値の比較（小田原海岸）

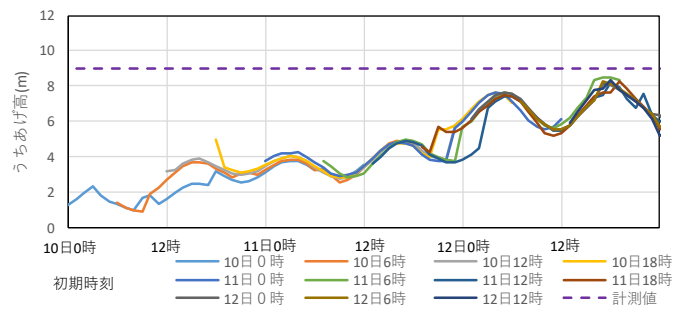


図-3.1.3.10 予測値と計測値の比較（二宮海岸）

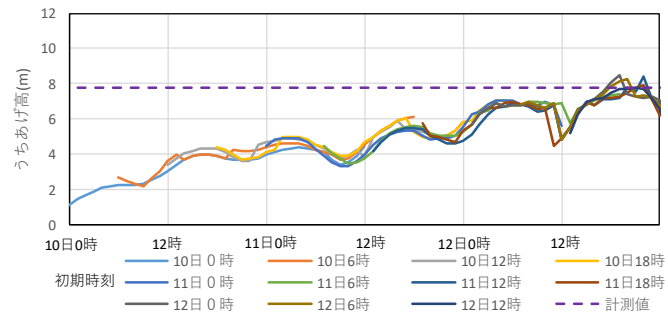


図-3.1.3.11 予測値と計測値の比較（平塚海岸）

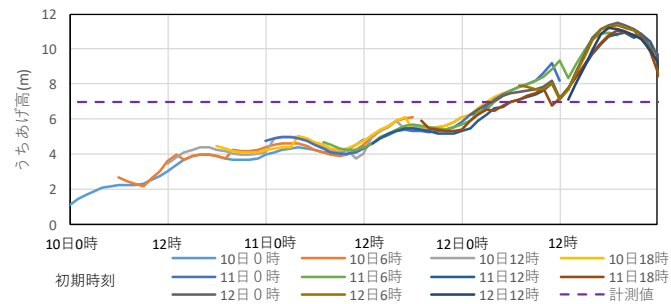


図-3.1.3.12 予測値と計測値の比較（大磯海岸）

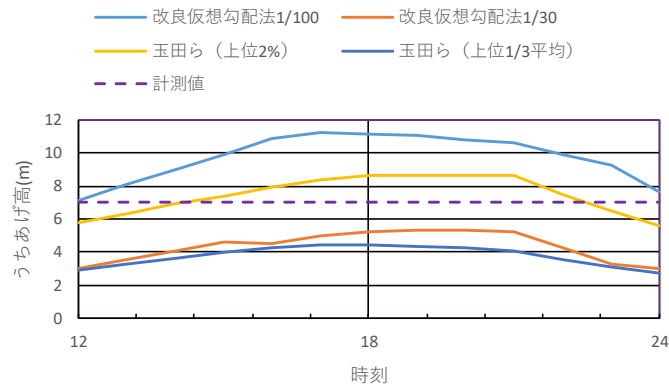


図-3.1.3.13 推算値と計測値の比較（大磯海岸、10月12日）

（４）考察

図-3.1.3.2 及び図-3.1.3.4 に示したように、予測検証を行った駿河海岸及び西湘海岸は比較的急勾配である。そのような地形条件のもとでの台風第19号接近時の検証結果から、以下のことが明らかになった。

- ・駿河海岸の観測地点及び大磯海岸では、推定値（玉田らの式 $R_{2\%}$ ）が観測値または計測値（遡上痕跡の高さ）と最も合っていた。
- ・小田原海岸及び二宮海岸の予測値（玉田らの式 $R_{1/3}$ ）、平塚海岸の予測値（改良仮想勾配法1/100）の最大値は、計測値（遡上痕跡の高さ）と概ね一致していた。

一方、うちあげ高予測に関するこれまでの検証(加藤ら；2010)では、観測されたうちあげ高の $R_{1/3}$ と予測値が比較されており、以下のような結果であった。

- ・小田原海岸では、玉田らの式 $R_{1/3}$ の予測値は観測値よりやや大きく、改良仮想勾配法の予測値は観測値よりやや小さい。

以上のことから、駿河海岸や西湘海岸のような比較的急勾配の海岸のうちあげ高の最大値を予測するには、玉田らの式（ $R_{1/3}$ または $R_{2\%}$ ）を用いるのがよいと考えられる。また、平塚海岸のような比較的緩勾配の海岸のうちあげ高の最大値を予測するには、改良仮想勾配法1/100を用いるのがよいと考えられる。

（５）まとめ

本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- ・海底勾配に応じてうちあげ高算定式を選択することにより、台風接近時のうちあげ高を精度良く予測できることが確認された。
- ・海底勾配が比較的急である駿河海岸及び西湘海岸において台風第19号接近時に確認されたうちあげ高の最大値は、玉田らの式 $R_{2\%}$ の推算値とよく合うことが確認された。

3. 1. 4 平成 28 年（2016 年）～令和 5 年（2023 年）の台風・低気圧を対象とした定性的検証

（1）概要

予測精度の現地での検証事例は限られており、波浪のうちあげ高予測と現地状況との整合性を確認するため、平成 28 年（2016 年）1 月から令和 5 年（2023 年）8 月までの間に発生した越波事例を海岸管理者から収集した。越波事例は、現地や CCTV カメラでの越波の確認や越波発生後の流木等の飛散状況の確認等により得られたものである。収集した越波事例のうち、越波の程度が大きい表-3.1.4.1 に示す 8 擾乱、24 事例を抽出し、予測初期時刻から 3 時間以内のうちあげ高予測の最大値が天端高を上回っていたか整理した。台風の経路、低気圧の天気図の推移及び検証地点の概略位置を図-3.1.4.1～図-3.1.4.8 に示す。なお、図中の経路上の○印は傍らに記した日の午前 9 時、●印は午後 9 時（いずれも日本標準時）の位置で→は消滅を示す。経路の実線は台風、破線は熱帯低気圧・温帯低気圧の期間を示します。

表-3.1.4.1 検証対象事例一覧

番号	擾乱名	検証 地点数
A	2016 年台風第 10 号（Lionrock）	4
B	2017 年台風第 21 号（Lan）	8
C	2018 年台風第 21 号（Jebi）	1
D	2019 年台風第 19 号（Hagibis）	2
E	2022 年 12 月 冬期風浪	5
F	2022 年台風第 14 号（Nanmadol）	1
G	2023 年台風第 6 号（Khanun）	2
H	2023 年台風第 7 号（Lan）	1

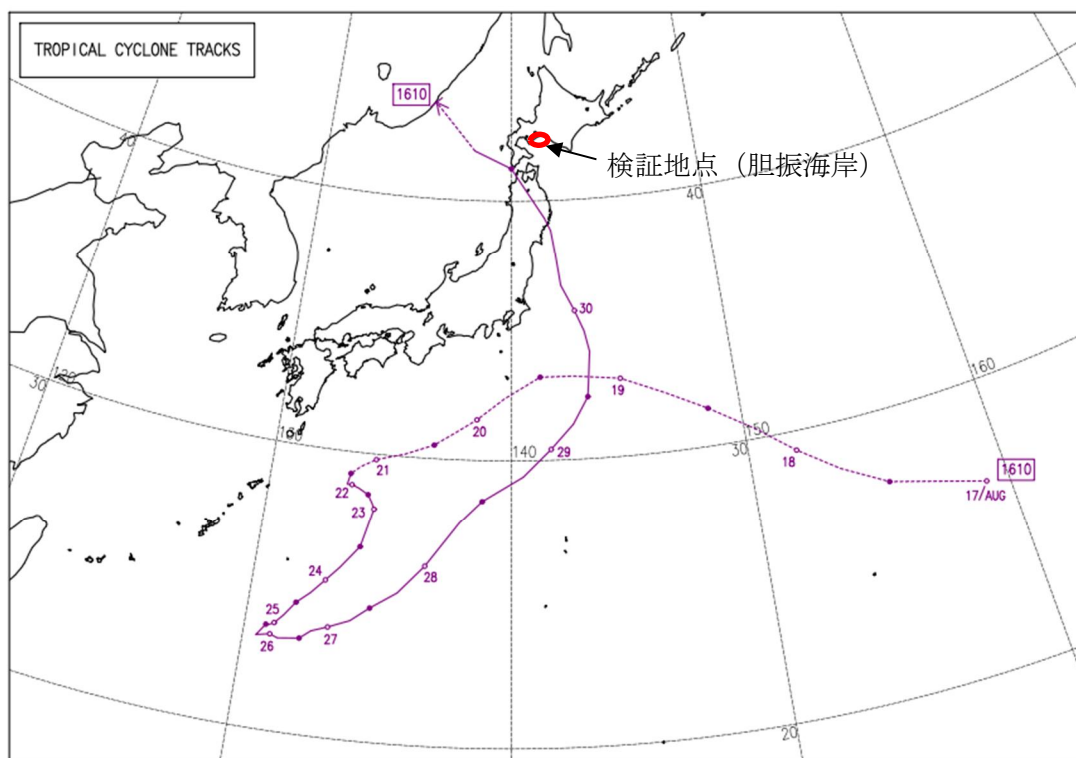


図-3.1.4.1 2016 年台風第 10 号の経路と検証地点（気象庁台風経路図に加筆）

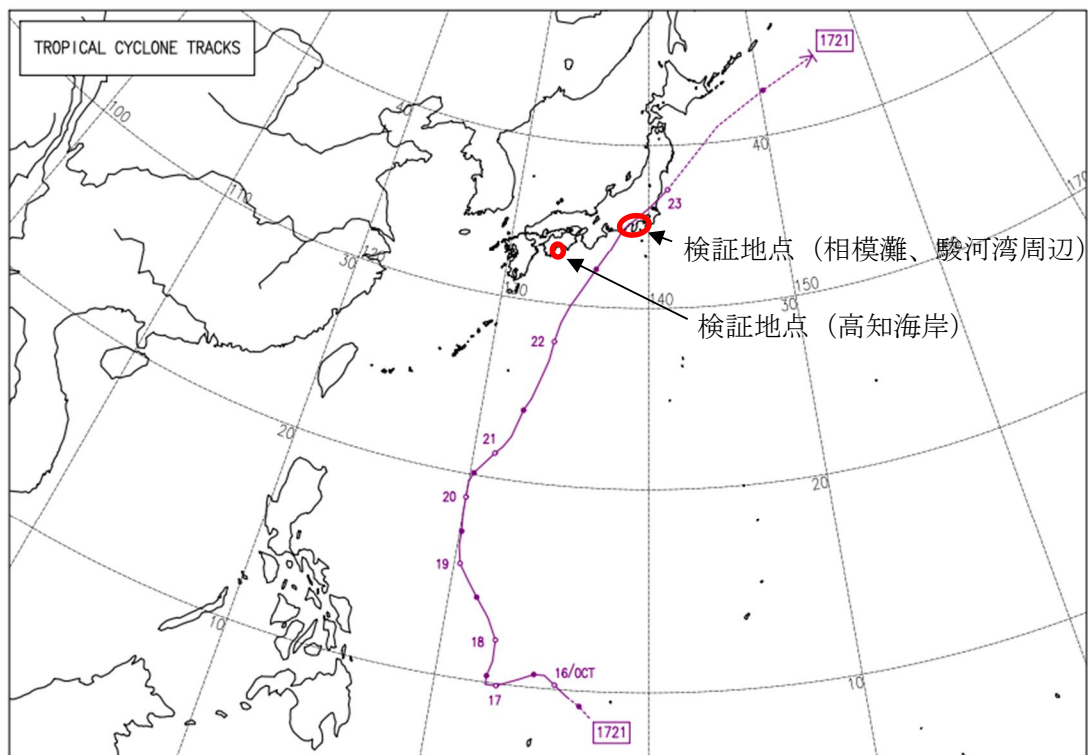


図-3.1.4.2 2017 年台風第 21 号の経路と検証地点（気象庁台風経路図に加筆）

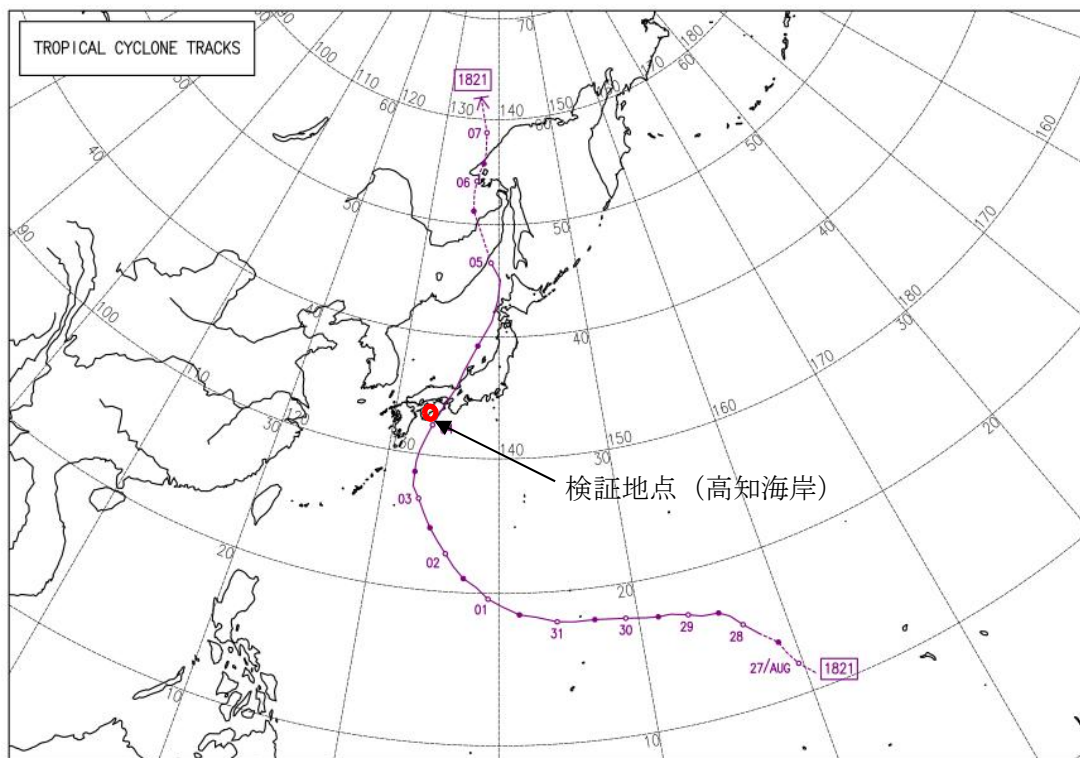


図-3.1.4.3 2018 年台風第 21 号の経路と検証地点（気象庁台風経路図に加筆）

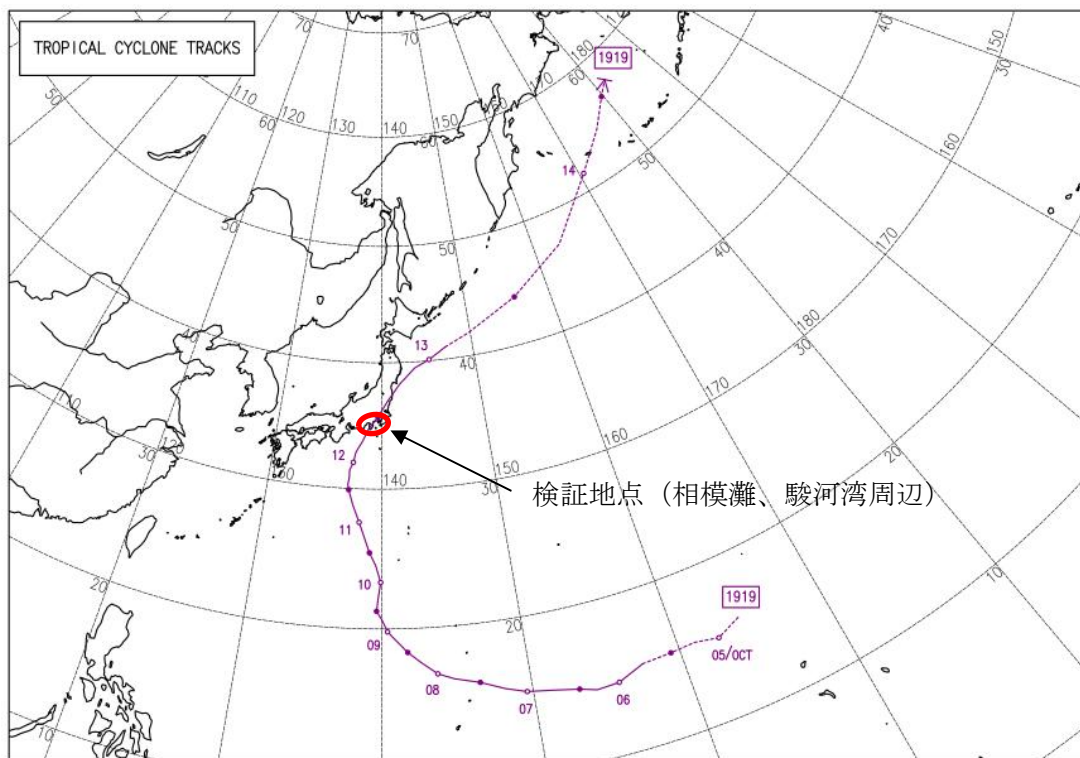


図-3.1.4.4 2019 年台風第 10 号の経路と検証地点（気象庁台風経路図に加筆）

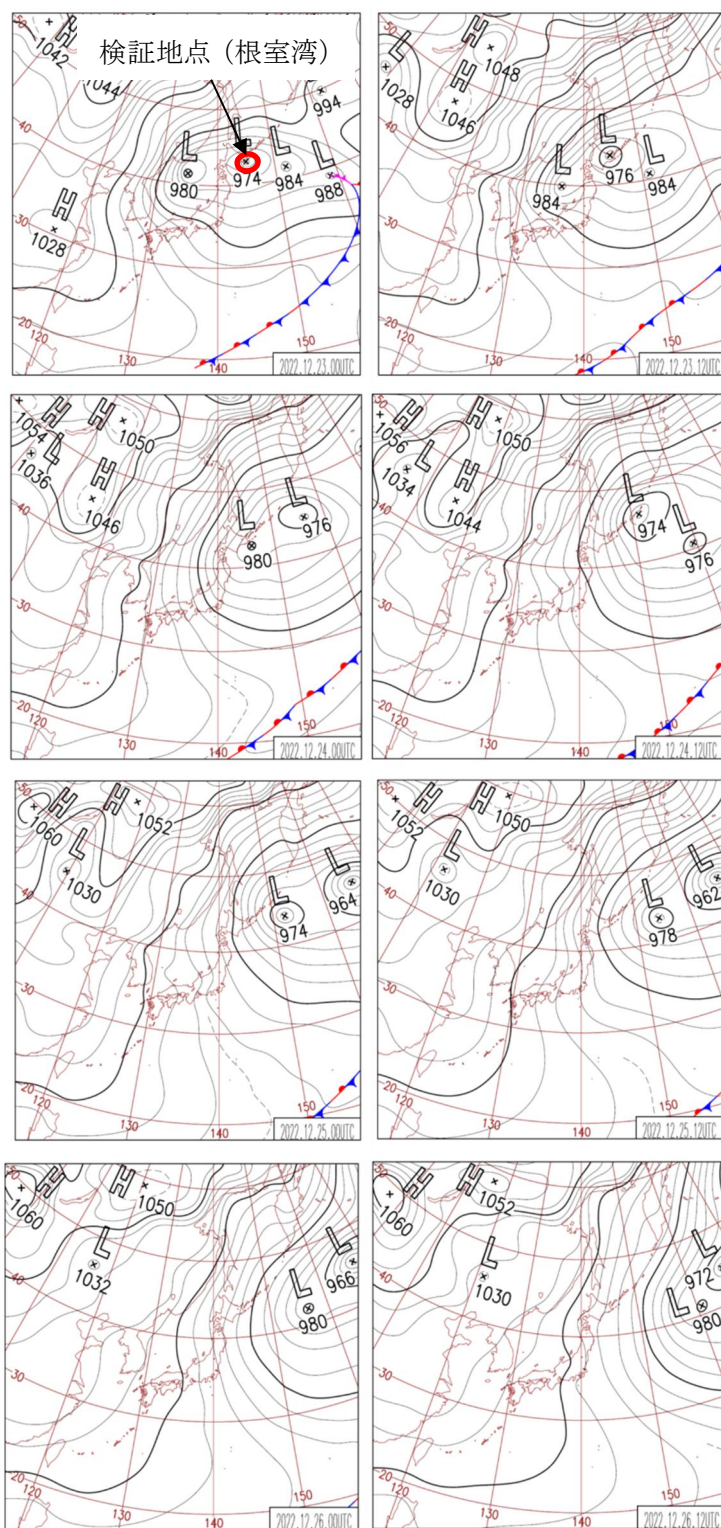


図-3.1.4.5 2022年12月23日～26日 (UTC.12時間毎) の低気圧の推移と検証地点
(気象庁保存用天気図に加筆)

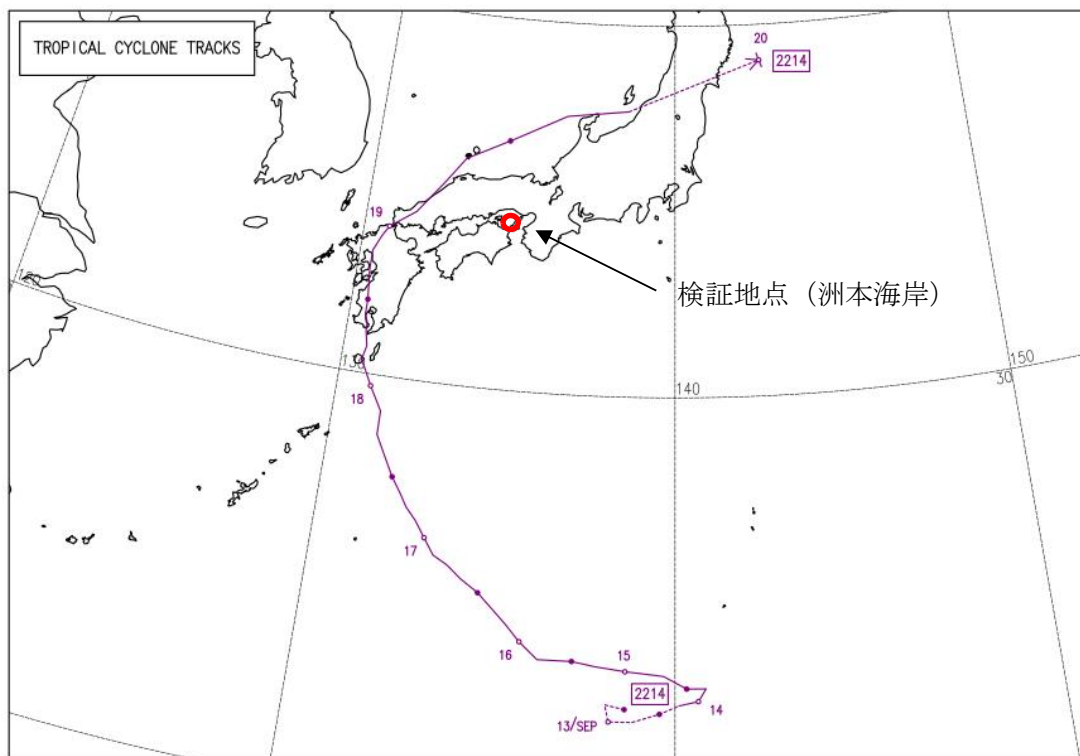


図-3.1.4.6 2022 年台風第 14 号の経路と検証地点（気象庁台風経路図に加筆）

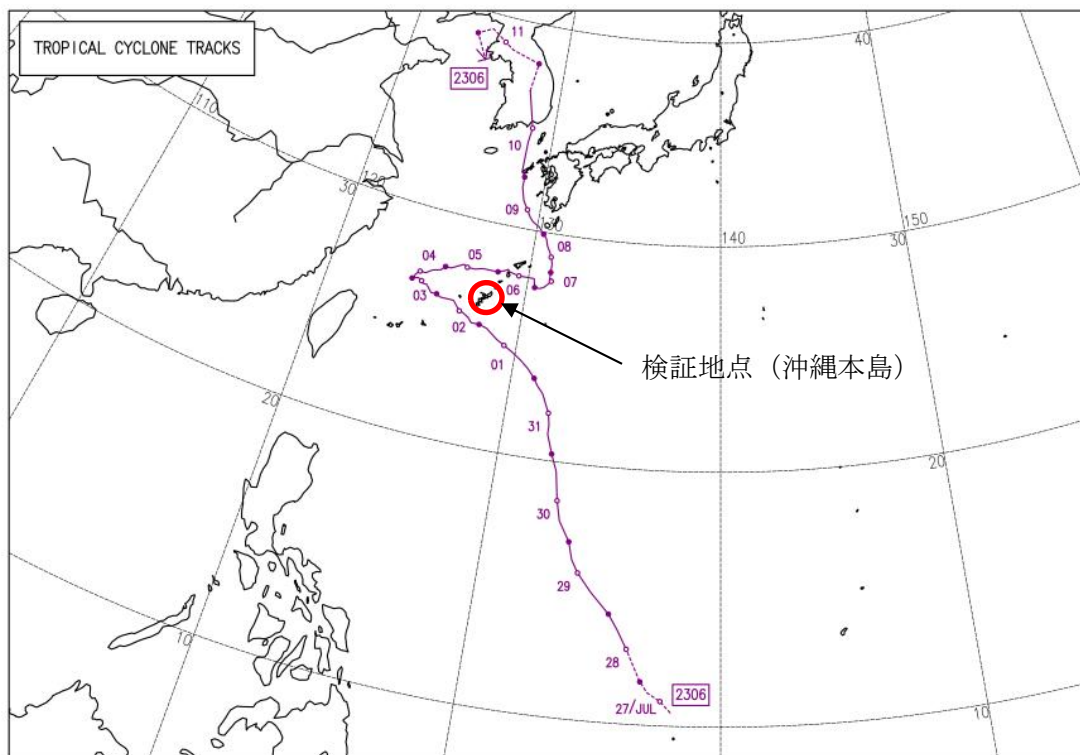


図-3.1.4.7 2023 年台風第 6 号の経路と検証地点（気象庁台風経路図に加筆）

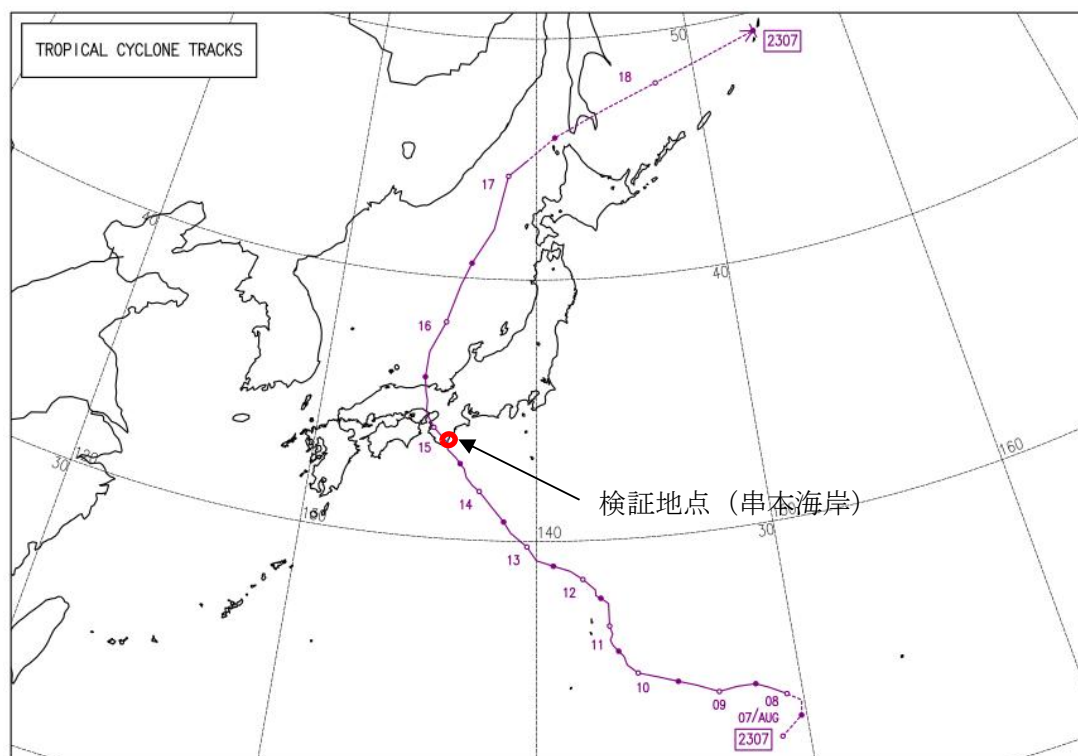


図-3.1.4.8 2023 年台風第 7 号の経路と検証地点（気象庁台風経路図に加筆）

（2）うちあげ高予測の検証方法

表-3.1.4.1 に示す E～H の擾乱については、発生当時の波浪うちあげ高予測システムのうちあげ高計算結果を用いて検証を行った。一方、計算結果が残っていなかった A～D の擾乱については、越波が発生した地点近傍の予測地点について、再現計算を実施することで検証を実施した。E を除く台風の擾乱については、検証に用いる気象庁の波浪及び潮位の「予報円中心コース」の予測値を用いた。検証に用いるうちあげ高の算定式は、精度検証地点の海底勾配を踏まえて設定した。

（3）うちあげ高予測の検証結果

図-3.1.4.9 は越波事例のうちあげ高予測の最大値と天端高の差である。16 ケース（青色）については、天端高を超える予測となっており、現地の越波実態を的確に捉えていた。海岸保全施設の技術上の基準・同解説では、海岸堤防等の天端高の決定にあたっては、不確実性を考慮して余裕高を設定することとされており、最大 1.0m 程度を限度として余裕高を設定されることが多い。このため、うちあげ高予測の最大値と（天端高-1.0m）を比較したところ、6 ケース（橙色）については、（天端高-1.0m）を超える予測となっており、越波の危険性の高まりを表現できていた。一方、2 ケース（赤色）については、（天端高-1.0m）を下回る予測であった。

波浪うちあげ高予測システムで用いているうちあげ高の算定式は、規則波を対象としたものである。しかし、実際の波浪は不規則性があるため、現地では瞬間的に予測値より高い波浪のうちあげ高になっていることが考えられる。このため、(天端高-1m)を下回る予測となった2事例(赤色)について、不規則波を対象とした玉田らによる算定式を用いて、2%最大うちあげ高を算出したところ、いずれも天端高を超える結果となり、越波が発生していた実態を再現できることを確認した。

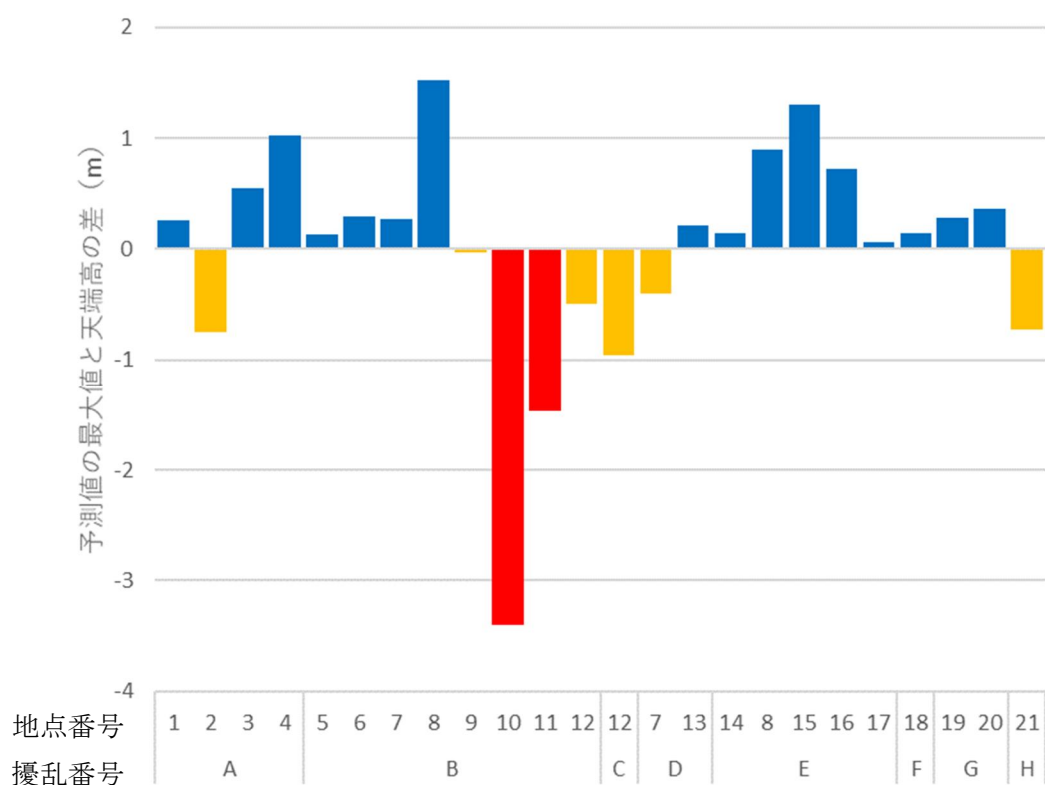


図-3.1.4.9 うちあげ高予測の最大値と天端高の差

3. 1. 5 緩勾配海岸における現地観測値に対する定量的検証

(1) 概要

これまで紹介した精度検証においては、越波事例や遡上痕跡に対する検証が多く、現地の実測値に対する検証は、伊勢湾西南海岸での上位1/3平均うちあげ高に対する検証（3. 1. 1）や駿河海岸での時間最大うちあげ高に対する検証（3. 1. 3）に限られる。そのため、それぞれの算定方法が現地で観測されたどういったうちあげ高代表値と対応しているか検証は十分ではないことから、本項では、改めてCCTVカメラの観測結果と各種算定方法によるうちあげ高代表値を比較検証した結果を示す。

施設設計においては、波のうちあげ高の算定は、規則波を対象とした中村らの改良仮想勾配法（1972）が用いられることが多いが、海底勾配が1/30より急な海浜断面の実験から得られた算定図を用いた方法であり、それより緩やかな勾配の海岸でのうちあげ高を過小評価することが知られている。例えば、山本ら（1999）は改良仮想勾配法により得られたうちあげ高と不規則波模型実験及び現地観測による上位1/3 平均うちあげ高 $R_{1/3}$ を比較し、砕波点から波の遡上点までの平均海底勾配が1/20より緩くなると、改良仮想勾配法により得られたうちあげ高が現地観測された $R_{1/3}$ に対して過小となり、緩くなるにつれてその傾向が大きくなることを示している。また、玉田ら（2009）は、波の不規則性を考慮したうちあげ高の算定式を提案し、改良仮想勾配法の算定図で求まるうちあげ高が不規則波の上位50 %平均うちあげ高 $R_{50\%}$ に相当することを示しているが、これらの算定図・算定式は、海底勾配が1/30程度より急な断面での実験結果から得られたものである。そこで、加藤ら（2010、2020）は海底勾配1/100の海浜断面に設置した表法勾配1/2の堤防へのうちあげ高を数値波動水路（CADMUS-SURF）で計算した結果から得た算定式を提案し、改良仮想勾配法に比べて算定式の相対うちあげ高が高くなることを示している。間瀬ら（2021）は、海底勾配が1/50の実験条件において、改良IFORM（2019）による越波流量の過小評価を確認しており、うちあげ高算定における砕波帯内での周期変化を考慮することで算定精度が向上することを示している。

このように、実験に基づいた緩勾配海岸での波のうちあげ高算定方法は複数提案されているが、現地検証事例は限られている。3. 1. 1 では、伊勢湾（海底勾配：水深5 m以浅で1/300 程度）で改良仮想勾配法や玉田らの $R_{1/3}$ の算定式に比べて提案した改良仮想勾配法1/100を用いた方が現地観測された $R_{1/3}$ に近い値が得られることや、3. 1. 3 では、平塚海岸（海底勾配1/50程度）での遡上痕跡と提案した算定式により求めた算定値が概ね一致していることを示しているが、うちあげ高代表値との対応は明らかではない。

そこで、本節では、海底勾配が1/30より緩やかな海岸を対象に、高波浪時の画像からうちあげ高を読み取り、代表値（ $R_{2\%}$, $R_{1/10}$, $R_{1/3}$, $R_{50\%}$, R_{mean} ）を整理した。また、緩勾配海岸を対象とした既往の算定方法で求まるうちあげ高と現地観測値の対応関係を定量的に検証した。

(2) うちあげ高観測結果の整理

1) うちあげ高の観測方法と観測地点

うちあげ高の観測は、緩傾斜護岸を有する胆振海岸の4 地点（表法勾配1:5）と宮崎海岸の1 地点（表法勾配1:3）において、現地に設置されているCCTVカメラにより得られた動画を用い、令和5年（2023年）～令和6年（2024年）の高波浪が観測された表-3.1.5.1に示す期間において計37 回実施した。

表-3.1.5.1 うちあげ高観測地点と観測期間

海岸名	観測地点	観測期間（観測回数）
胆振海岸	KP3.4	2023/8/28 18:00 - 8/29 02:00（9 回）
	KP8.1	2023/11/27 17:00（1 回）
	KP28.1	
	KP15.6	2023/11/27 17:00（1 回）
宮崎海岸	No.55	2023/8/7 23:00（1 回）
		2023/8/8 22:00- 8/9 00:00（3 回）
		2024/8/28 18:00-19:00（2 回）

観測の手順は、以下の通りである。

CCTVカメラ画角内に設置した標高値を示す目印（胆振海岸：0.5 m毎、宮崎海岸：1.0 m毎）に設置。例として、図-3.1.5.1）をもとに、毎正時20 分間の個々の波の水面高の最大値を動画（フレームレート約30 bps）から読み取る。読み取った最大値から近傍の観測潮位を差し引くことで、個々の波のうちあげ高を求め、20 分間のうちあげ高代表値として上位2 %うちあげ高 $R_{2\%}$ 、上位1/10 平均うちあげ高 $R_{1/10}$ 、上位1/3 平均うちあげ高 $R_{1/3}$ 、上位50 %平均うちあげ高 $R_{50\%}$ 、平均うちあげ高 R_{mean} を算出する。ここで、うちあげ高代表値の算出に用いる波数は、入射波数（近傍の波浪観測所で観測された波数）を用いた。観測所の入射波数に対して、実際に観測された波のうちあげ回数は55-82 %であった。入射波数に対してうちあげ高観測波数が少なくなることは、高橋ら（1999）の現地観測においても確認されており、間瀬ら（2021）が示している緩勾配海岸において有義波周期が沖から汀線に向かって増加していくことが影響していると考えられる。

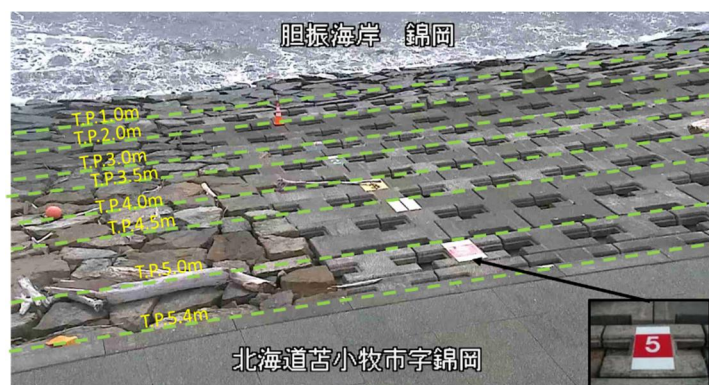


図-3.1.5.1 胆振海岸KP8.1における画角と標高値を示す目印

図-3.1.5.2にうちあげ高観測地点近傍における観測期間に近い時期の深淺測量から得られた断面図を示す。いずれの地点も一様な勾配の断面ではなく、胆振海岸では、護岸法先から100 m程度沖までは比較的急勾配であるが、200 m程度より沖は緩くなっており、宮崎海岸では、護岸天端から300-500 m程度沖にトラフが形成されている。中村らの改良仮想勾配法や改良IFORMでは、砕波点から岸側の断面積を用いてうちあげ高を算定することから、観測期間中の潮位、波浪の観測値から合田（1975）の不規則波の砕波指標から求めた砕波点の海底高さを調べたところ、胆振海岸でT.P.-4.0 mから-10.0 m程度、宮崎海岸でT.P.-5.5 mから-8.0 m程度であった。これを参考に、T.P.-10.0 mの海底位置から護岸法先までの海底勾配を求めると、胆振海岸KP28.0は1/40程度、その他の地点は1/80～1/60程度であった。

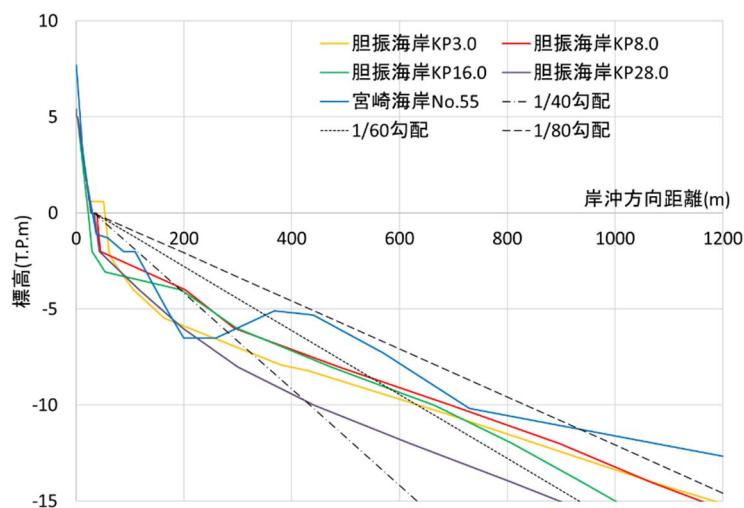


図-3.1.5.2 うちあげ高観測地点近傍の断面図

2) うちあげ高代表値の整理

間瀬ら（2003）は、海底勾配1/20 の模型実験で得られたうちあげ高代表値の分布がレイリー分布に従うこと（ $R_{2\%}/R_{1/3} \approx 1.40$ 、 $R_{1/10}/R_{1/3} \approx 1.27$ ）を示しており、強風作用下の海底勾配1/10の模型実験（村上ら；2022）、消波工設置断面における海底勾配1/30 の模型実験（姫野ら；2024）においても、同様の傾向が確認されている。一方、高橋ら（1999）は、堤防前面の勾配が1/40 程度、表法勾配1:4の緩傾斜護岸での現地観測において、 $R_{1/10}/R_{1/3} \approx 1.15$ 、 $R_{1/3}/R_{mean} \approx 1.26$ となり、近傍の波浪観測値の代表値間の比 $H_{1/10}/H_{1/3} \approx 1.27$ 、 $H_{1/3}/H_{mean} \approx 1.59$ よりうちあげ高代表値間の比が小さくなることを示している。

図-3.1.5.3にうちあげ高観測と同時刻の近傍の波浪観測値（虎杖浜、宮崎海岸）から上位1/10平均波高 $H_{1/10}$ 、平均波高 H_{mean} と有義波高 $H_{1/3}$ の関係を整理した。 $H_{1/10}/H_{1/3} \approx 1.27$ 、 $H_{1/3}/H_{mean} \approx 1.61$ となっており、レイリー分布から求まる比と概ね一致した。一方、観測で得られたうちあげ高代表値の関係を $R_{1/3}$ に対する比として整理したものを図-3.1.5.4及び図-3.1.5.5に示す。うちあげ高代表値間の比はそれぞれ $R_{2\%}/R_{1/3} \approx 1.26$ 、 $R_{1/10}/R_{1/3} \approx 1.17$ 、 $R_{1/3}/R_{mean} \approx 1.21$ となり、高橋ら（1999）の現地観測と同様に、波浪観測値の代表値間の比よりうちあげ高代表値間の比は小さかった。

うちあげ高代表値間の比に、堤防前面の海底勾配や表法勾配が与える影響を確認するため、 $R_{2\%}/R_{1/3}$ 、 $R_{1/10}/R_{1/3}$ に絞って、観測地点の中で海底が比較的急勾配である胆振海岸KP28.1（海底勾配1/40 程度、表法勾配1:5）及び宮崎海岸No.55（海底勾配1/80程度、表法勾配1:3）の観測結果を整理したものが図-3.1.5.6である。どちらの地点も、若干のばらつきはあるものの間瀬ら（2003）の海底勾配1/20 の模型実験での関係に近い。このことから、海底勾配や表法勾配が緩くなるとうちあげ高代表値間の比は間瀬ら（2003）の模型実験の結果より小さくなる傾向があることが示唆される。

一方、図-3.1.5.5で示した $R_{1/3}/R_{50\%} \approx 1.09$ は、ばらつきが小さく（平均平方二乗誤差：0.022）、地点による傾向の違いも見られなかったことから、今回の観測地点においてはこの関係を用いることで、 $R_{50\%}$ から $R_{1/3}$ を推定できることが分かる。

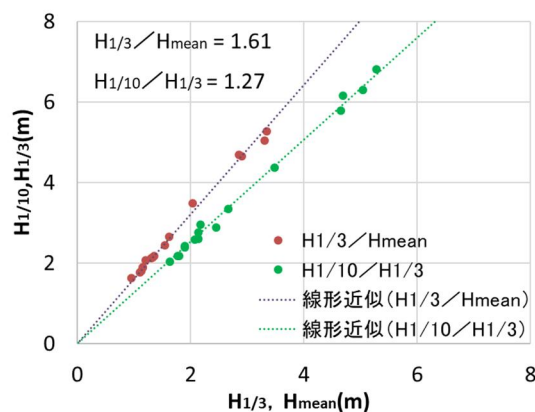


図-3.1.5.3 観測波高代表値の関係（虎杖浜、宮崎海岸）

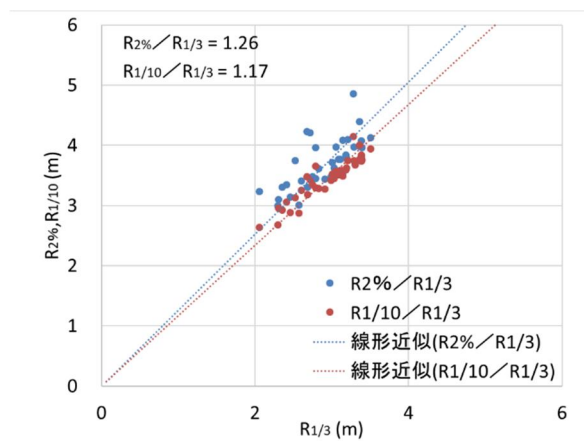


図-3.1.5.4 うちあげ高代表値の関係 ($R_{2\%}$, $R_{1/10}$ と $R_{1/3}$)

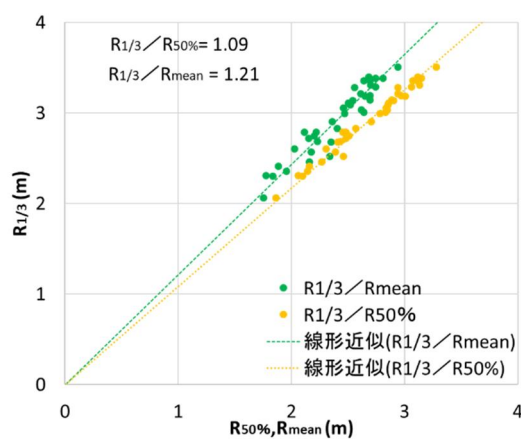


図-3.1.5.5 うちあげ高代表値の関係 ($R_{1/3}$ と $R_{50\%}$, R_{mean})

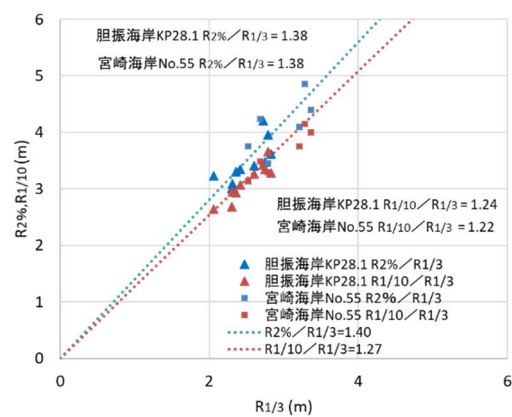


図-3.1.5.6 うちあげ高代表値の関係 ($R_{2\%}$, $R_{1/10}$ と $R_{1/3}$)
(胆振海岸 KP28.1, 宮崎海岸 No.55)

3) 観測値と既往算定方法で求まる算定値の比較

(A) 比較するうちあげ高代表値と算定方法

前述したとおり、うちあげ高観測地点の断面は一様な勾配ではないため、複雑な海底地形を考慮できる改良仮想勾配法をベースとした表-3.1.5.2の算定方法を比較対象とした。規則波を対象とした算定方法については、玉田ら（2009）が示した改良仮想勾配法で求まるうちあげ高が不規則波の上位50 %平均うちあげ高 $R_{50\%}$ に相当することを参考に、観測値の $R_{50\%}$ と比較することとした。また、算定に用いる碎波指標は、中村ら（1972）及び加藤ら（2010、2020）については合田（1975）の不規則波の碎波指標を用い、玉田ら（2009）及び改良IFORM（2019）についてはMase et al.（2013）による碎波指標を用いた。

表-3.1.5.2 比較対象のうちあげ高代表値と算定方法

うちあげ高 代表値	比較する算定方法	碎波指標
$R_{2\%}$	玉田らの式（改良IFORM）	Mase et al. (2013)
$R_{1/3}$	玉田らの式	
	改良IFORM	
$R_{50\%}$	改良仮想勾配法1/100	合田（1975）
	改良仮想勾配法	

(B) 観測値と各算定方法の比較方法

うちあげ高算定に用いた潮位は、近傍観測所（白老港、油津）における観測値を用いることで、潮位の予測誤差の影響を受けないようにした。検証対象のうちあげ高算定方法は断面2次元実験水路での実験結果から得られたものであるため、実海岸への適用では地形による平面的な波浪変形を考慮することが必要である。そこで、うちあげ高算定に用いる波浪については、気象庁で運用されている浅海波浪モデル（前章2.2.1）で推算されたうちあげ高観測地点に最も近い計算格子の有義波を用いた。近傍の観測地点（虎杖浜）と浅海波浪モデルの観測地点最寄りの格子点における同時刻の有義波高と有義波周期を比較した結果の一例を図-3.1.5.7に示す。観測値に対して、推算値は有義波高、周期ともに波高のピーク時刻では非常に良好な結果であるが、それ以外では若干乖離がある。そこで、近傍観測所における各時刻の観測波高と推算波高の比（胆振海岸：0.76～1.06、宮崎海岸：0.79～1.06）と観測周期と推算周期の比（胆振海岸：0.89～1.05、宮崎海岸：0.78～0.98）を用いて、うちあげ高観測地点に最も近い格子の波浪の推算値を補正した上で、うちあげ高を算定することにより、波浪の予測誤差の影響を少なくすることとした。

うちあげ高の観測値と各算定方法の算定値の比較にあたっては、観測されたうちあげ高代表値と前述の通り補正した波浪の推算値及び観測地点の断面を用いて、相対うちあげ高 R_{char}/H'_0 （ R_{char} は対応するうちあげ高代表値）及び改良仮想勾配 $\tan \beta$ を求め、各算定方法と比較した。

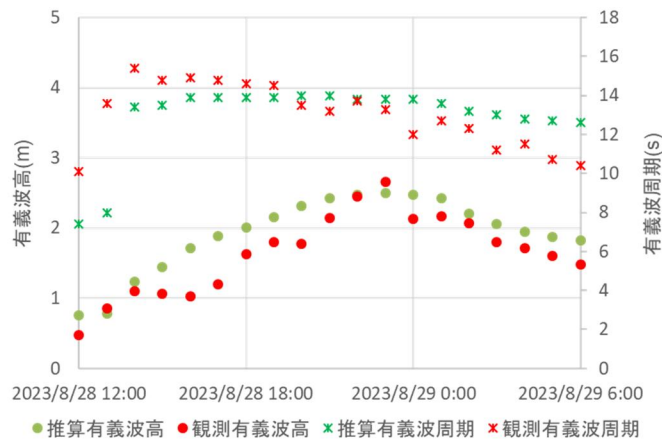


図-3.1.5.7 虎杖浜における観測値と推算値の比較（2023.8.28～29）

(C) 観測値と各算定方法の比較結果

a) 上位50%平均うちあげ高 $R_{50\%}$ の比較

規則波を対象とした算定方法である改良仮想勾配法及び改良仮想勾配法1/100の算定線と観測した $R_{50\%}$ から求めた相対うちあげ高及び改良仮想勾配を波形勾配別に比較したものが図-3.1.5.8～図-3.1.5.11である。改良仮想勾配法1/100の算定線の推定に用いたデータは $15 < \cot \beta < 60$ であるが、波形勾配が小さい図-3.1.5.8、図-3.1.5.9のケースは観測値が得られた概ね $10 < \cot \beta$ の範囲まで外挿して比較した。

全ケースとも改良仮想勾配法の算定線より相対うちあげ高が大きい結果となり、既往知見で示されている緩勾配海岸でのうちあげ高を過小評価することと一致する。また、砕波点から護岸法先までの海底勾配が1/80～1/60程度であった4地点のプロットは、胆振海岸KP3.4の波形勾配が0.04以上のケースと宮崎海岸No.55の波形勾配が0.022程度の2つのケースを除き、改良仮想勾配法1/100と概ね対応する結果となった。一方、海底勾配が1/40程度であった胆振海岸KP28.1のプロットは、改良仮想勾配法と改良仮想勾配法1/100の中間程度にプロットとなっている。以上のことから、観測地点の海底勾配が緩い方が相対うちあげ高が大きくなること、砕波点から護岸法先までの海底勾配が1/60程度より緩い場合は、加藤らの算定式が $10 < \cot \beta < 60$ の範囲で観測値の $R_{50\%}$ と概ね対応することがわかる。これは、改良仮想勾配法1/100が海底勾配1/100の海浜断面で計算した結果から得たものであり、その勾配に近い条件で算定式の適用性が高いためであると考えられる。

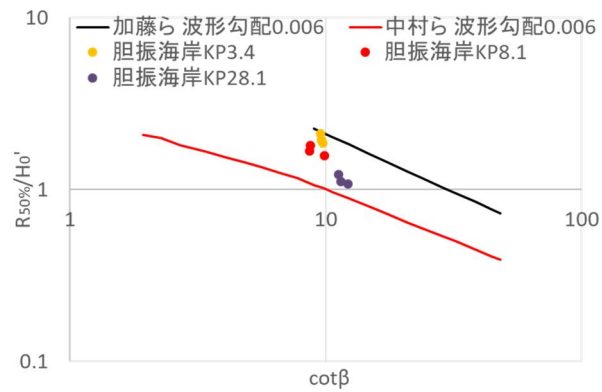


図-3.1.5.8 改良仮想勾配法（中村ら）、改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）と $R_{50\%}$ の比較
（波形勾配 0.005-0.007 のケース）

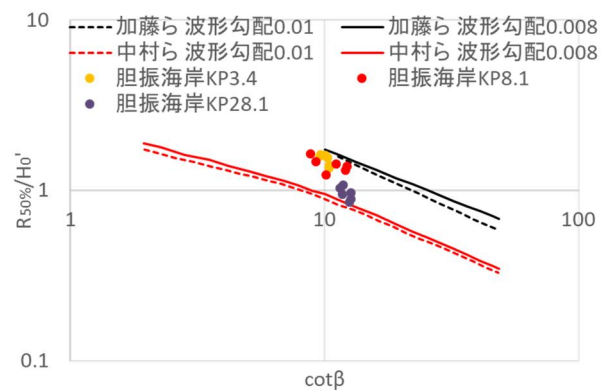


図-3.1.5.9 改良仮想勾配法（中村ら）、改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）と $R_{50\%}$ の比較
（波形勾配 0.008-0.011 のケース）

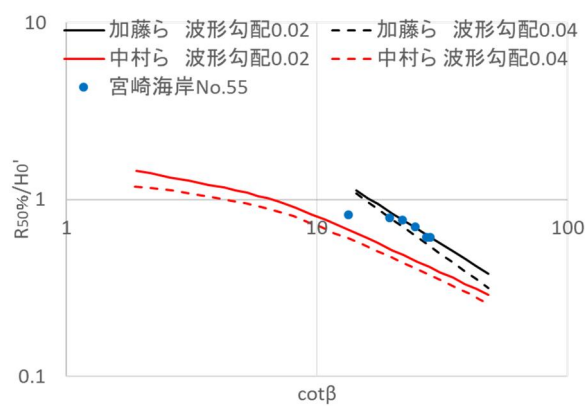


図-3.1.5.10 改良仮想勾配法（中村ら）、改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）と $R_{50\%}$ の比較
（波形勾配 0.021-0.028 のケース）

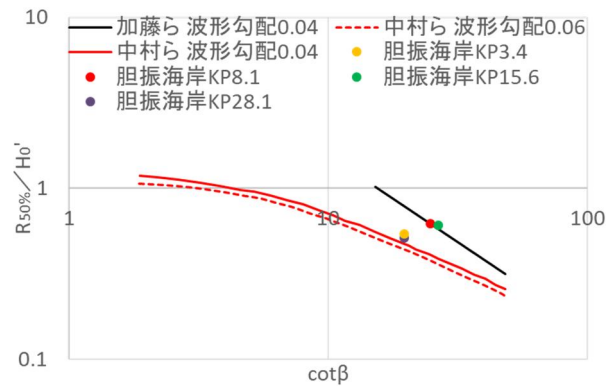


図-3.1.5.11 改良仮想勾配法（中村ら）、改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）と $R_{50\%}$ の比較
（波形勾配 0.044-0.047 のケース）

b) 上位1/3平均うちあげ高 $R_{1/3}$ の比較

玉田ら、改良IFORMの両算定式と観測値を比較するため、観測値 $R_{1/3}$ から求めた相対うちあげ高、及び改良仮想勾配から求めた碎波帯相似パラメータ ($\tan \beta / \sqrt{H'_0/L_0}$) を比較したものが図-3.1.5.12である。観測値と両算定式と比べると、海底勾配が1/40程度であった胆振海岸KP28.1では観測値から求めた相対うちあげ高が若干大きく、海底勾配が1/80～1/60程度であるその他の地点ではかなり大きい。これは、間瀬ら（2021）が示した、海底勾配が緩い実験条件における改良IFORM（2019）による越波流量の過小評価と整合する。また、玉田らの式は、海底勾配1/30～1/10の条件の実験結果に合うように導かれた算定式であるが、改良IFORMの $R_{2\%}$ と $R_{1/3}$ の関係をを用いた算定式と比べて、碎波帯相似パラメータが0.5以下となる場合に相対うちあげ高が小さく観測値との乖離が大きい。そこで、周期補正した場合の改良IFORMによる算定値と観測値を比較した。周期補正には、法先水深と換算沖波波高の比が1.0となる位置から陸側に向けて周期が線形的に増加し、汀線位置で最大となるように周期変化をモデル化した間瀬ら（2021）の算定図を用いた。間瀬らが示しているとおり、沖波に対する周期の最大倍率は、海底勾配の違いに応じて調整する必要があるため、海底勾配1/50を対象として経験的に設定したもの（1.5 倍）や、観測所の入射波数に対して実際に観測された波のうちあげ回数は55-82 %であったことを参考に、1.2 倍から2.0 倍以下の範囲で、算定値と観測値の回帰係数が1.0に近くなるよう設定した（胆振海岸KP28.1：1.2 倍、その他の地点：2.0 倍）。図-3.1.5.13に示すように、海底勾配に応じた最大倍率を設定し、周期補正を考慮することで、再現性が向上していることが分かる。観測値 ($R_{1/3}/H'_0$) と算定値 ($R_{1/3}/H'_0$) の平均平方二乗誤差は、周期補正前の0.54から周期補正を考慮すると0.18に向上した。

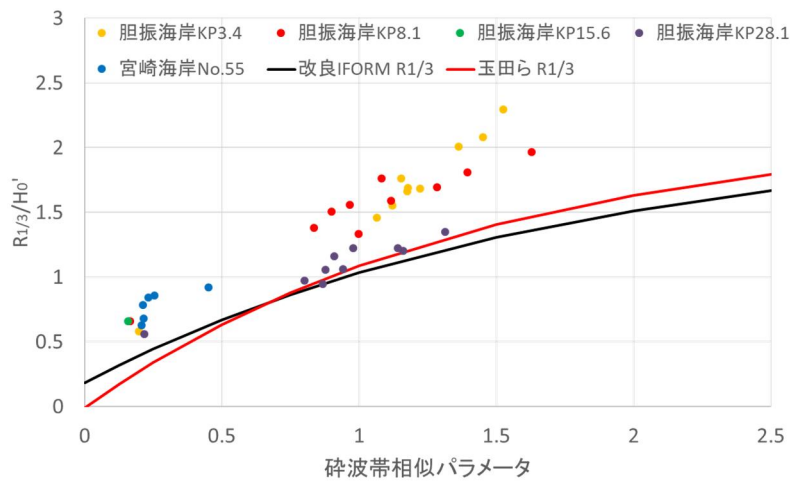


図-3.1.5.12 玉田らの式、改良 IFORM と $R_{1/3}$ の比較

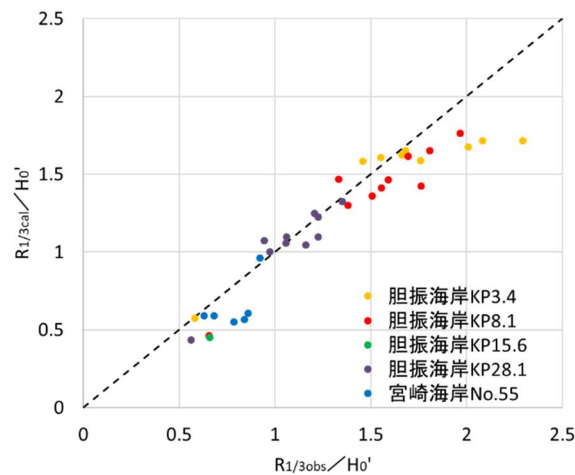


図-3.1.5.13 周期補正した改良 IFORM の算定値と観測値の比較 ($R_{1/3}$)

c) 上位2%平均うちあげ高 $R_{2\%}$ の比較

改良IFORMで求めた算定値と観測値を比較したのが図-3.1.5.14である。海底勾配が1/40程度であった胆振海岸KP28.1以外は、算定値が観測値より小さかった。そこで、前項と同じ最大倍率を用いて同様に比較したところ、観測値 ($R_{2\%}/H_0'$) と算定値 ($R_{2\%}/H_0'$) の平均平方二乗誤差は、周期補正前の0.42から周期補正を考慮すると0.29に向上し、図-3.1.5.15のように、 $R_{1/3}$ の比較結果と比べて、全体的に算定値が観測値より大きい傾向にあるが、観測値の過小評価が改善された。これは、うちあげ高代表値間の比 $R_{2\%}/R_{1/3}$ が、間瀬らの模型実験の結果より小さくなっていることが影響していると考えられる。

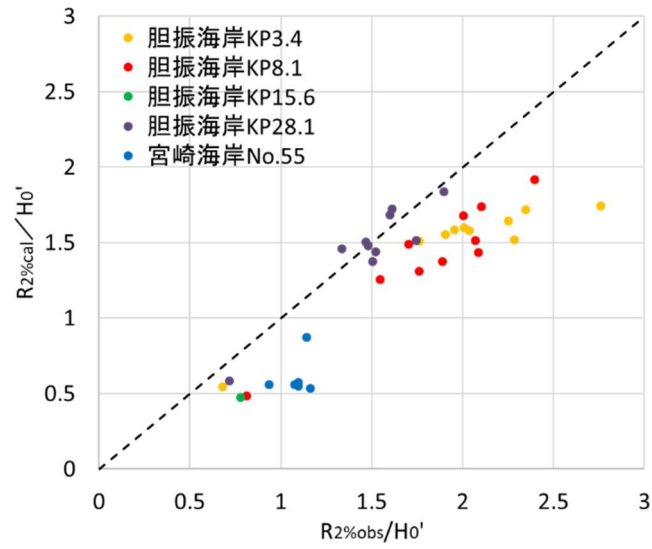


図-3.1.5.14 改良 IFORM の算定値と観測値の比較 ($R2\%$)

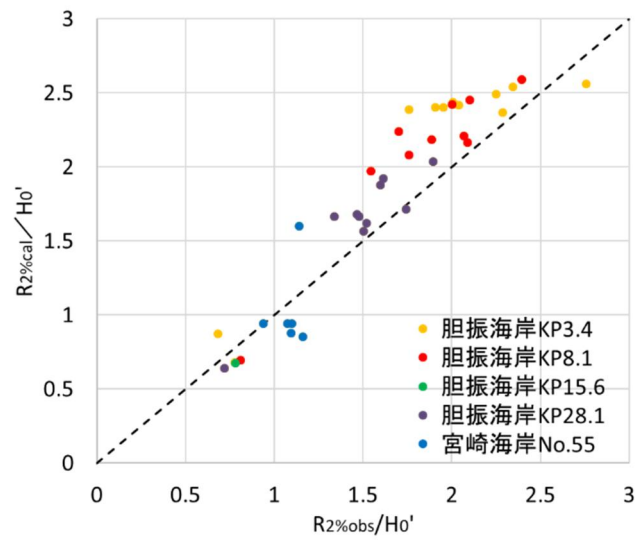


図-3.1.5.15 周期補正した改良 IFORM の算定値と観測値の比較 ($R2\%$)

(4) まとめ

本研究で得られた主要な知見を以下に示す。

- 波浪観測値の代表値間の比よりうちあげ高代表値間の比は小さく、海底勾配や表法勾配が緩くなるとうちあげ高代表値間の比は間瀬ら(2013)の模型実験の結果より小さくなる傾向がある。
- 観測値の $R_{1/3}/R_{50\%}$ は、ばらつきが小さく、地点による傾向の違いは見られなかったことから、今回の観測地点においては、この関係を用いることで $R_{50\%}$ から $R_{1/3}$ を推定できる。
- 砕波点から護岸法先までの海底勾配が $1/80 \sim 1/60$ 程度の地点は、改良仮想勾配法 $1/100$ の算定式が観測値の $R_{50\%}$ と概ね対応する。
- 改良IFORMの算定式に間瀬ら(2021)の周期補正を考慮することで、観測値($R_{2\%}$, $R_{1/3}$)に対する再現性が向上する。

3. 1. 6 まとめ

本節で得られた成果は以下の通りである。

- ・平成 21 年（2009 年）台風第 18 号の接近時に、うちあげ高が海岸堤防の天端高を超える予測となった愛知県内の伊勢湾沿岸の 8 地点を対象に、うちあげ高予測を越波の実態と比較した結果、2 地点でうちあげ高が過大に予測され、その原因が潮位の過大予測にあることを確認した。また、同接近時における三重県の伊勢湾西南海岸でのうちあげ高観測結果との比較により、海底勾配 1/300 程度の伊勢湾西南海岸ではうちあげ高算定式として改良仮想勾配法 1/100 が最適であることを確認した。
- ・平成 30 年（2018 年）台風第 21 号において、痕跡値が得られている 7 地点を対象に、うちあげ高の再現計算を実施し、痕跡値とうちあげ高算定値を比較した。6 地点については、痕跡値と算定値の差は 1m 以内に収まり概ね整合した。痕跡値と算定値の差が 1m を超えた 1 地点については、算定値が痕跡値に比べてやや過大となったが、潮位及び波高の過大予測に起因するものであることを確認した。また、大規模な浸水被害が生じた芦屋市涼風町については、台風中心コースの気象庁の予測値を元にリードタイムを検討したところ、概ね 1 日前には浸水の危険性を把握することが可能であることが分かった。
- ・令和元年（2019 年）東日本台風（台風第 19 号）の接近時における駿河海岸と西湘海岸周辺を対象に、うちあげ高予測の精度検証を行った。駿河海岸のうちあげ高は、改良仮想勾配法 1/30 や玉田らの式 $R_{1/3}$ では過小に予測され、玉田らの式（上位 2%）による推算値が観測値とほぼ一致した。一方、西湘海岸周辺のうちあげ高は、小田原海岸、二宮海岸、平塚海岸で予測のピーク値が痕跡高の計測値とほぼ一致したが、改良仮想勾配法 1/100 を用いていた大磯海岸では過大に予測された。大磯海岸では、玉田らの式 $R_{2\%}$ を用いることで痕跡高に近い推算値が得られた。
- ・平成 28 年（2016 年）1 月から令和 5 年（2023 年）8 月までの間に発生した越波事例 24 ケースを収集し、越波実態に対して、規則波のうちあげ高が海岸堤防の天端高を超える予測となるか検証を実施した。16 ケースについては、天端高を超える予測となっており、現地の越波実態を的確に捉えているとともに、6 ケースについては、天端高-1.0m をを超える予測となっており、越波の危険性の高まりを表現できていた。天端高-1.0m を下回る予測であった 2 ケースについても、不規則波を対象とした玉田らの式 $R_{2\%}$ を算出したところ、いずれも天端高を超える結果となり、越波が発生していた実態を再現できることを確認した。

・令和4年（2022年）～令和5年（2023年）の高波浪時に緩勾配の海底勾配を有する5海岸で、うちあげ高の現地観測を行い、定量的な精度検証を実施した。その結果、砕波点から護岸法先までの海底勾配が1/80～1/60程度の地点は、改良仮想勾配法1/100の算定式が観測値の $R_{50\%}$ と概ね対応すること、改良IFORMの算定式に間瀬ら（2021）の周期補正を考慮することで、観測値（ $R_{2\%}$ 、 $R_{1/3}$ ）に対する再現性が向上することが分かった。また、観測値の $R_{1/3}/R_{50\%}$ は、ばらつきが小さく、地点による傾向の違いは見られなかったことから、今回の観測地点においては、この関係を用いることで $R_{50\%}$ から $R_{1/3}$ を推定できることが分かった。

以上をまとめると、定量的な検証を通じて、図-2.3.3.3 に示した各算定方法の使い分け（海底勾配の違い）を踏まえて選定されたうちあげ高算定方法に適切な潮位・波浪予測値を入力することにより、各うちあげ高代表値を一定の精度で予測できることが分かる。これらの成果から、必ずしも定量的な検証事例は多くはないが、越波実態や遡上痕跡に対する多岐に亘る検証事例も踏まえると、各算定方法とうちあげ高代表値の対応関係は表-3.1.6.1 に整理することができる。

表-3.1.6.1 各うちあげ高算定方法とうちあげ高代表値の対応関係

うちあげ高代表値	海底勾配		
	1/30 より急	1/50-1/40 程度	1/60 程度より緩い
$R_{2\%}$	玉田らの式 $R_{2\%}$ 改良 IFORM $R_{2\%}$	改良 IFORM $R_{2\%}$ （周期補正考慮）	
$R_{1/3}$	玉田らの式 $R_{1/3}$ 改良 IFORM $R_{1/3}$	改良 IFORM $R_{1/3}$ （周期補正考慮） $R_{50\%} \times 1.09$	
$R_{50\%}$ （規則波のうちあげ高）	改良仮想勾配法	改良仮想勾配法と 改良仮想勾配法 1/100 の中間	改良仮想勾配法 1/100

3. 2 予測に用いるうちあげ高算定方法の精度検証

本節では、前節での検証結果を踏まえて、新たな高潮の予報・警報に用いる前章で述べた波浪うちあげ高予測システムの予測手法に対して、海岸管理者等の協力を得て収集した越波により被害があった事例及び近年高潮・高波の被害の調査から遡上痕跡が得られた事例について、再整理した精度検証の内容をまとめる。3. 1. 4 では、越波事例に対する精度検証を示したが、規則波のうちあげ高の算定方法の評価にとどまっており、本節では、どのようなうちあげ高代表値が天端高を越える算定結果となるかに着目し、予測に用いる算定方法を整理する。

整理にあたっては、海底勾配に応じた表-3. 1. 6. 1 に示す対応関係を確認するため、表法先から砕波点までの勾配が急な海岸（概ね 1/30 より急）と緩やかな海岸（概ね 1/30 より緩い）で大別し、地点毎に複数確認されている越波被害や遡上痕跡が確認されたものを整理することで、各地点の予測に用いるうちあげ高算定方法の評価することとした。なお、前節でも示したように、潮位や波浪の予測値の過大・過小評価の影響がうちあげ高の算定に大きな影響を与えることから、台風の進路予測による誤差の影響を少なくするため、直近予測を用いることに加えて、潮位・波浪観測値が得られた事例のうち、観測値と予測値の乖離が大きかった一部の事例は、乖離を補正することにより、うちあげ高算定方法の評価ができるようにした。前節での検証結果から比較対象とした算定式を表-3. 2. 1 に示す。なお、 $R_{1/3}$ については、表法先から砕波点までの勾配が急な海岸は玉田らの式（一部、改良 IFORM）を用いて算定し、緩やかな海岸については表に示す 2 通りの手法で算定した。検証対象事例及び検証に用いた潮位、波浪の予測値を表-3. 2. 2 と表-3. 2. 3 に示す。

表-3. 2. 1 各うちあげ高算定方法とうちあげ高代表値の対応関係

うちあげ高代表値	海底勾配		
	1/30 より急	1/50-1/40 程度	1/60 程度より緩い
$R_{2\%}$	玉田らの式（改良 IFORM） $R_{2\%}$	改良 IFORM $R_{2\%}$ （周期補正考慮）	
$R_{1/3}$	玉田らの式（改良 IFORM） $R_{1/3}$	改良 IFORM $R_{1/3}$ （周期補正考慮） $R_{50\%} \times 1.09$	
$R_{50\%}$ （規則波のうちあげ高）	改良仮想勾配法	改良仮想勾配法と 改良仮想勾配法 1/100 の中間	改良仮想勾配法 1/100

表-3.2.2 表法先から砕波点までの勾配が急な事例（3. 2. 1）

番号	対象海岸	対象地点	表法先から砕波点までの勾配	対象擾乱	用いる予測値		観測値補正に用いた観測所		検証対象	備考
					潮位	波浪	潮位	波浪		
(1)	清水海岸	静岡市清水区三保地先	1/10程度	2017年台風21号	高潮モデル	沿岸波浪モデル	清水港	久能	越波実績	
				2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	越波実績	
(2)	小田原海岸	小田原市国府津地先	1/10程度	2017年台風21号	高潮モデル	沿岸波浪モデル	小田原港	-	越波実績	
				2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	越波実績	
(3)	尼崎西宮芦屋浜港海岸	芦屋市涼風町地先	1/10程度	2018年台風21号	高潮ガイダンス	浅海波浪モデル	-	-	越波実績、遡上痕跡	
(4)	嘉手納海岸	嘉手納町水釜地先	1/20程度	2018年台風24号	高潮モデル	沿岸波浪モデル	-	-	越波実績	
(5)	横浜港海岸	横浜市金沢区榑浦地先	1/30程度	2019年台風15号	高潮ガイダンス	浅海波浪モデル	-	-	越波実績、遡上痕跡	越波流量の検証
(6)	二宮海岸	二宮町二宮地先	1/20程度	2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	遡上痕跡	
(7)	岡田漁港海岸	泉南市りんくう南浜地先	1/20程度	2018年台風21号	高潮ガイダンス	浅海波浪モデル	-	-	遡上痕跡	

表-3.2.3 表法先から砕波点までの勾配が緩い事例（3. 2. 2）

番号	対象海岸	対象地点	表法先から砕波点までの勾配	対象擾乱	用いる予測値		観測値補正に用いた観測所		検証対象	備考
					潮位	波浪	潮位	波浪		
(1)	胆振海岸	苫小牧市有明地先	1/70程度	2016年台風10号	高潮モデル	浅海波浪モデル	白老港	虎杖浜	越波実績	
		苫小牧市錦町地先	1/80程度	2016年台風10号	高潮モデル	浅海波浪モデル	白老港	虎杖浜	越波実績	
		白老町社台地先	1/70程度	2016年台風10号	高潮モデル	浅海波浪モデル	白老港	虎杖浜	越波実績	
		白老町北吉原地先	1/50程度	2016年台風10号	高潮モデル	浅海波浪モデル	白老港	虎杖浜	越波実績	
(2)	三浦海岸	三浦市下浦町上田宮地先	1/70程度	2017年台風21号	高潮モデル	浅海波浪モデル	-	-	越波実績	
		三浦市南下浦町菊名地先	1/80程度	2017年台風21号	高潮モデル	浅海波浪モデル	-	-	越波実績	
(3)	駿河海岸	焼津市下小杉地先	1/70程度	2017年台風21号	高潮モデル	沿岸波浪モデル	焼津	駿河海洋沖	越波実績	離岸堤考慮
		焼津市田尻地先	1/70程度	2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	駿河海洋沖	越波実績	離岸堤考慮
		焼津市田尻地先	1/40程度	2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	越波実績、観測	
(4)	焼津大崩海岸	焼津市小浜地先	1/80程度	2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	駿河海洋沖	越波実績	離岸堤考慮
(5)	高知海岸	高知市春野町東諸木地先（戸原）	1/60程度	2017年台風21号	高潮モデル	沿岸波浪モデル	萩岬	戸原	越波実績	
				2018年台風19・20号	高潮モデル	沿岸波浪モデル	-	戸原	越波実績	
				2018年台風21号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	戸原	越波実績	
(6)	大磯海岸	大磯町東小磯地先	1/50程度	2017年台風21号	高潮モデル	浅海波浪モデル	小田原	-	越波実績	
				2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	越波実績、遡上痕跡	
(7)	平塚海岸	平塚市龍城ヶ丘地先	1/50程度	2019年台風19号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	遡上痕跡	
(8)	周参見漁港海岸	すさみ町周参見地先	1/100程度	2018年台風21号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	串本	-	遡上痕跡	
(9)	白浜海岸	白浜町中地先	1/70程度	2018年台風21号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	遡上痕跡	
(10)	日高港海岸	美浜町大字濱ノ瀬地先	1/70程度	2018年台風21号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	御坊	-	遡上痕跡	
(11)	二色港海岸	貝塚市澤地先	1/70程度	2018年台風21号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	遡上痕跡	
(12)	神戸港海岸	神戸市須磨区須磨浦通地先	1/50程度	2018年台風21号	高潮ガイダンス	沿岸波浪モデル	-	-	遡上痕跡	

3. 2. 1 表法先から砕波点までの勾配が急な海岸での検証

(1) 清水海岸における検証

2017 年台風第 21 号は、**図-3. 1. 4. 2** の経路で静岡県御前崎市に上陸後、駿河湾を北上し、駿河湾西岸に位置する清水海岸には高い波浪が来襲し、消波堤等の被災が確認されるとともに、**写真-3. 2. 1. 1** に示すように天端高 T.P.+12.0m の堤防を波が越え、堤防背後 20m 程度に位置する家屋付近まで越波による被害が確認された。

また、3. 1. 3 で示したとおり、2019 年台風第 19 号では、駿河海洋観測所において、既往最大に匹敵する有義波高 8.6 m、有義波周期 13.8 s を観測するとともに、清水海岸においても**写真-3. 2. 1. 2** に示すように、堤内地への越波による浸水や砂の飛散等が確認された。

両事例に対して、どのうちあげ高代表値が天端高を越えるか精度検証を実施した。



写真-3. 2. 1. 1 2017 年台風第 21 号での清水海岸における越波被害（静岡県提供）



写真-3. 2. 1. 2 2019 年台風第 19 号での清水海岸における越波被害（静岡県提供）

① 2017 年台風第 21 号

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.1.1 に示す。規則波のうちあげ高算定値のピークは天端高より低いのが、玉田らの式による $R_{1/3}$ や $R_{2\%}$ の算定値は、天端高を越えていた。しかし、 $R_{1/3}$ の算定値は天端高と同程度である。そこで、潮位・波浪の観測値で補正し再現計算を実施した結果を図-3.2.1.2 に示す。玉田らの算定式による $R_{1/3}$ の算定値のピークも天端高を 2m 程度越えており、堤防背後に至る越波被害が、 $R_{1/3}$ のうちあげ高代表値を用いることで再現できることが確認できた。

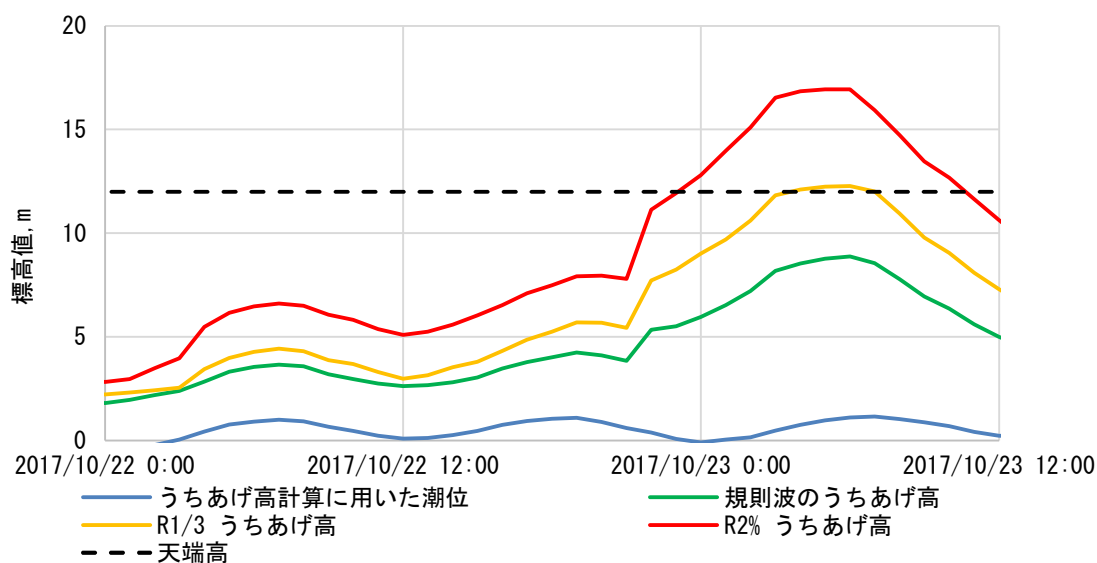


図-3.2.1.1 うちあげ高再現計算結果（清水海岸、2017 年台風第 21 号）

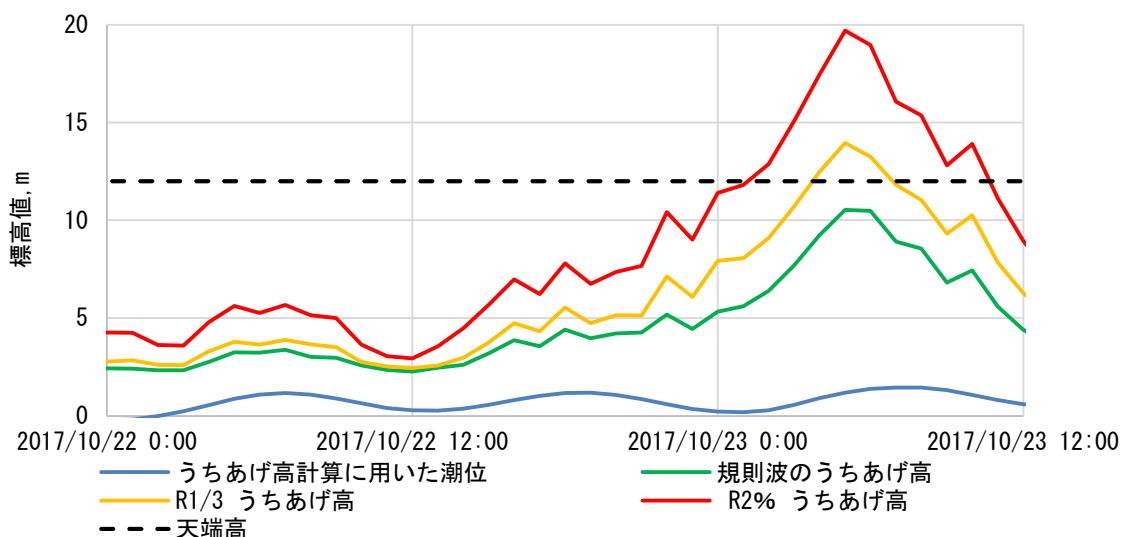


図-3.2.1.2 潮位・波浪の観測値を補正したうちあげ高再現計算結果
（清水海岸、2017 年台風第 21 号）

② 2019 年台風第 19 号

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.1.3 に示す。規則波のうちあげ高算定値のピークは、天端高より 1m 程度低いが、玉田らの式による $R_{1/3}$ 及び $R_{2\%}$ は天端高を越えていた。堤防背後に至る越波被害が、 $R_{1/3}$ より大きいうちあげ高算定値を用いることで再現出来ることが確認できた。

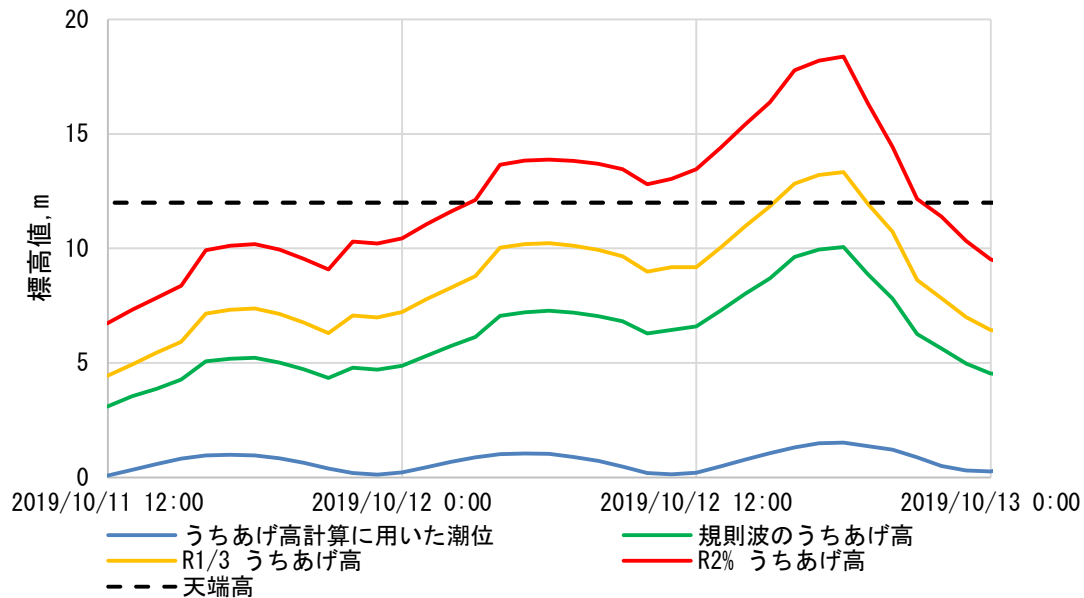


図-3.2.1.3 うちあげ高再現計算結果（清水海岸、2019 年台風第 19 号）

③ まとめ

清水海岸においては、越波事例 2 事例に対する検証の結果、適切な潮位・波浪の予測値を用いて、玉田らの $R_{1/3}$ のうちあげ高を算定することで、越波被害を再現できることが出来た。一方で、前述したとおり、2017 年台風第 21 号については、図-3.2.1.1 に示すとおり、潮位や波浪の観測値による補正を実施していない場合は、 $R_{1/3}$ のうちあげ高は天端高と同程度の結果となった。このため、算定に用いる潮位や波浪の予測誤差の影響も考慮すると、より高いうちあげ高代表値（ $R_{2\%}$ 、 $R_{1/10}$ 等）を用いることも考えられる。

以上のことから、沖合の波浪や潮位の予測精度が高いことを前提としつつ、清水海岸においては、 $R_{50\%}$ に対応する改良仮想勾配法の規則波のうちあげ高ではなく、波の不規則性を考慮した波のうちあげ高の算定方法を選択することが必要であると考えられる。

(2) 小田原海岸における検証

2017 年台風第 21 号は、駿河湾に加え、相模湾においても、越波による浸水や背後の家屋被害をもたらした。**写真-3.2.1.3**に当日の越波状況や越波による背後地の被害状況を示す。

また、3. 1. 3の検証では、2019 年台風第 19 号において、玉田らによる $R_{1/3}$ のうちあげ高が、台風通過後に実施された遡上痕跡の計測結果（Shimozono et al., 2020）を概ね再現できることが確認されている。一方、**写真-3.2.1.4**に示すように、10 月 12 日の 16 時～17 時頃には堤防を越える越波が確認されており、越波による背後地の被害が生じた。そこで、改めてどのうちあげ高代表値が天端高を越えるか検証を実施した。



写真-3.2.1.3 越波状況及び越波による被害状況（神奈川県提供）



写真-3.2.1.4 2019 年 10 月 12 日 16 時～17 時頃の越波状況（神奈川県提供）

① 2017 年台風第 21 号

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.1.4 に示す。規則波のうちあげ高算定値のピークは、天端高より 2m 程度低い。玉田らの式による $R_{1/3}$ 及び $R_{2\%}$ は、10 月 23 日 6 時頃に最大となり天端高を越えていた。ピーク時刻付近でやや潮位予測値が過大傾向であったため、潮位の観測値で補正し再現計算を実施した結果を図-3.2.1.5 に示す。堤防背後に至る越波被害が、 $R_{1/3}$ のうちあげ高を用いることで再現出来ることが確認できた。

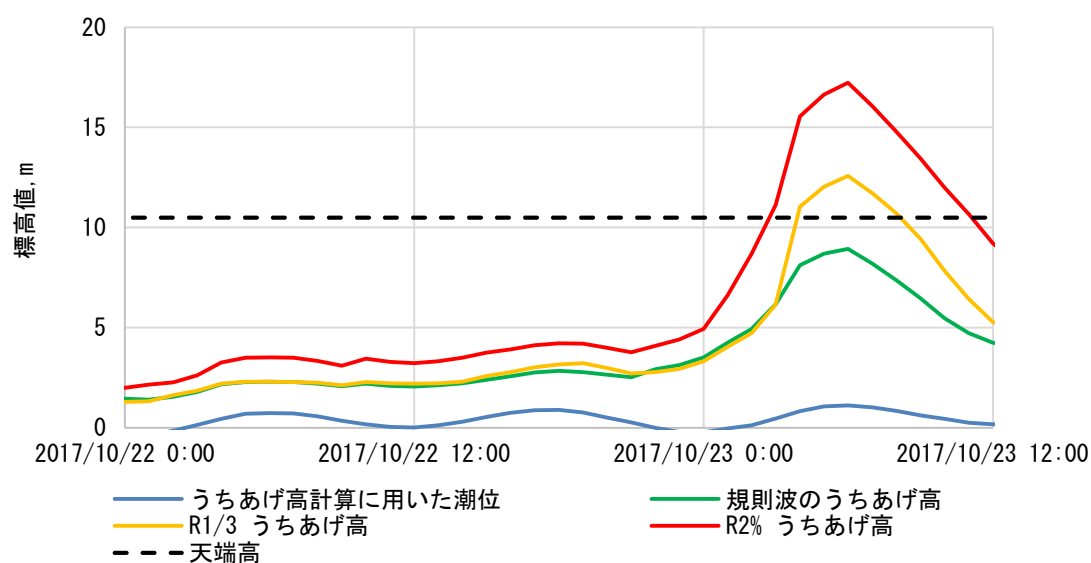


図-3.2.1.4 うちあげ高再現計算結果（小田原海岸、2017 年台風第 21 号）

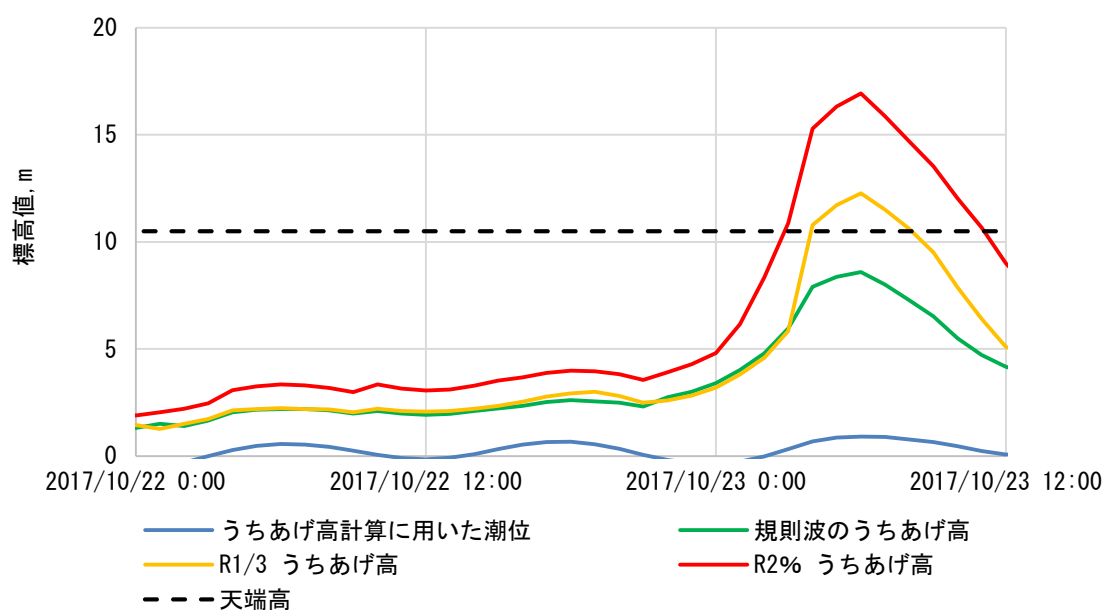


図-3.2.1.5 潮位・波浪の観測値を補正したうちあげ高再現計算結果
（小田原海岸、2017 年台風第 21 号）

② 2019 年台風第 19 号

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.1.6 に示す。規則波のうちあげ高算定値のピークは、天端高より 1m 程度低いが、玉田らの式による $R_{1/3}$ 及び $R_{2\%}$ は、10 月 12 日 18 時頃に最大となり天端高を越えていた。堤防背後に至る越波被害が、 $R_{1/3}$ のうちあげ高を用いることで再現出来ることが確認できるとともに、写真-3.2.1.4 に示す越波の時刻（10/13 16～17 時頃）のうち、17 時の予測値は天端高を超えていた。

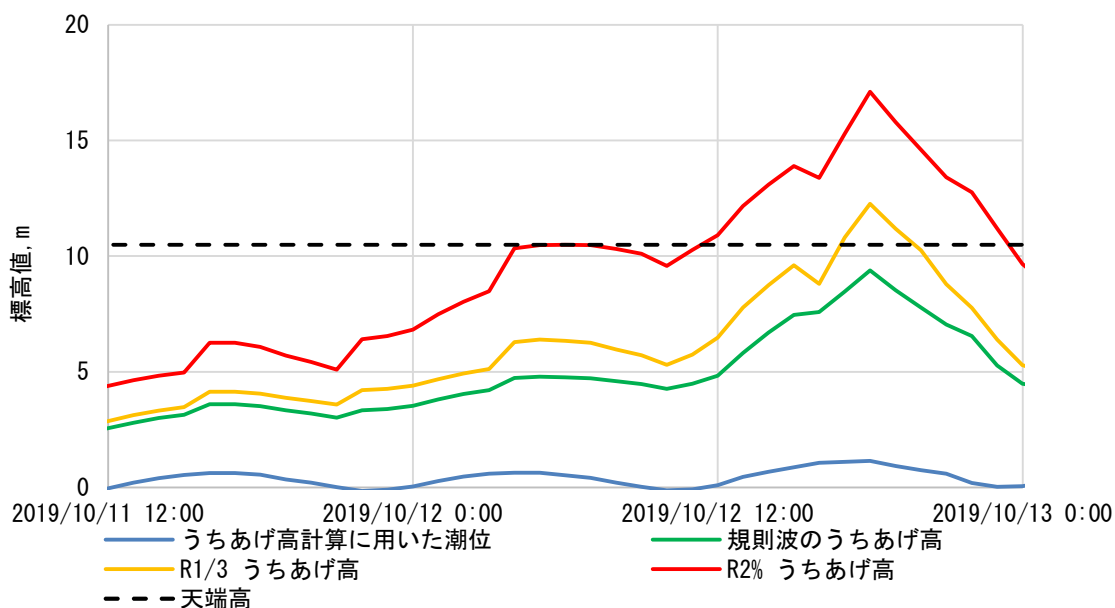


図-3.2.1.6 うちあげ高再現計算結果（小田原海岸、2019 年台風第 19 号）

③ まとめ

小田原海岸においては、越波事例 2 事例に対する検証の結果、適切な潮位・波浪の予測値を用いて、 $R_{1/3}$ のうちあげ高を算定することで、越波被害を再現できることが出来た。一方で、2019 年台風第 19 号の事例においては、カメラ映像で越波が確認されている時刻に $R_{1/3}$ の算定値が天端高を越えていた。

以上のことから、小田原海岸においては、 $R_{50\%}$ に対応する改良仮想勾配法の規則波のうちあげ高ではなく、波の不規則性を考慮した算定方法でうちあげ高を予測することが必要であると考えられる。

(3) 尼崎西宮芦屋浜港海岸における検証

2018 年台風第 21 号では、3. 1. 2 で示したとおり、南芦屋浜背後に位置する芦屋市涼風町において、9 月 4 日 14～15 時頃、越波により浸水被害（写真-3. 2. 1. 5）が発生した。ここでは、玉田らの式による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ の計算結果も含め再整理した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3. 2. 1. 7 に示す。規則波のうちあげ高は 14-16 時に、 $R_{1/3}$ は 14-17 時に、 $R_{2\%}$ は 14-18 時に天端高を越え、越波を再現している。以上のことから、 $R_{50\%}$ に相当する改良仮想勾配法の規則波のうちあげ高が現地で越波による浸水が発生した時刻（14-15 時）をもっとも的確に再現していることが分かる。



写真-3. 2. 1. 5 南芦屋浜における浸水状況
(大阪湾港湾等における高潮検討委員会資料 (2018))

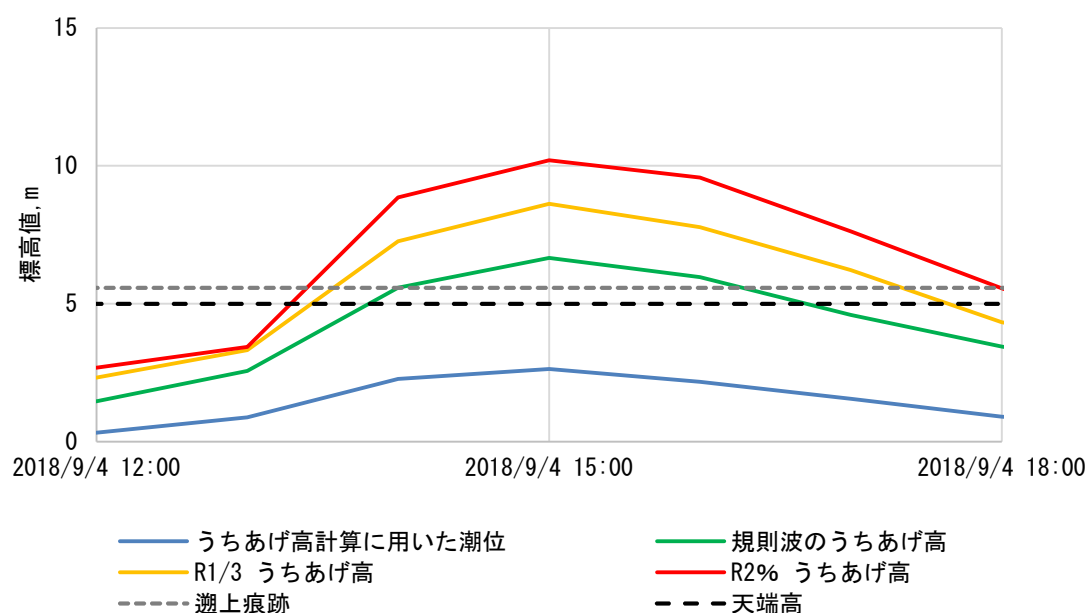


図-3. 2. 1. 7 うちあげ高再現計算結果（尼崎西宮芦屋浜港海岸、2018 年台風第 21 号）

(4) 嘉手納海岸における検証

2018 年 9 月 29 日、台風第 24 号が沖縄地方を通過したことに伴い、沖縄本島で浸水被害が各地で生じた。嘉手納町水釜地先においては、堤防の損壊が発生するとともに、越波により背後の家屋被害や浸水被害が発生した。(写真-3.2.1.6)

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.1.8 に示す。規則波のうちあげ高、玉田らの式による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、いずれもが天端高を越え、越波を再現している。

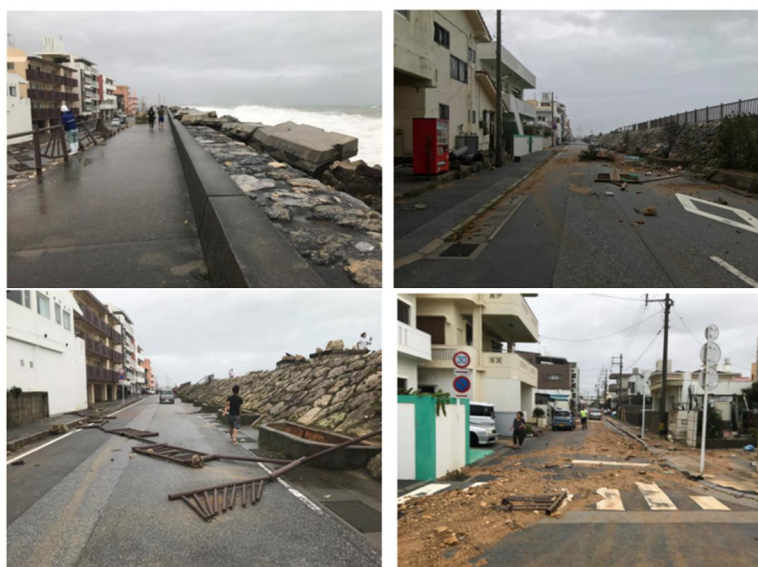


写真-3.2.1.6 嘉手納町水釜における被害状況（沖縄県提供）

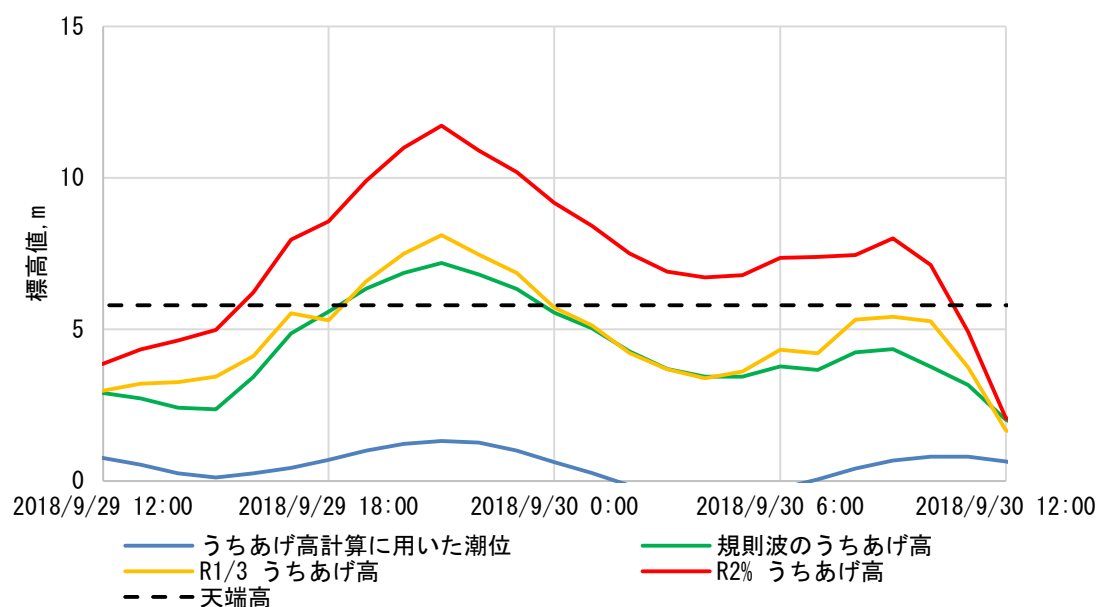


図-3.2.1.8 うちあげ高再現計算結果（嘉手納海岸、2018 年台風第 24 号）

(5) 横浜港（金沢区福浦地区）における検証

2019 年台風第 15 号は、9 月 9 日に三浦半島から東京湾を通り千葉県に上陸し、横浜市金沢区では顕著な越波被害が発生した。東京湾における高波対策検討委員会（第 1 回）資料（2019）によると、護岸が崩壊するとともに、護岸を海水が越波し、遡上痕跡は T.P.+10.9m 程度に及んだ。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.1.9 に示す。当該地点は、法先水深が深い
ため、各うちあげ高算定方法の適用範囲である時間帯のみ表示している。規則波のうちあげ高、玉田らの式による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、いずれもが天端高を越え、越波を再現している。また、 $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値の最大値（T.P.+12.3m）は遡上痕跡よりやや高いが、その差は 1.5m 程度であり、一定の再現性を有していると考えられる。当該地点は、護岸の設置水深が 4m 程度と比較的大きいため、越波流量の予測精度も検証した。越波流量での再現計算結果を図-3.2.1.10 に示す。両手法とも、背後地の重要度に応じて設定される許容越波流量を参考として $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ や $0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ と比較したところ、田中らの算定式では $0.05 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ を、高山らの算定プログラムでは $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ を一定時間越えており、背後で浸水が発生した状況を再現出来ることが分かる。当該地点の前面には防波堤等の遮蔽域は無い
ため、図-2.3.3.3 に示す使い分けから、高山らの算定プログラムを用いることが考えられるが、その場合には、越波流量が $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ との比較により、越波被害を再現できることが分かる。

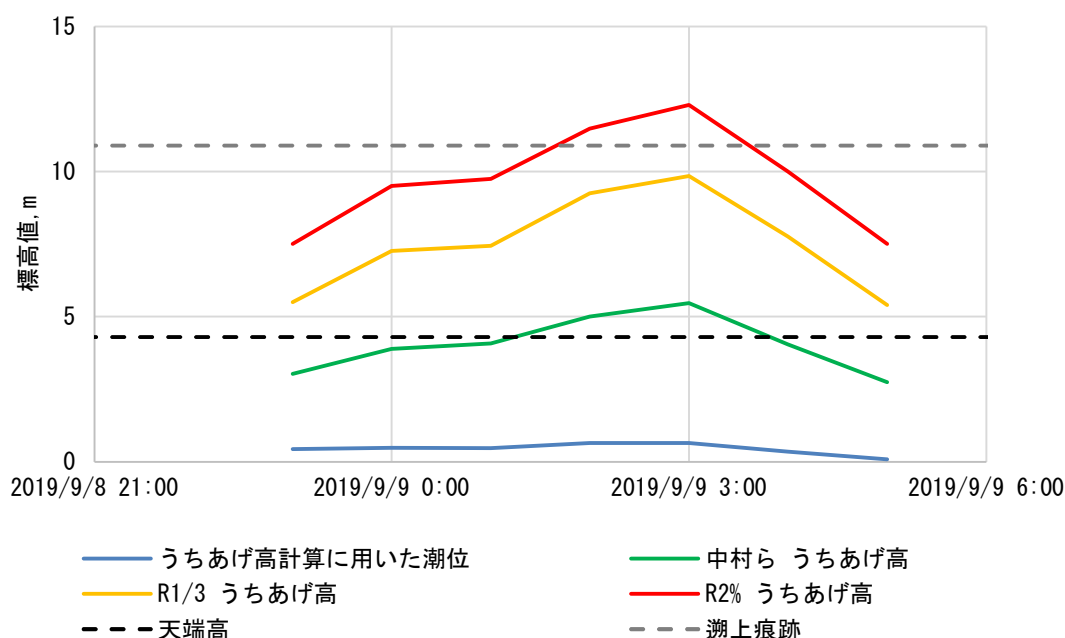


図-3.2.1.9 うちあげ高再現計算結果（横浜港（金沢区福浦地区）、2019 年台風第 15 号）

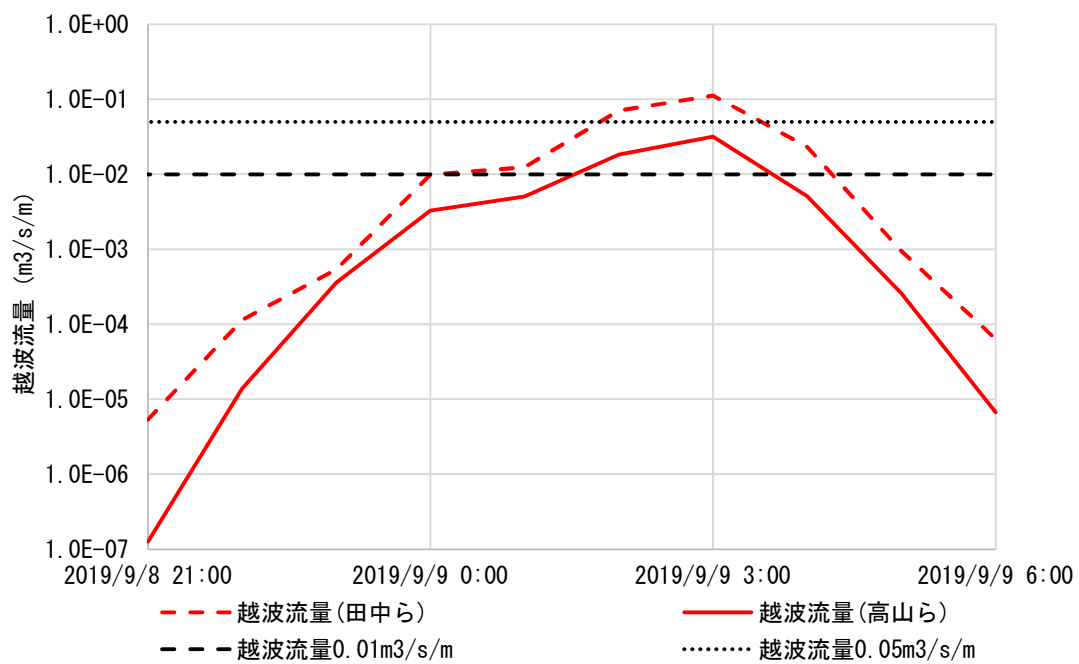


図-3.2.1.10 越波流量再現計算結果（横浜港（金沢区福浦地区）、2019年台風第15号）

(6) 二宮海岸における検証

3. 1. 3 の検証では、玉田らによる $R_{1/3}$ のうちあげ高が、台風通過後に実施された遡上痕跡の計測結果（Shimozono et al., 2020）を概ね再現出来ることが確認されている。本項では、潮位について、より精度の高い高潮ガイダンスを用いたうちあげ高算定値と沿岸方向に概ね 1km の範囲に確認された痕跡を再整理して比較した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3. 2. 1. 11 に示す。遡上痕跡の最大値を玉田らの式による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値がやや越えているが、一定の再現性が得られている。 $R_{50\%}$ に対応する改良仮想勾配法の規則波のうちあげ高、 $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、痕跡値と比べ若干低い傾向がある。遡上痕跡が概ね最大の遡上高に対応すると考えると、この結果は妥当であると考えられる。

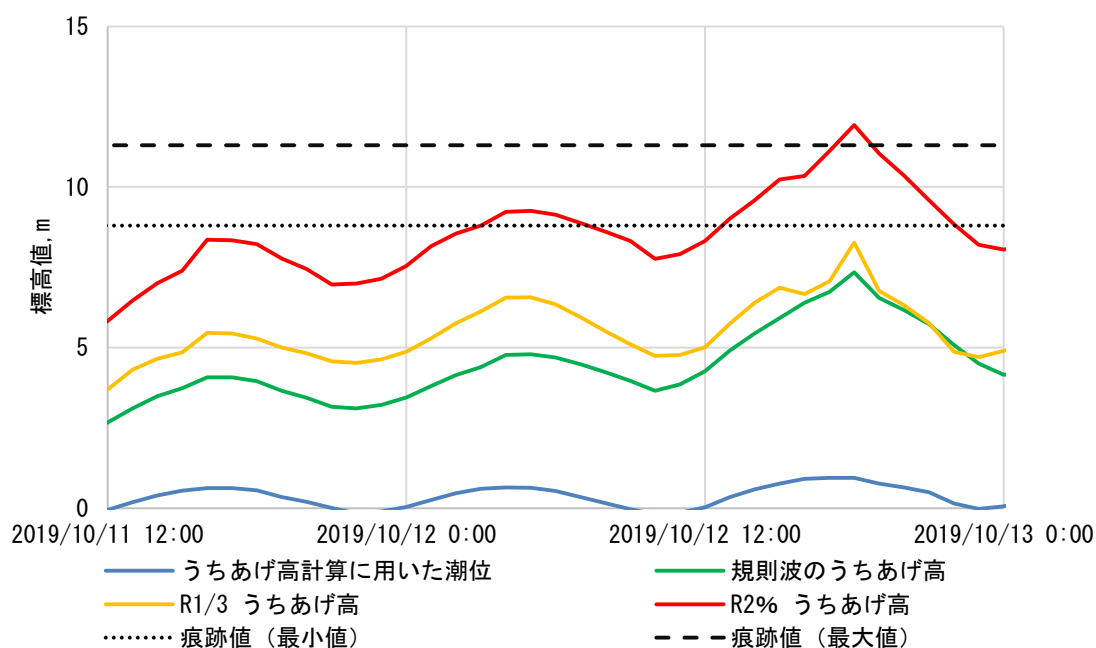


図-3. 2. 1. 11 うちあげ高再現計算結果（二宮海岸、2019 年台風第 19 号）

(7) 岡田漁港海岸における検証

3. 1. 2 の検証では、規則波を対象とした算定方法で得られたうちあげ高算定値が越波痕跡と同程度であったことを確認したが、改良 IFORM による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ も含めて再検証を実施した。なお、越波痕跡は、沿岸方向に概ね 1km の範囲に確認された痕跡を再整理して比較した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3. 2. 1. 12 に示す。遡上痕跡の最大値と最小値の間に、規則波のうちあげ高、 $R_{1/3}$ のうちあげ高のピークがあり、 $R_{2\%}$ のうちあげ高の算定値は、30cm 程度痕跡より大きい傾向にあるが、一定の再現性が得られていると評価できる。

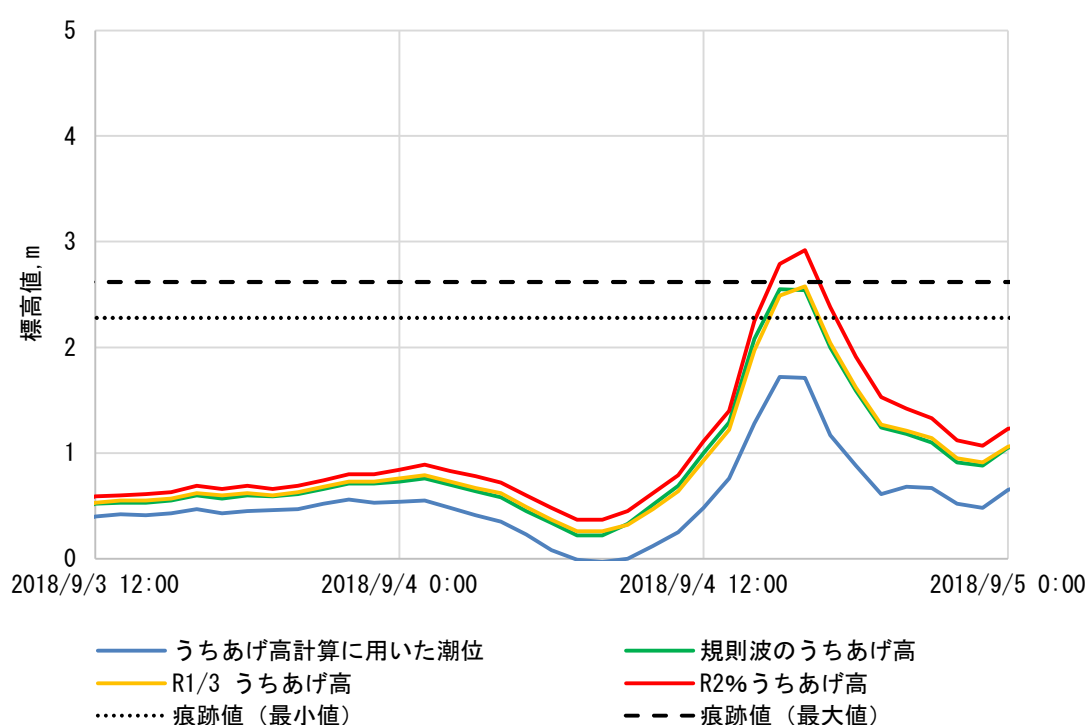


図-3. 2. 1. 12 うちあげ高再現計算結果 (岡田漁港海岸、2018 年台風第 21 号)

3. 2. 2 表法先から砕波点までの勾配が緩い海岸での検証

(1) 胆振海岸における検証

2016年8月に発生した台風第10号では、胆振・日高地方において、観測史上最大の有義波高 6.92m (図-3.2.2.1) を観測し、胆振海岸においては、台風通過に伴う潮位上昇 (図-3.2.2.2) も相まって、8月30日23時～31日3時頃に概ね全区間で越波による浸水被害が生じた (写真-3.2.2.1)。北海道開発局による浸水痕跡の調査から、護岸表法肩から最大で約 50m 程度陸側まで越波による浸水が発生していた。胆振海岸の4地点については、3.1.5に示した2023年の定量的な検証により、海底勾配が比較的急な KP28.0 周辺を除き、加藤らの改良仮想勾配法 1/100 が現地観測された $R_{50\%}$ に対応し、周期補正の最大倍率を 2.0 倍とした改良 IFORM による $R_{2\%}$ 、 $R_{1/3}$ の算定値と現地観測された $R_{2\%}$ 、 $R_{1/3}$ が対応することが確認されている。また、胆振海岸の東端に位置する海底勾配が比較的急な KP28.0 は、現地観測された $R_{50\%}$ が改良仮想勾配法と改良仮想勾配法 1/100 の算定値の中間程度であり、周期補正の最大倍率を 1.2 倍とした改良 IFORM による $R_{2\%}$ 、 $R_{1/3}$ の算定値と現地観測された $R_{2\%}$ 、 $R_{1/3}$ が対応することが確認されている。このような対応関係が確認された算定方法により、実際に越波が発生した本事例に対して、精度検証を実施した。

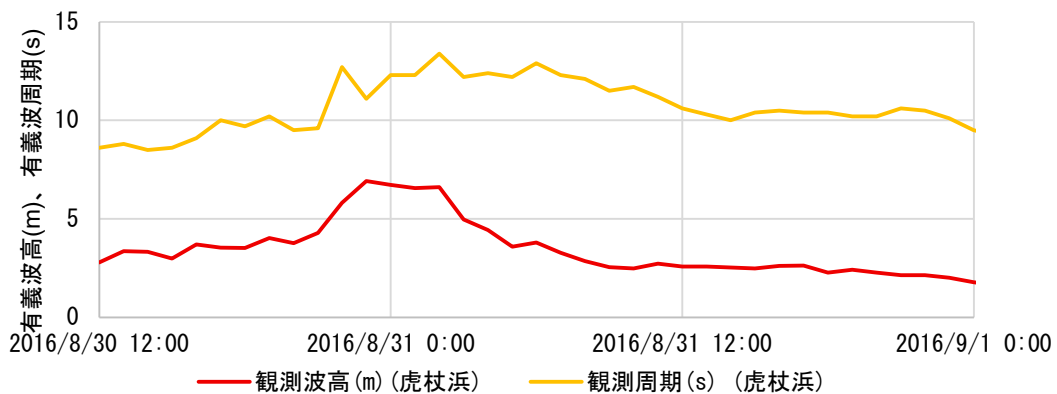


図-3.2.2.1 虎杖浜観測所での観測有義波高、有義波周期

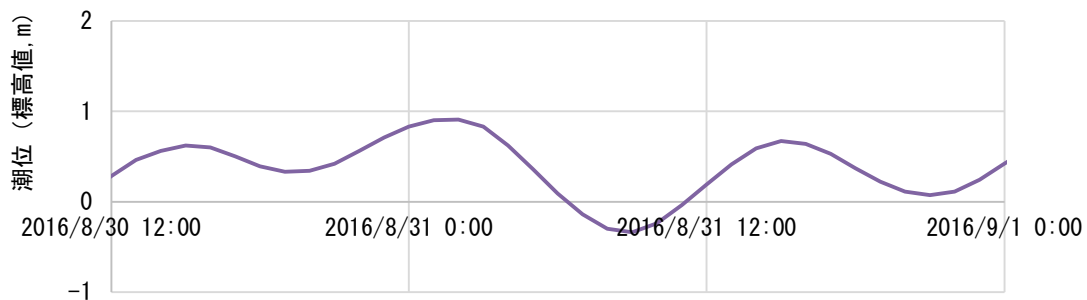
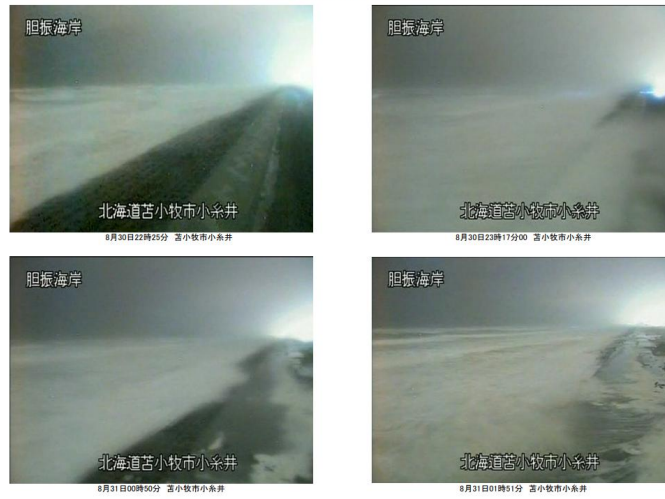
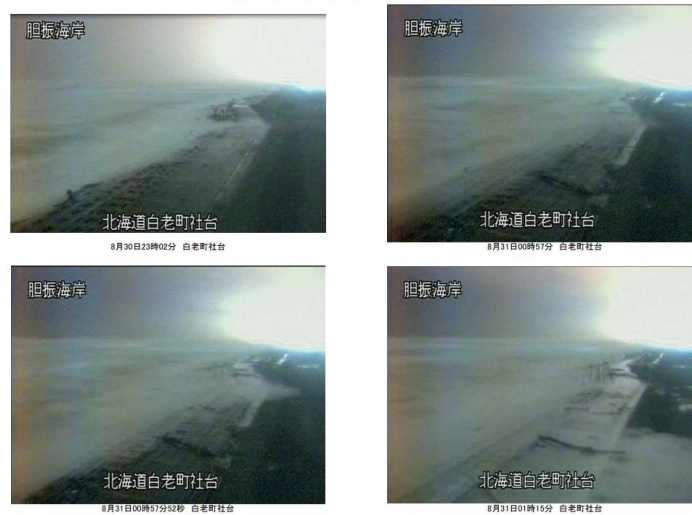


図-3.2.2.2 白老港の観測潮位

平成28年 台風10号被災時 胆振海岸CCTV (小糸井CCTV、KP337)



平成28年 台風10号被災時 胆振海岸CCTV (社台CCTV、KP155)



平成28年 台風10号被災時 胆振海岸CCTV (北吉原2 CCTV、KP2841)

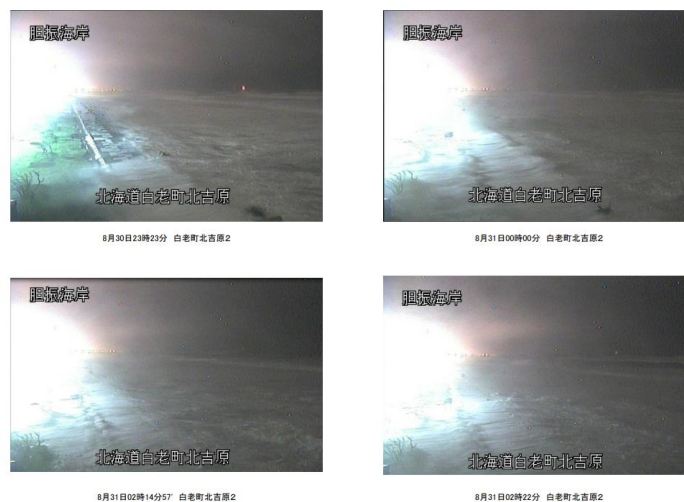


写真-3.2.2.1 2016 年台風第 10 号での越波状況（北海道開発局提供）

① 胆振海岸 KP2.0 (苫小牧市有明地先)

潮位・波浪の観測値と予測値の乖離を補正したうちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.3に示す。特に、越波が確認された8月30日23時～31日3時頃に着目すると、 $R_{50\%}$ に対応する改良仮想勾配法 1/100 の規則波のうちあげ高、周期補正を考慮した改良IFORMによる $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、天端高を下回っている。一方で、改良仮想勾配法 1/100 (加藤ら) の規則波のうちあげ高から定数倍 (1.09 倍) することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値と周期補正を考慮した改良IFORMによる $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、天端高を越える時刻が見られた。時系列的に見ると、改良仮想勾配法 1/100 (加藤ら) の規則波のうちあげ高から定数倍 (1.09 倍) することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、越波が確認された以外の時刻 (8月30日16時頃) でも天端高を越える算定値となったが、この時間帯での越波は記録されていない。改良IFORMによる $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値についても、越波が確認された以外の時刻 (8月30日17時頃や31日16時頃) でも天端高を越える算定値となった。以上のことから、いずれの算定方法でも越波時刻との対応関係で課題がある。

本事例においては、図-3.2.2.1に示すように、比較的周期の長い (12s 以上) うねり性の波浪が来襲しており、サーフビートが発生していた可能性があるが、現時点では、うちあげ高の算定にあたってサーフビートの上昇量は加味していない。そこで、合田 (1975a) のサーフビートの推定式 (3.2.1) により、サーフビートの有義波高 (H_{ζ}) を算定し、その 1/2 振幅をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.4に示す。

$$H_{\zeta} = 0.04H'_0 / \sqrt{\frac{H'_0}{L_0} \left(1 + \frac{h}{H'_0}\right)} \quad (3.2.1)$$

ここで、 H'_0 は換算沖波波高、 L_0 は沖波の波長、 h は水深である。なお、ここではうちあげ高にサーフビートの上昇量を加算するため、 $h = 0$ として上昇量を求めた。

サーフビートの上昇量を考慮した結果を図-3.2.2.4に示す。全ての算定式で、越波が確認された8月30日23時～31日2時頃の一部の時間帯に天端高を越える結果となった。また、周期補正を考慮した改良IFORMによる $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、越波が確認された8月30日23時～31日2時頃の全ての時間帯に天端高を越える結果となった。

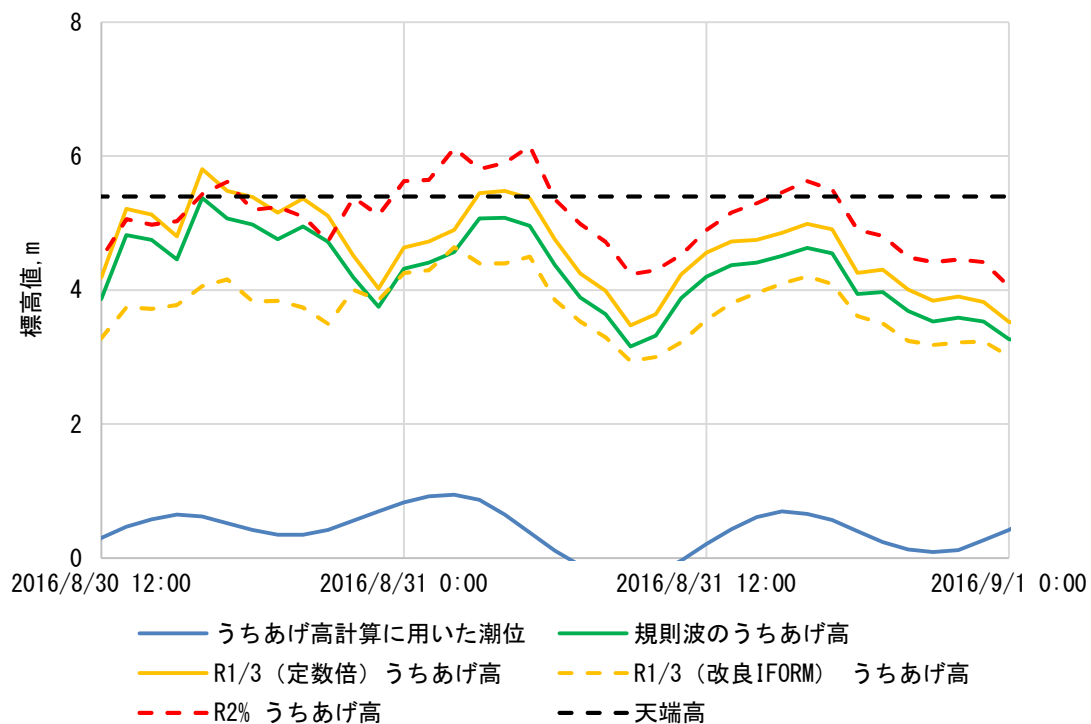


図-3.2.2.3 うちあげ高再現計算結果
(胆振海岸 KP2.0 (苫小牧市有明地先)、2016 年台風第 10 号)

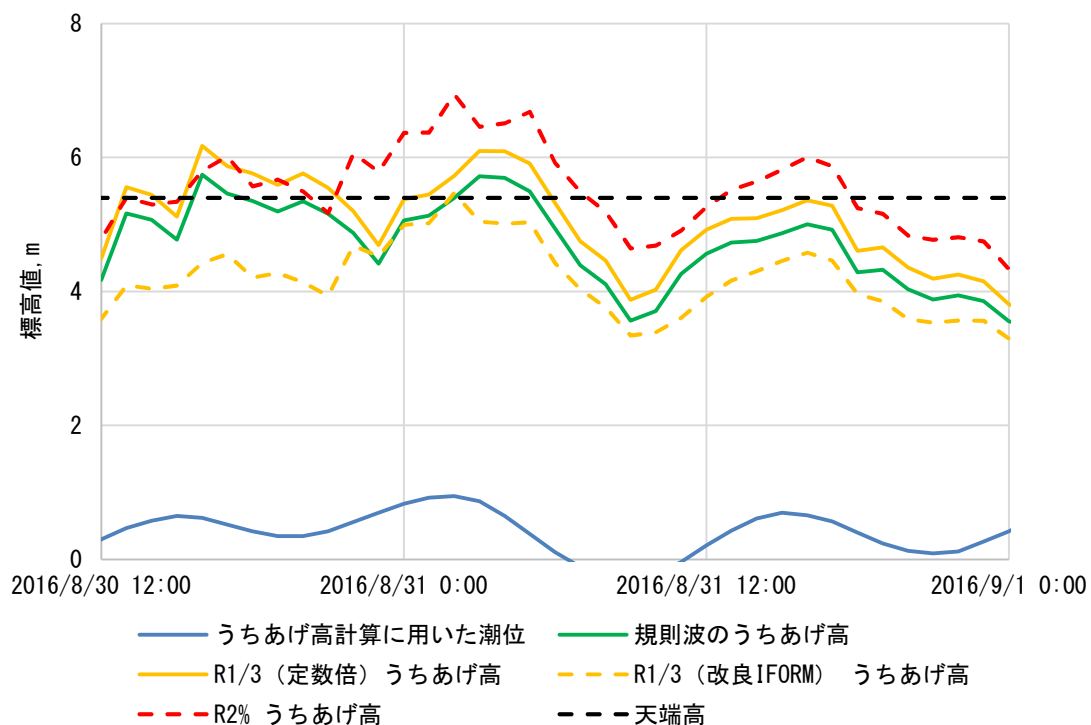


図-3.2.2.4 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(胆振海岸 KP2.0 (苫小牧市有明地先)、2016 年台風第 10 号)

② 胆振海岸 KP8.0（苫小牧市錦町地先）

潮位・波浪の観測値と予測値の乖離を補正したうちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.5に示す。特に、越波が確認された8月30日23時～31日3時頃に着目すると、周期補正を考慮した改良IFORMによる $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値のみ、31日3時頃に天端高を越える時刻が見られた。

そこで、本事例についても、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.6に示す。周期補正を考慮した改良IFORMによる $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値を除き、依然として天端高を下回っている。一方で、周期補正を考慮した改良IFORMによる $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、越波が確認された8月30日23時以外の31日0時～2時頃に天端高を越える結果となった。

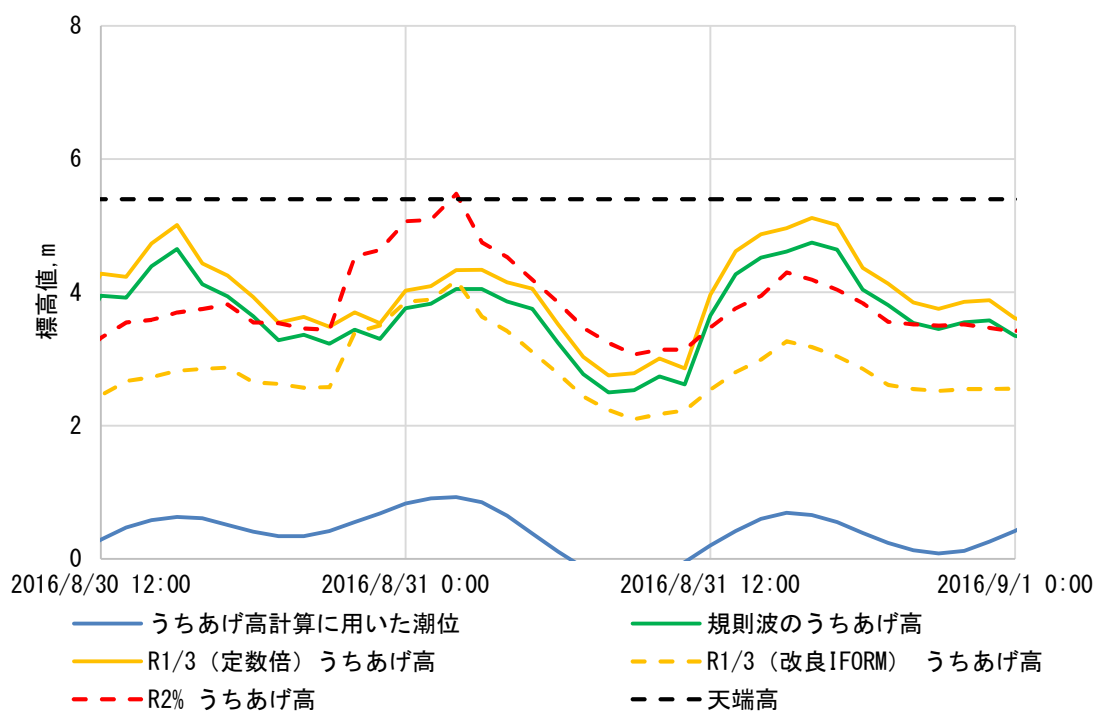


図-3.2.2.5 うちあげ高再現計算結果

(胆振海岸 KP8.0（苫小牧市錦町地先）、2016 年台風第 10 号)

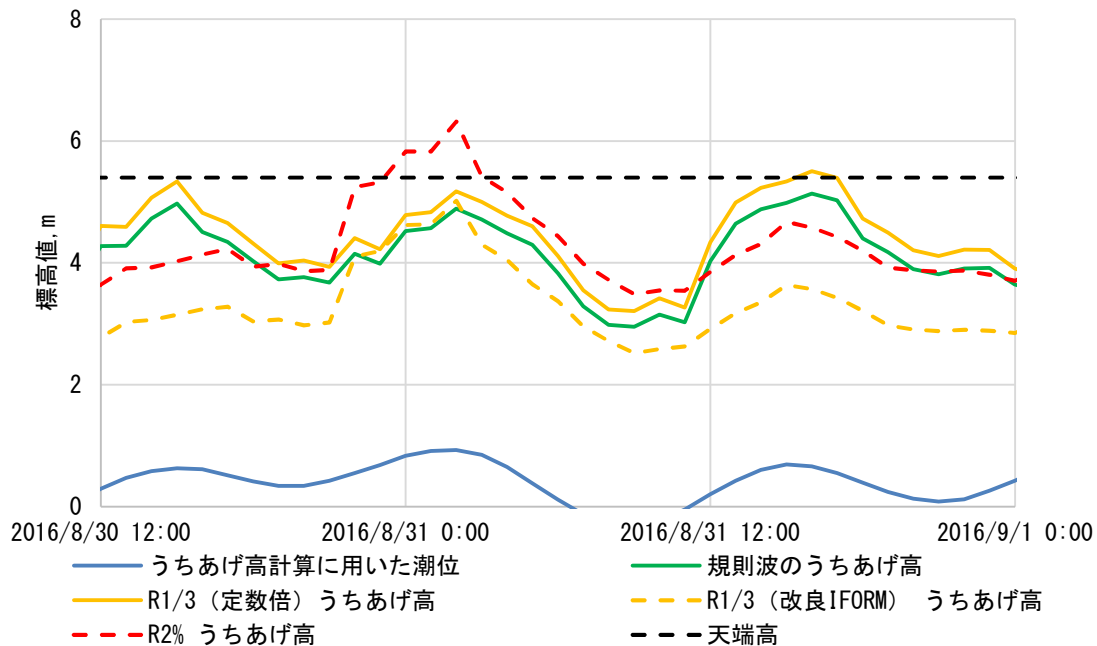


図-3.2.2.6 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(胆振海岸 KP8.0 (苫小牧市錦町地先)、2016 年台風第 10 号)

③ 胆振海岸 KP16.0 (白老町社台地先)

潮位・波浪の観測値と予測値の乖離を補正したうちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.7 に示す。特に、越波が確認された 8 月 30 日 23 時～31 日 3 時頃に注目すると、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、概ね越波時刻に天端高を上回る。

そこで、本事例についても、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.8 に示す。全ての算定値は天端高を越波が確認された一部の時刻で天端高を上回った。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、越波が確認された 8 月 30 日 23 時～31 日 2 時頃に天端高を越える結果となった。

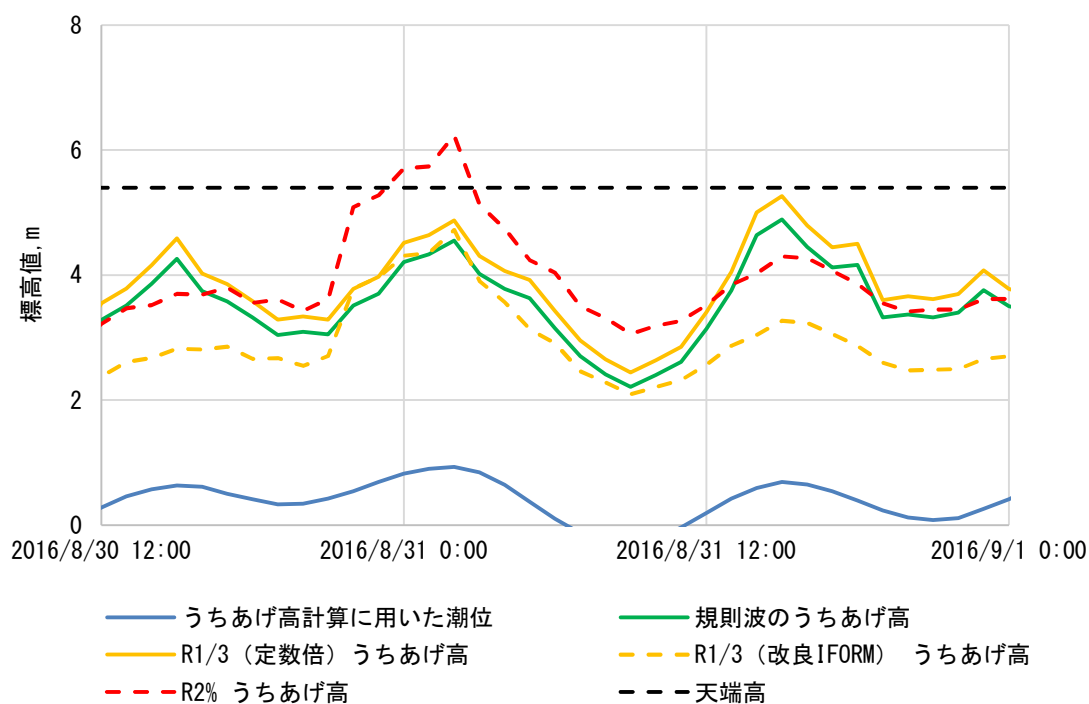


図-3.2.2.7 うちあげ高再現計算結果
 (胆振海岸 KP16.0 (白老町社台地先)、2016 年台風第 10 号)

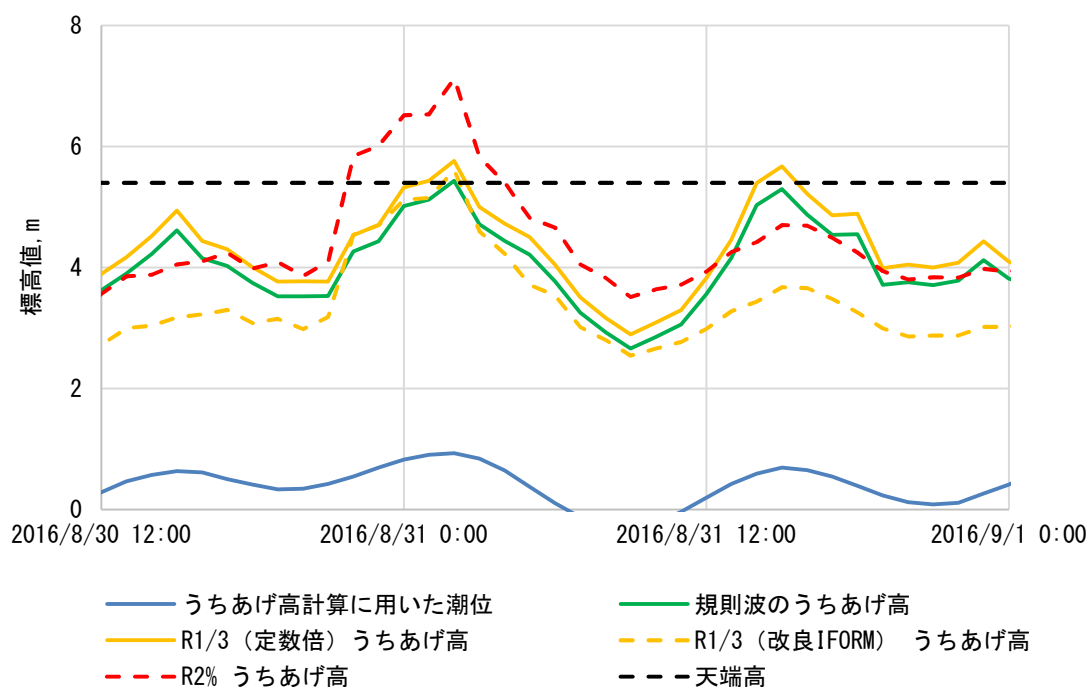


図-3.2.2.8 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
 (胆振海岸 KP16.0 (白老町社台地先)、2016 年台風第 10 号)

④ 胆振海岸 KP28.0（白老町北吉原地先）

潮位・波浪の観測値と予測値の乖離を補正したうちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.9に示す。なお、改良 IFORM の周期補正については、3.1.5で再現性が確認された周期補正の最大倍率は1.2倍ではなく、本事例の波浪条件から求められる砕波点が深くなり、表法先から砕波点までの勾配が1/50程度であったことを踏まえ、間瀬ら（2021）の検討で海底勾配1/50で再現性が確認されている最大倍率1.5倍を用いた。また、規則波のうちあげ高は、改良仮想勾配法（中村ら）と改良仮想勾配法1/100（加藤ら）を1:1の比率で内挿して求めた。越波が確認された8月30日23時～31日3時頃に着目すると、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は天端高を越え、規則波のうちあげ高から定数倍（1.09倍）することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は天端高に近い結果となった。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.10に示す。全ての算定値は天端高を越波が確認された一部の時刻で天端高を上回った。また、改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は越波が確認された8月30日23時～31日3時頃の全ての時間帯で、天端高を上回った。

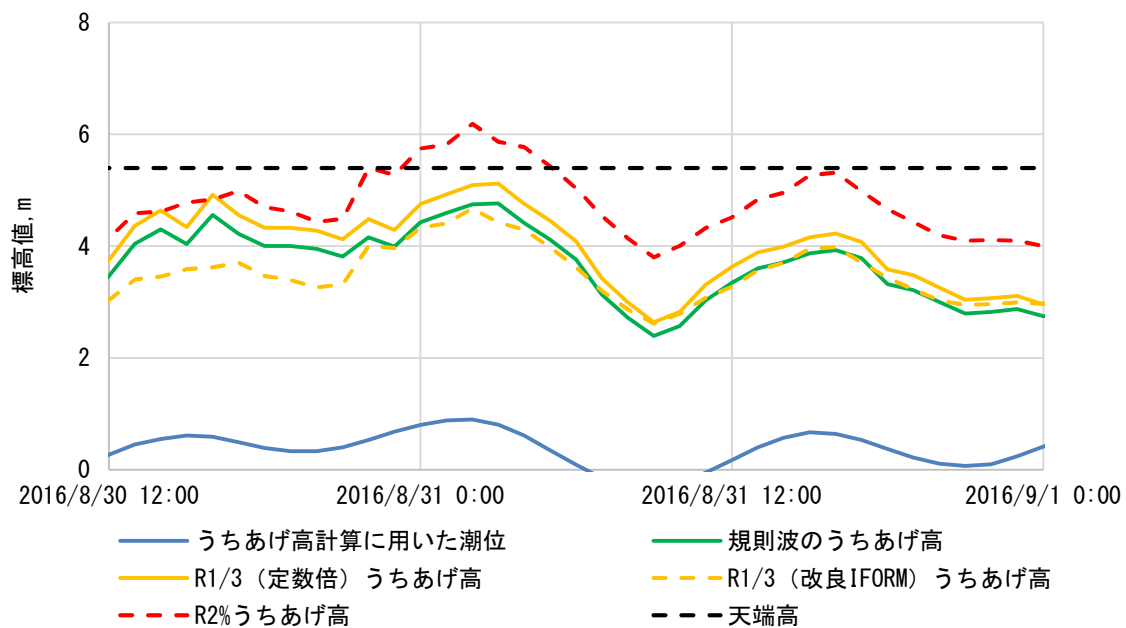


図-3.2.2.9 うちあげ高再現計算結果

（胆振海岸 KP28.0（白老町北吉原地先）、2016 年台風第 10 号）

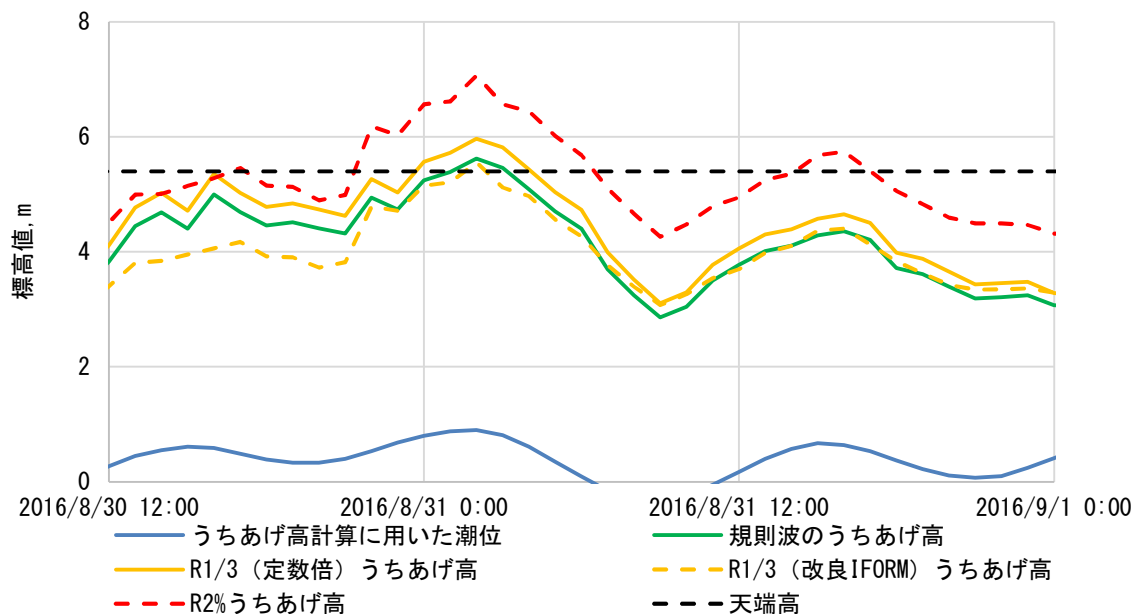


図-3.2.2.10 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(胆振海岸 KP28.0 (白老町北吉原地先)、2016 年台風第 10 号)

⑤ まとめ

本事例の検証から、以下の知見が得られた。

- ・ 越波時刻との対応関係から、胆振海岸のように緩勾配の海岸では、サーフビートの上昇量を考慮することが必要である。
- ・ $R_{50\%}$ に対応する規則波のうちあげ高は、越波時刻において、天端高を上回らなかったことから、波の不規則性を考慮することが必要である。
- ・ 胆振海岸のように遠浅の海岸においては、特に周期の長いうねり性の波浪が来襲している条件では、サーフビートの上昇量を考慮する必要があると考えられる。
- ・ $R_{50\%}$ に対応する規則波のうちあげ高を定数倍（1.09 倍）することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値はサーフビートの上昇量を考慮することで、3 事例で越波が発生した時刻において、天端高を越えていたが、越波が発生していない時刻に天端高を越える状況（胆振海岸 KP2.0）も見られたため、予測に用いるには留意が必要である。
- ・ 周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値はサーフビートの上昇量を考慮することで、3 事例で越波が発生した時刻において天端高を越えており、越波被害を一定程度再現できている。
- ・ 周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、サーフビートの上昇量を考慮することで、全ての事例で越波を再現出来たが、越波が発生していない時刻に天端高を越える状況（胆振海岸 KP2.0、KP28.0）も見られたため、予測に用いるには留意が必要である。

(2) 三浦海岸における検証

2017 年台風第 21 号は、駿河湾・相模湾に加え、東京湾の入り口に位置する三浦海岸においても、越波被害を生じさせた。写真-3.2.2.2 に示すように、越波により流入した海水により、護岸の天端被覆工として整備されたブロックが流出し、背後の駐車場や道路、家屋まで飛散した。そこで、被災箇所に近い 2 地点において、精度検証を実施した。



写真-3.2.2.2 三浦海岸における被害状況（神奈川県提供）

① 三浦海岸 No.10（三浦市下浦町上田宮地先）

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.11 に示す。越波が確認された時刻は不明であるが、図-3.1.4.2 に示すとおり、10 月 23 日の 3 時頃に静岡県掛川市に上陸した後 8 時頃には茨城県日立市沖を抜けたことから、10 月 23 日 6 時～7 時にかけて各うちあげ高算定値がピークとなる状況と整合する。また、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は 23 日 6 時～8 時に天端高を超えている。しかし、その他の算定値は、天端高を下回っている。

そこで、本事例についても、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.12 に示す。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値や改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）の規則波のうちあげ高から定数倍（1.09 倍）することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、依然として天端高を下回っているが、天端高から 1m 以内となった。

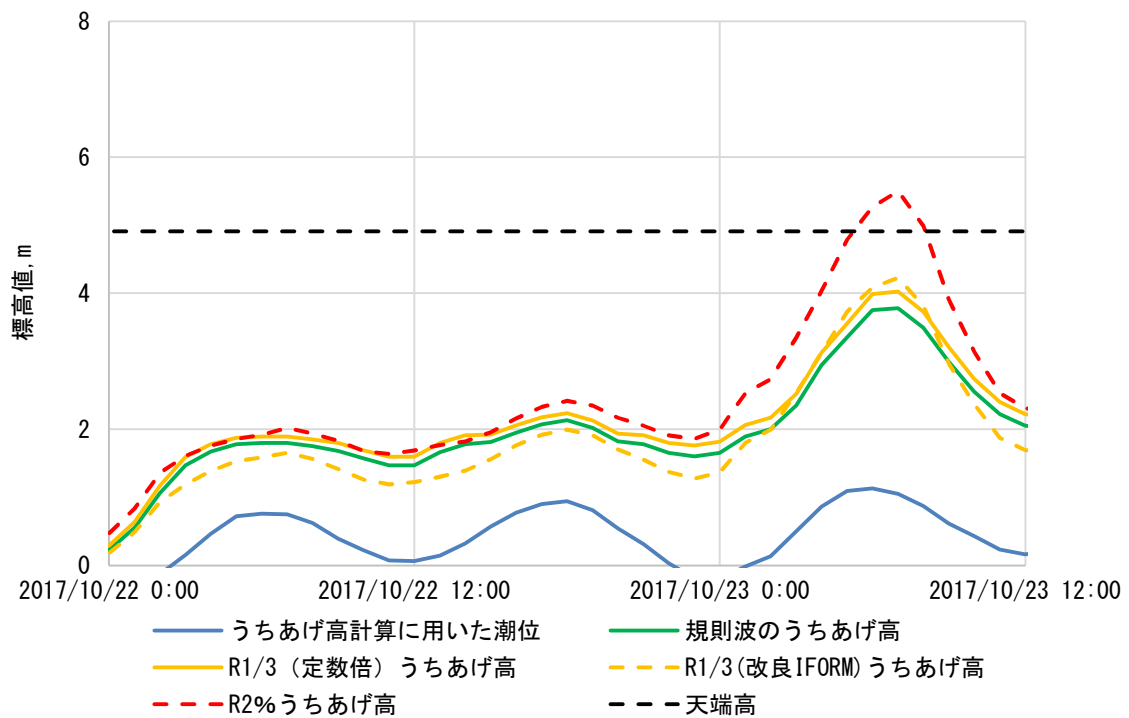


図-3.2.2.11 うちあげ高再現計算結果
(三浦海岸 No.10 (三浦市下浦町上田宮地先)、2017 年台風第 21 号)

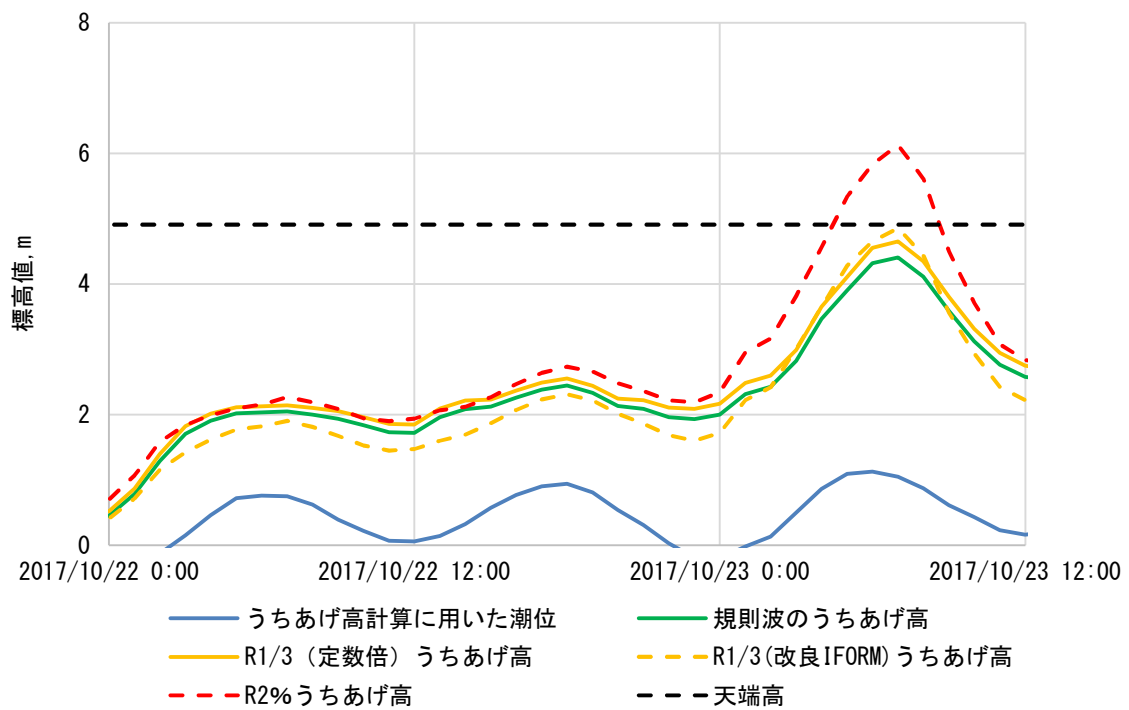


図-3.2.2.12 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(三浦海岸 No.10 (三浦市下浦町上田宮地先)、2017 年台風第 21 号)

② 三浦海岸 No.20 (三浦市南下浦町菊名地先)

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.13に示す。前述した No.10 より越波による被害が発生した地点に近い断面である。また、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は 23 日 6 時～8 時に天端高を超えている。しかし、その他の算定値は、天端高を下回っている。

そこで、本事例についても、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.14に示す。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、依然として天端高を下回っているが、規則波のうちあげ高及び定数倍して求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は天端高とほぼ同程度となった。

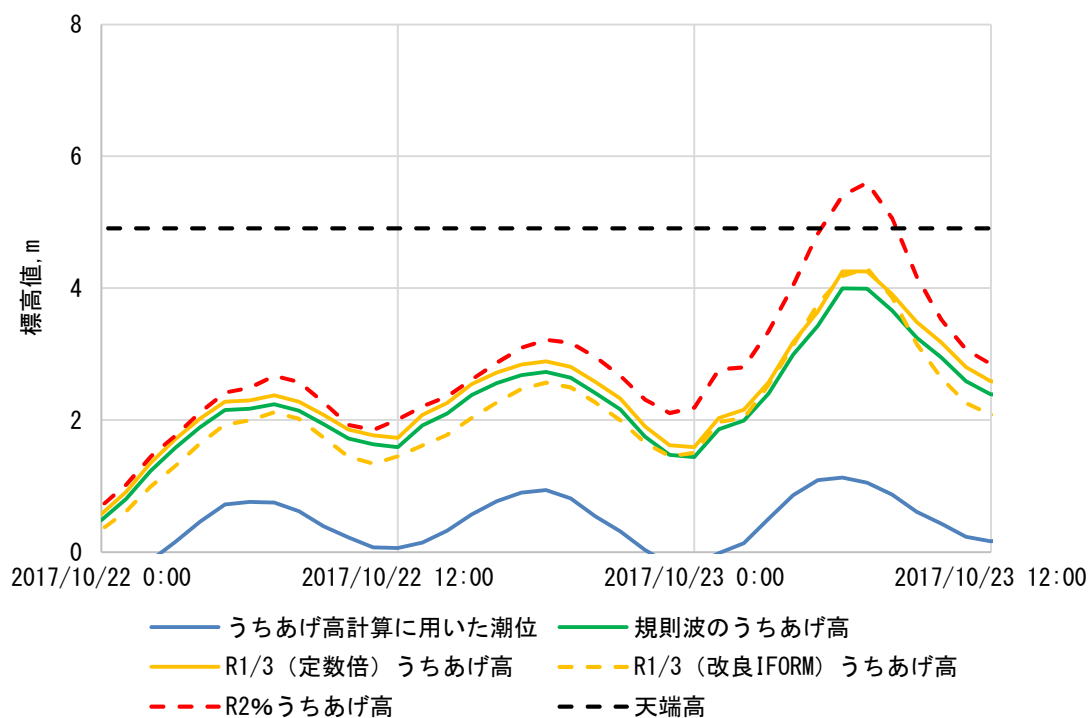


図-3.2.2.13 うちあげ高再現計算結果

(三浦海岸 No.20 (三浦市南下浦町菊名地先)、2017 年台風第 21 号)

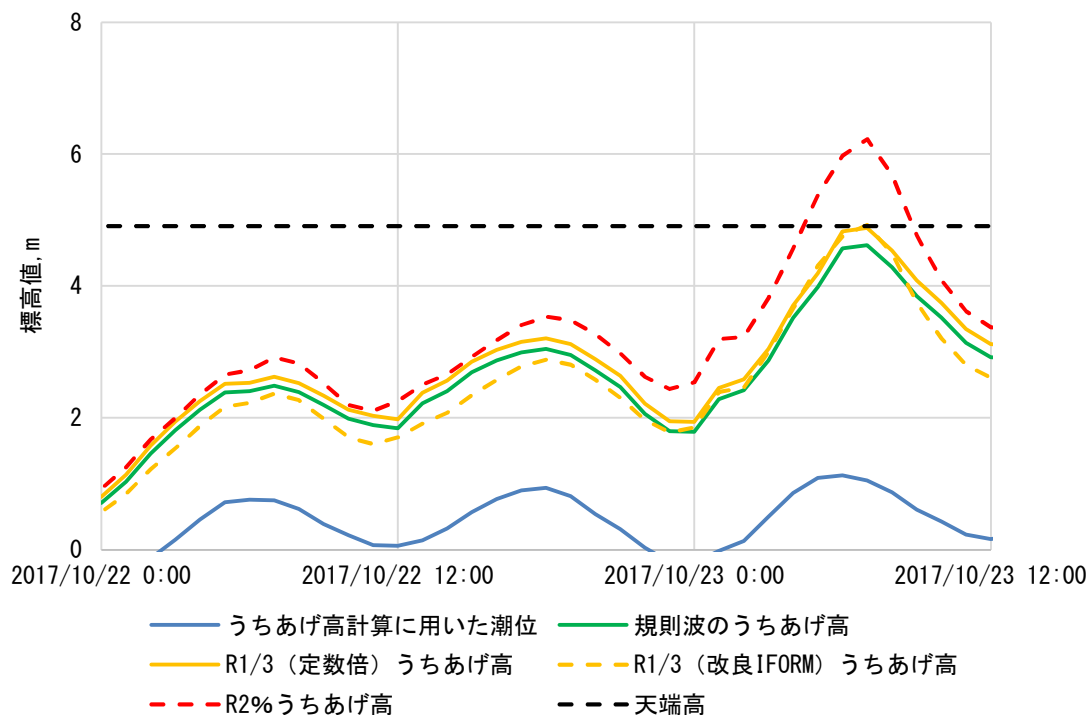


図-3.2.2.14 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(三浦海岸 No.20 (三浦市南下浦町菊名地先)、2017 年台風第 21 号)

③ まとめ

本事例の検証から、以下の知見が得られた。

- 三浦海岸のように遠浅の海岸においては、特に周期の長いうねり性の波浪が来襲している条件では、サーフビートの上昇量を考慮する必要があると考えられる。
- サーフビートの上昇量を考慮することで越波実態の再現性が向上する。
- $R_{50\%}$ や $R_{1/3}$ に対応するうちあげ高算定値は、サーフビートの上昇量を考慮しても天端高と同等程度であったことから、三浦海岸において、越波被害を再現するためには、波の不規則性を考慮し、 $R_{2\%}$ などのより大きなうちあげ高代表値を用いる必要があることが示唆された。
- 三浦海岸では、写真-3.2.2.2 に示したように越波により流入した海水が護岸背後の駐車場や天端被覆工のブロックの飛散が被害をもたらした。堤防や護岸のすぐ背後での被害を再現するためには、 $R_{2\%}$ 等の $R_{1/3}$ より高いうちあげ高代表値を用いて予測することが必要であると考えられる。

(3) 駿河海岸における検証

2017 年台風第 21 号（写真-3.2.2.3）及び 2019 年台風第 19 号（図-3.2.2.15）により、駿河海岸においては、越波が発生し、その後の調査により、背後地に流木や土砂の飛散が多数確認されたが、海岸から離れている背後の家屋等の被害は生じていない。越波による痕跡が確認された 3 事例について、精度検証を実施した。

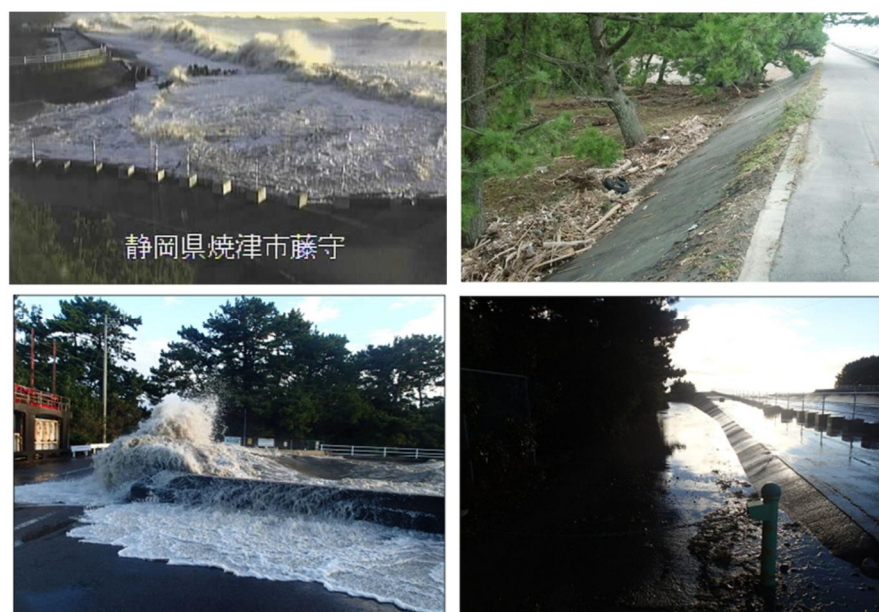


写真-3.2.2.3 2017 年台風第 21 号による駿河海岸での越波被害状況（中部地整提供）



図-3.2.2.15 2019 年台風第 19 号による駿河海岸での越波被害状況（中部地整提供）

① 駿河海岸（焼津市下小杉、2017 年台風第 21 号）

当該地点には、離岸堤等の消波施設があるため、消波施設の効果を加味（透過率 0.6）してうちあげ高の再現計算を実施した。結果を図-3.2.2.16 に示す。越波が確認された 10 月 23 日の午前中に着目すると、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値と改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）の規則波のうちあげ高から定数倍（1.09 倍）することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値が、23 日 5 時頃に天端高を越える結果となった。

以上のことから、 $R_{2\%}$ や $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値を用いることで、越波実態を再現出来ることが分かる。

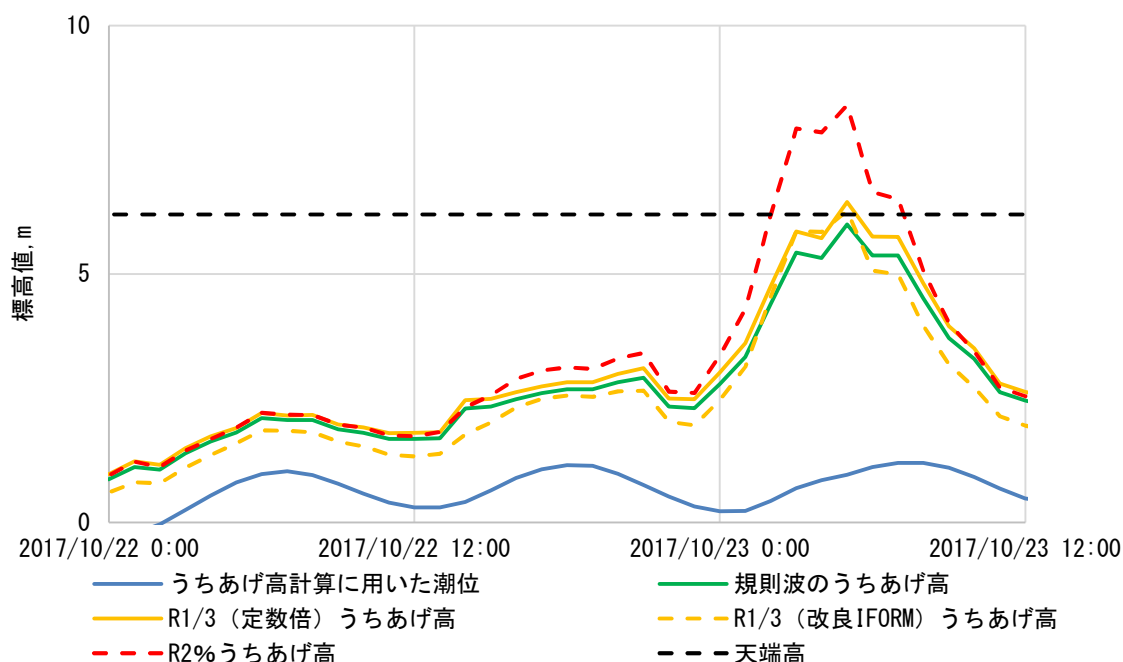


図-3.2.2.16 うちあげ高再現計算結果
（駿河海岸（焼津市下小杉）、2017 年台風第 21 号）

② 駿河海岸（焼津市下小杉、2019 年台風第 19 号）

2017 年台風第 21 号の検証と同様に、消波施設の効果を加味（透過率 0.6）してうちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.17 に示す。越波が確認された 10 月 12 日夕方に着目すると、全てのうちあげ高算定値が、12 日 17 時頃に天端高を越える結果となった。消波施設を考慮した条件においても、すべての算定式で越波実態を再現出来ることが分かる。

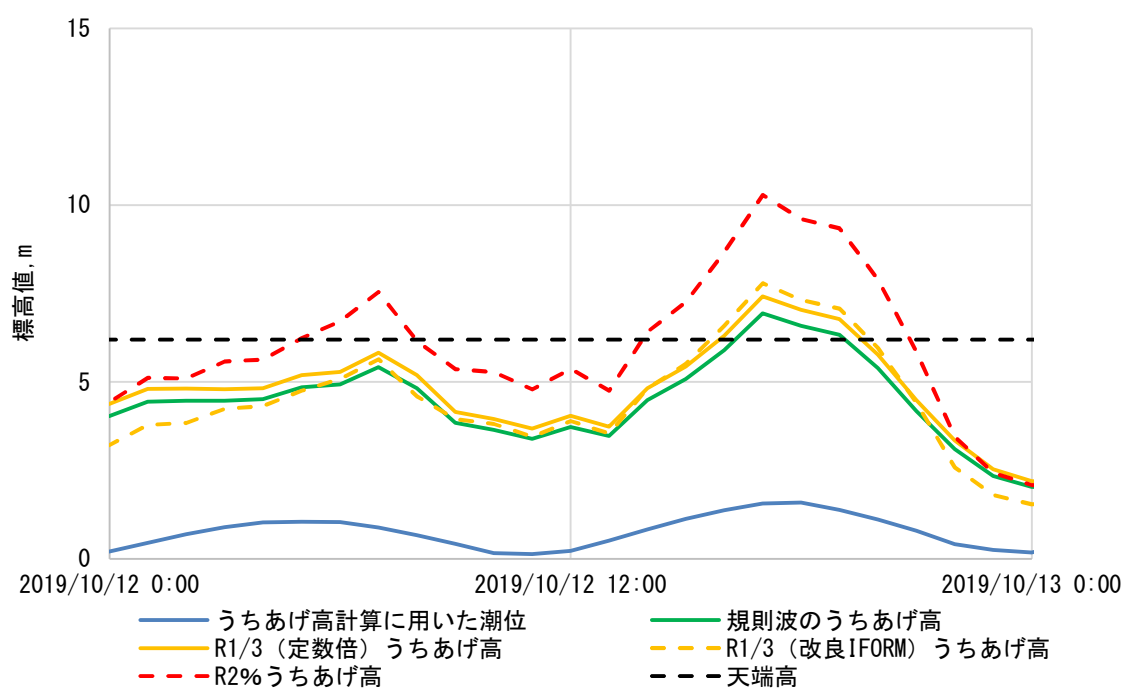


図-3.2.2.17 うちあげ高再現計算結果
(駿河海岸（焼津市下小杉）、2019 年台風第 19 号）

③ 駿河海岸（焼津市田尻、2019 年台風第 19 号）

前述した焼津市下小杉と違い、当該地点は海底谷が迫っており、海底勾配がやや急（1/40 程度）である。そのため、胆振海岸 KP28.0 での検証と同様に、改良 IFORM の周期補正については、海底勾配が 1/50 程度の断面で再現性が確認されている 1.5 倍により算定した。また、規則波のうちあげ高は改良仮想勾配法（中村ら）と改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）を 1:1 の比率で内挿することで求めることとした。うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.18 に示す。3. 1. 3 で示した各時間のうちあげ高観測における最大値もプロットした。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値のみ天端高を越える結果となった。また、 $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、うちあげ高観測最大値と概ね整合している。

そこで、本事例についても、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.19 に示す。2 通りの方法で求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、天端高を越える結果となった。また、改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値はうちあげ高観測最大値を概ね包絡するようになった。海底勾配が 1/40 程度の当該地点においても、特に周期の長いうねり性の波浪が来襲している条件でサーフビートの上昇量を考慮する必要があると考えられる。また、越波の再現においては、 $R_{2\%}$ や $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値を用いることが必要であることが示唆された。

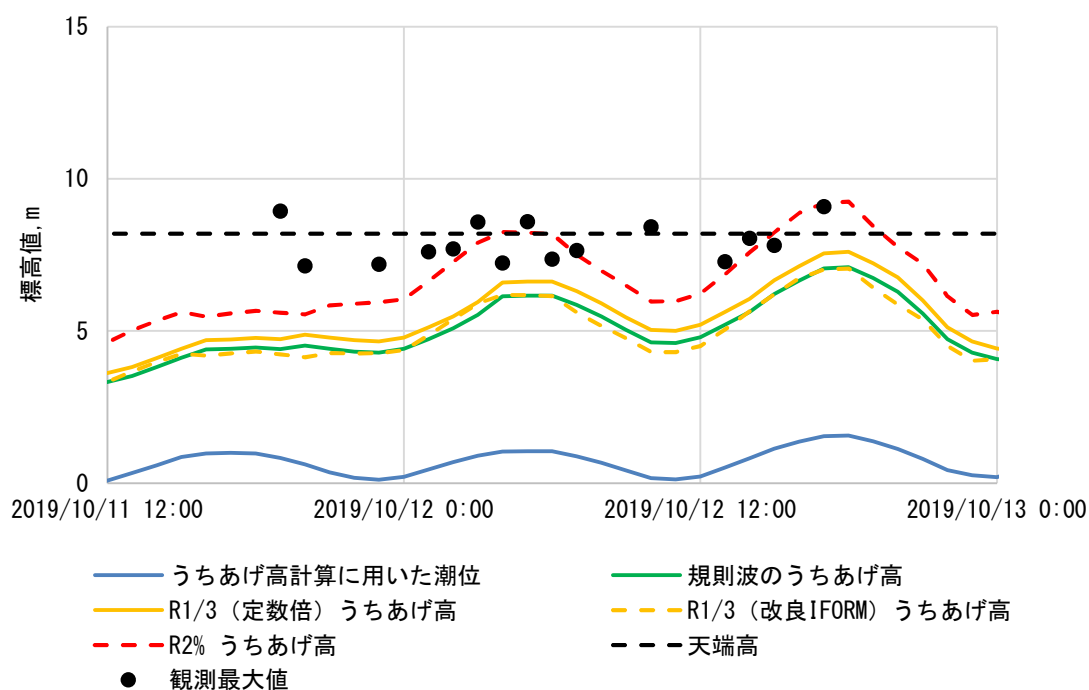


図-3.2.2.18 うちあげ高再現計算結果
（駿河海岸（焼津市田尻）、2019 年台風第 19 号）

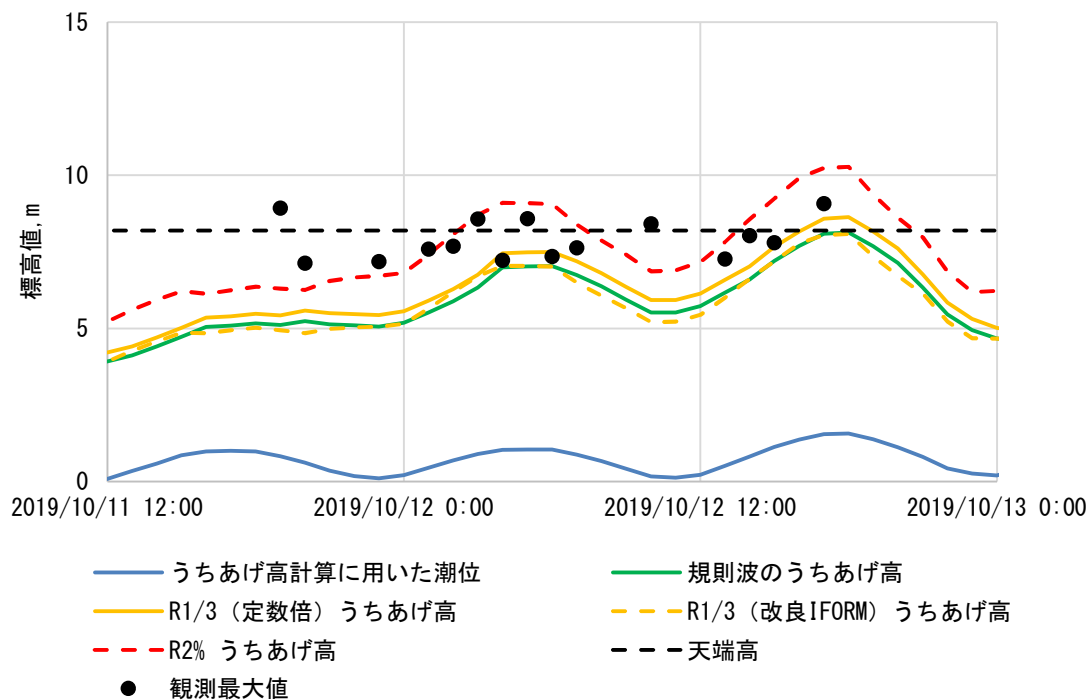


図-3.2.2.19 サーフビートの上昇量を考慮したうちはげ高再現計算結果
(駿河海岸（焼津市田尻）、2019 年台風第 19 号）

④ まとめ

本事例の検証から、以下の知見が得られた。

- ・ 焼津市田尻（2019 年台風第 19 号）の検証結果から、サーフビートの上昇量を考慮することで、うちはげ高観測最大値に対する改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちはげ高算定値の再現性が向上する。
- ・ 焼津市下小杉（2017 年台風第 21 号、2019 年台風第 19 号）の検証結果から、越波被害の再現には、 $R_{1/3}$ のうちはげ高算定値や $R_{2\%}$ のうちはげ高算定値を用いる必要があることが示唆された。
- ・ いずれの事例も越波による流木や土砂の飛散は確認されているが、背後の家屋が海岸から離れており、家屋等の被害は確認されていないことから、背後の利用状況に応じて、予測に用いるうちはげ高代表値を検討する必要がある。

(4) 焼津大崩海岸における検証

2019 年台風第 19 号により、焼津大崩海岸においては、越波が発生し、背後の家屋に被害が生じるとともに、コンクリート護岸の破損等が生じた（写真-3.2.2.4）。そのため、本事例について、精度検証を実施した。

当該地点の前面には、離岸堤が設置してあるため、消波施設の効果を加味（透過率 0.3）してうちあげ高の再現計算を実施した。結果を図-3.2.2.20 に示す。改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値と規則波のうちあげ高から定数倍（1.09 倍）することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値が、天端高を越える結果となったが、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値はほぼ規則波のうちあげ高と同じであり、天端高を越えていない。

そこで、本事例についても、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.21 に示す。全ての算定値は、天端高を越える結果となり、現地の実態と整合する。遠浅の海岸においては、特に周期の長いうねり性の波浪が来襲している条件では、サーフビートの上昇量を考慮する必要があると考えられる。また、消波施設を考慮した条件においても、 $R_{2\%}$ や $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値を用いることで、越波実態を再現出来ることが分かる。



写真-3.2.2.4 焼津大崩海岸での越波被害状況（静岡県提供）

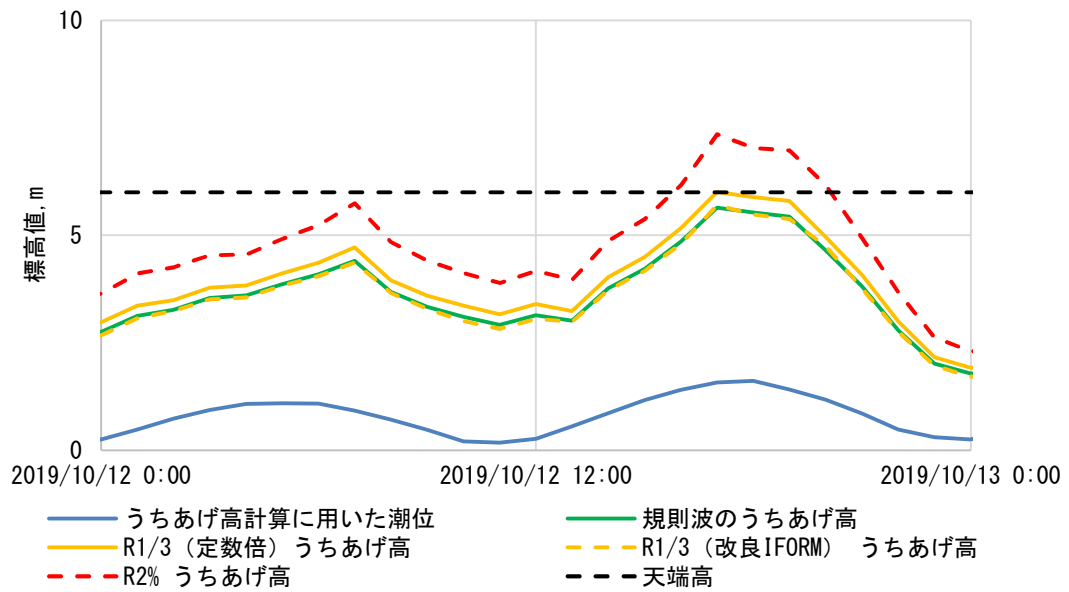


図-3.2.2.20 うちあげ高再現計算結果
(焼津大崩海岸、2019 年台風第 19 号)

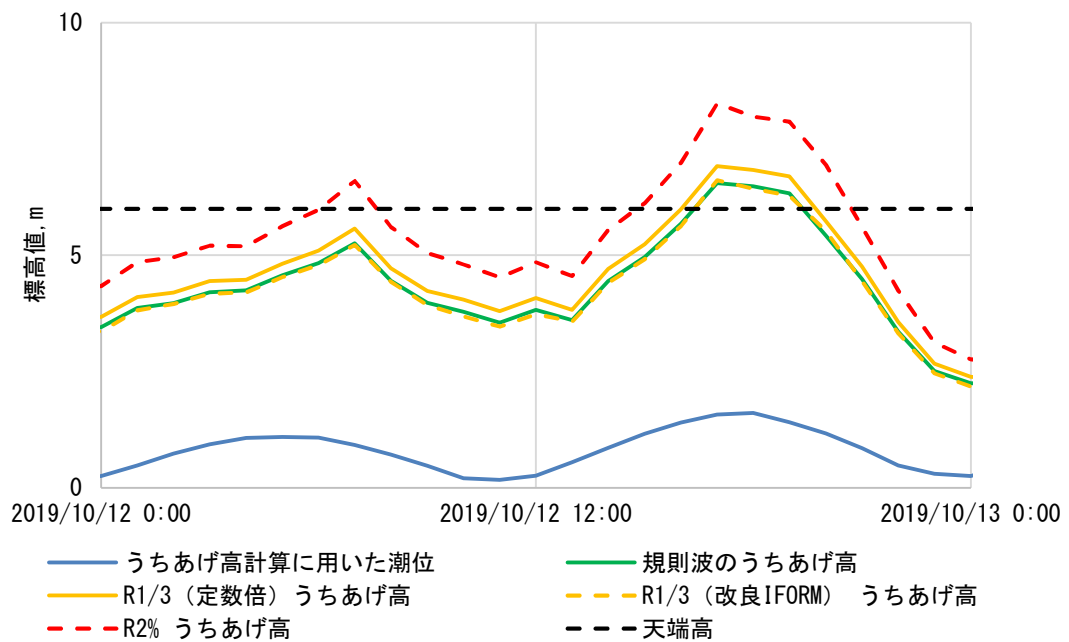


図-3.2.2.21 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(焼津大崩海岸、2019 年台風第 19 号)

(5) 高知海岸における検証

高知海岸においては、2017 年 10 月から 2019 年 8 月にかけて、波が堤防を越え、背後の道路の通行止めが複数回生じた。越波が最も多く、背後地への影響が大きかった戸原工区に着目すると、2017 年台風第 21 号では、背後に土砂が飛散するとともに、道路を挟んだ歩道の転落防止柵が破損する被害が生じた（写真-3.2.2.5）。2018 年台風第 19・20 号においては、8 月 23 日 18 時頃に越波が発生し、背後に土砂や流木の飛散が確認された（写真-3.2.2.6）。また、その後 2018 年台風第 21 号においても背後に土砂や流木の飛散が確認された（写真-3.2.2.7）。これらの事例に対して、精度検証を実施した。

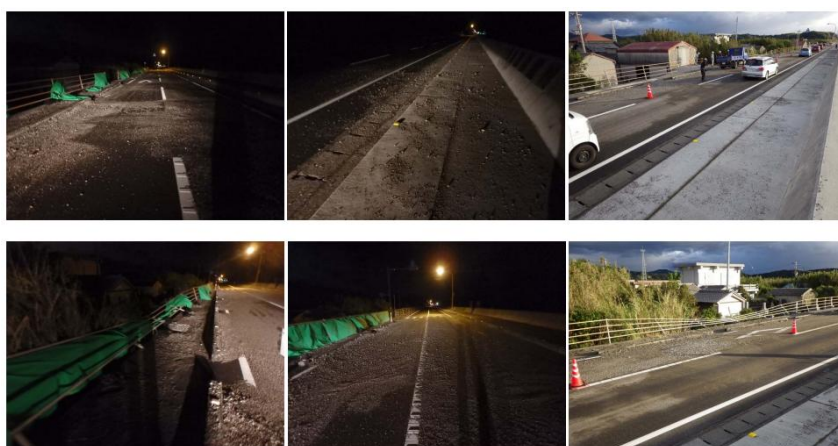


写真-3.2.2.5 2017 年台風第 21 号での被害状況（四国地整提供）



写真-3.2.2.6 2018 年台風第 19・20 号での越波状況（四国地整提供）



写真-3. 2. 2. 7 2018 年台風第 21 号での越波状況（四国地整提供）

① 高知海岸（戸原工区、2017 年台風第 21 号）

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3. 2. 2. 22 に示す。越波が確認された 10 月 22 日の夕方に着目すると、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値と規則波のうちあげ高から定数倍（1.09 倍）することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値が、22 日 20 時頃に天端高を越える結果となった。

本事例についても、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3. 2. 2. 23 に示す。全ての算定値が天端高を越える結果となった。遠浅の海岸においては、特に周期の長いうねり性の波浪が来襲している条件では、サーフビートの上昇量を考慮する必要があると考えられる。

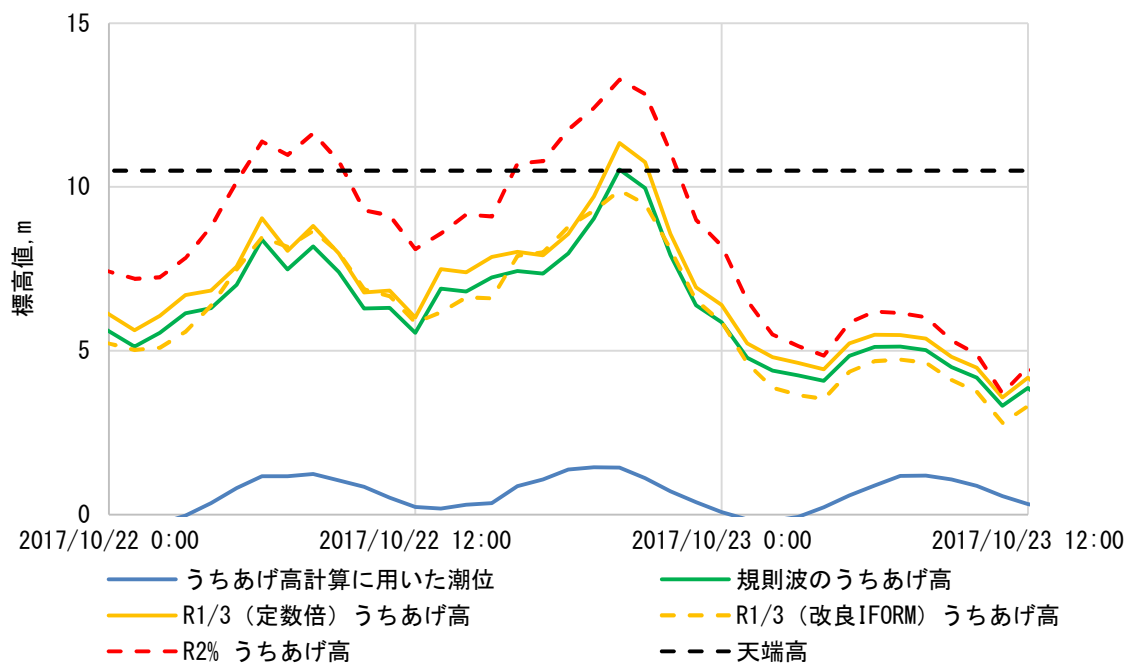


図-3. 2. 2. 22 うちあげ高再現計算結果
(高知海岸 (戸原工区)、2017 年台風第 21 号)

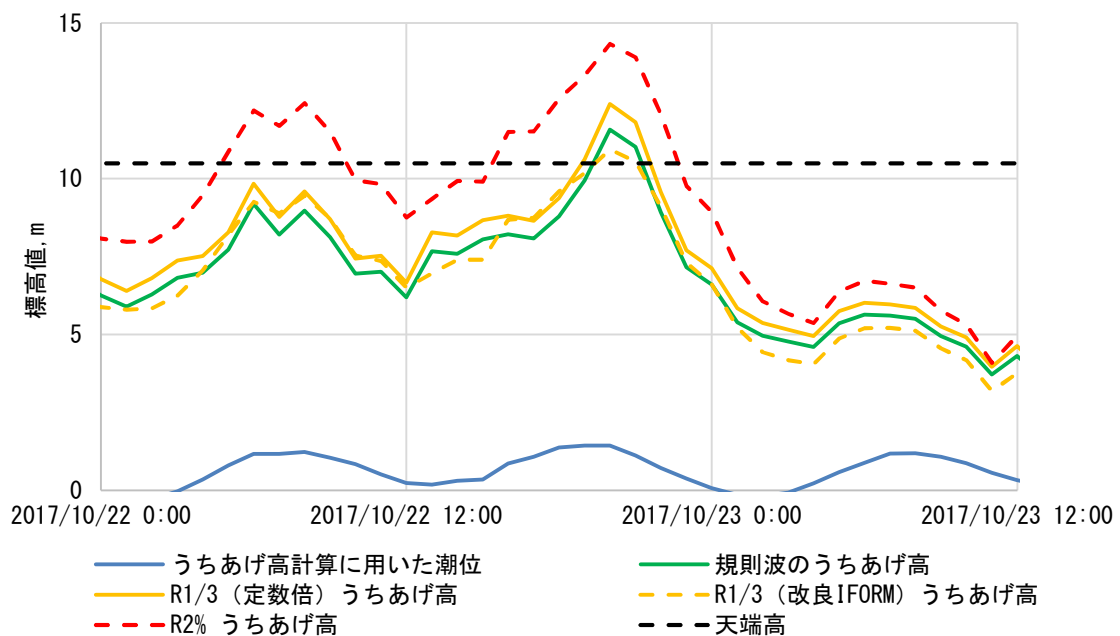


図-3. 2. 2. 23 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(高知海岸 (戸原工区)、2017 年台風第 21 号)

② 高知海岸（戸原工区、2018 年台風第 19・20 号）

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.24 に示す。現地で越波が確認された時刻である 8 月 23 日の 18 時頃に着目すると、周期補正を考慮した IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、天端高を越える結果となった。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.25 に示す。周期補正を考慮した IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は天端高を越える時間帯が長くなり、規則波のうちあげ高から定数倍（1.09 倍）することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値も 23 日の 18 時頃に天端高に近い結果となった。

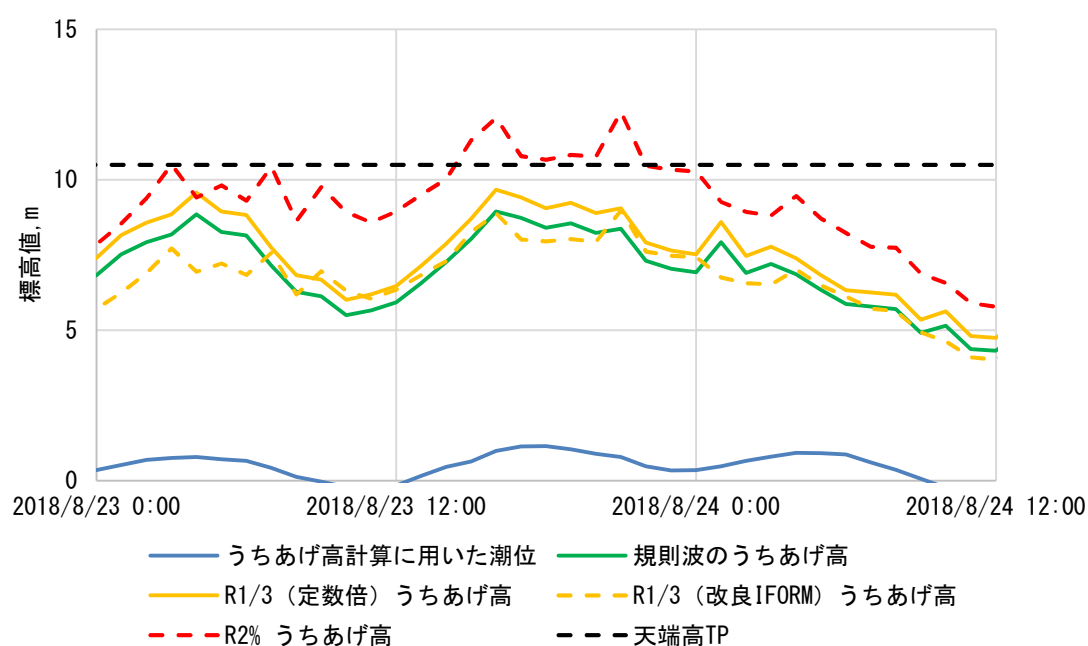


図-3.2.2.24 うちあげ高再現計算結果
(高知海岸（戸原工区）、2018 年台風第 19・20 号)

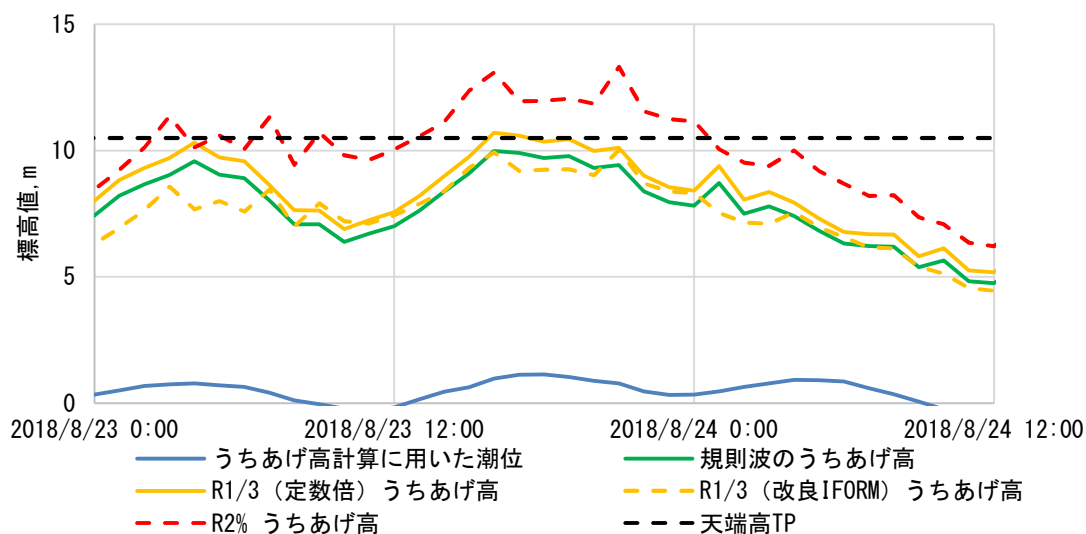


図-3.2.2.25 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(高知海岸 (戸原工区)、2018 年台風第 19・20 号)

③ 高知海岸 (戸原工区、2018 年台風第 21 号)

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.26 に示す。現地で越波が確認された時刻である 9 月 4 日の 12 時頃に着目すると、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、13 時頃に天端高を越える結果となった。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.27 に示す。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は天端高を越える時間帯が長くなり、現地で越波が確認された 11,12 時においても、越波実態と整合する結果となった。

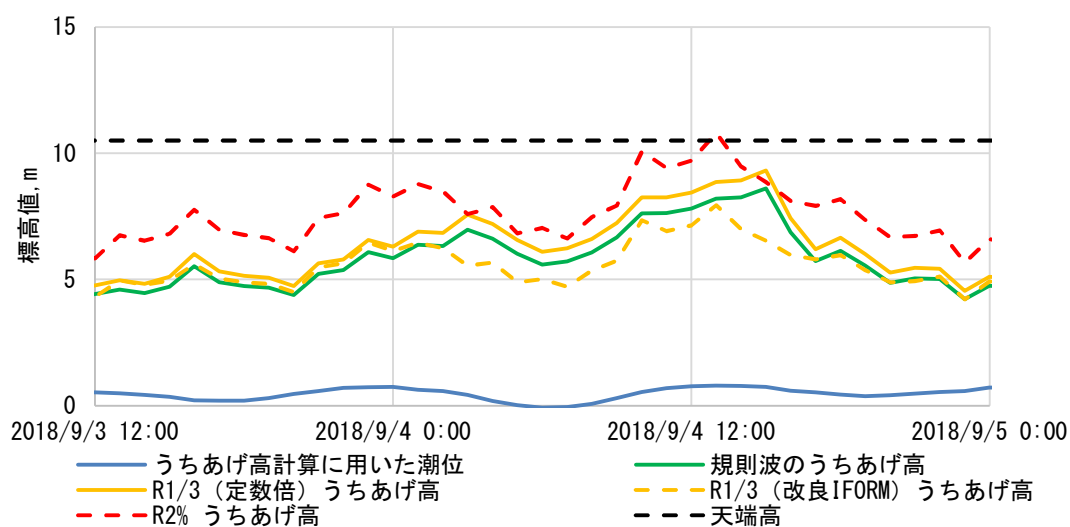


図-3.2.2.26 うちあげ高再現計算結果
(高知海岸 (戸原工区)、2018 年台風第 21 号)

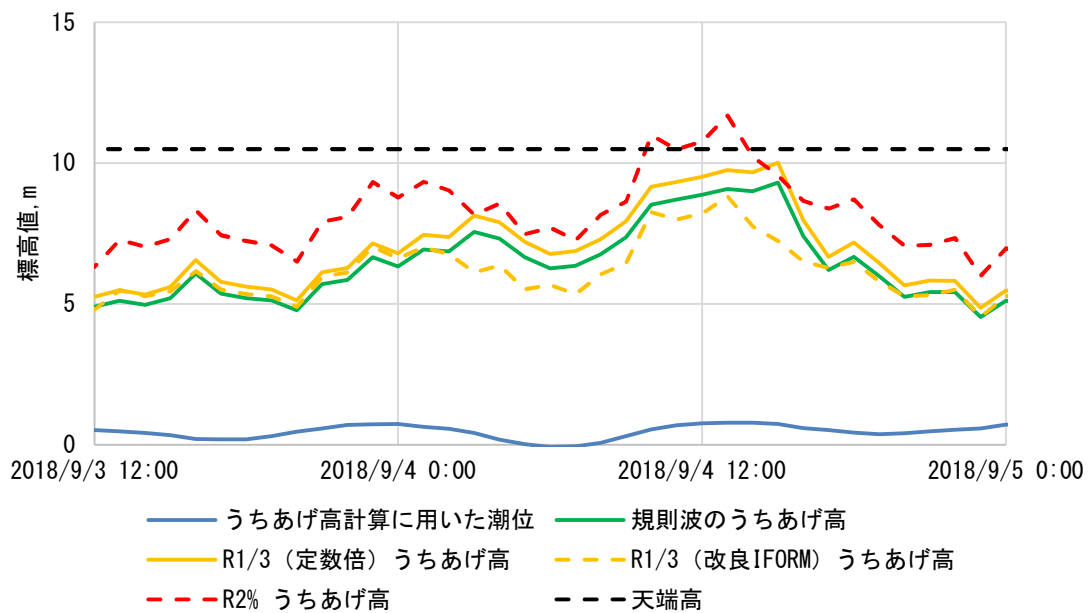


図-3.2.2.27 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(高知海岸 (戸原工区)、2018 年台風第 21 号)

④ まとめ

本事例の検証から、以下の知見が得られた。

- ・ 現地での越波時間を的確に再現するには、サーフビートの上昇量を考慮することが必要である。
- ・ $R_{50\%}$ に対応する規則波のうちあげ高は、サーフビートの上昇量を考慮しても 2017 年台風第 21 号を除き、越波時刻において、天端高を上回らなかったことから、波の不規則性を考慮することが必要である。
- ・ 規則波のうちあげ高を定数倍 (1.09 倍) することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値はサーフビートの上昇量を考慮することで、2 事例で天端高を越えていた。
- ・ 周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、サーフビートの上昇量を考慮しても天端高を上回らず、高知海岸においては、より大きなうちあげ高代表値を用いる必要があることが示唆された。
- ・ 周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、サーフビートの上昇量を考慮することで、越波を概ね再現出来た。背後の道路への越波を再現するためには、 $R_{2\%}$ のうちあげ高代表値を用いる必要があることが示唆された。
- ・ ただし、本事例では、道路施設の破損や土砂や流木の飛散程度の被害状況であり、家屋等の被害は生じていなかったことから、背後の利用状況に応じて、予測に用いるうちあげ高代表値を検討する必要がある。

(6) 大磯海岸における検証

2017 年台風第 21 号は、大磯海岸においても、越波は背後の道路への被害をもたらした。
写真-3.2.2.8 に越波による道路への土砂の飛散や防護柵の破損の状況を示す。

また、3. 1. 3 の検証では、2019 年台風第 19 号において、改良仮想勾配法 1/100 の規則波のうちあげ高が、台風通過後に実施された遡上痕跡の計測結果 (Shimozono et al., 2020) より 4m 程度高く、玉田らによる $R_{2\%}$ のうちあげ高が若干高いことを示しているが、いずれも海底勾配が 1/40 程度である大磯海岸では、表-3.1.6.1 に示す対応関係から適切な算定方法による検証とはなっていない。また、遡上痕跡の計測結果を再整理すると、図-3.2.2.28 に示すように、予測地点の近傍では、標高値で最大 13.0m を越える痕跡が確認されており、背後に位置する西湘バイパスでは越波により通行止めが生じた。

そこで、2 事例について、改めてどのうちあげ高代表値が天端高を越えるか、近傍の痕跡を再現出来るか検証を実施した。



写真-3.2.2.8 越波による被害状況 (神奈川県提供)



図-3.2.2.28 遡上痕跡の計測結果 (Shimozono et al. ; 2020、地理院地図に加筆)

① 大磯海岸東小磯地先（2017 年台風第 21 号）

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.29 に示す。大磯海岸は、表法先から砕波点までの勾配が 1/40-1/50 程度であるため、改良 IFORM の周期補正については、海底勾配が 1/50 程度再現性が確認されている 1.5 倍により算定した。また、規則波のうちあげ高は改良仮想勾配法（中村ら）と改良仮想勾配法 1/100（加藤ら）を 1:1 の比率で内挿することで求めた。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値と規則波のうちあげ高を定数倍（1.09 倍）して求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、天端高を越える結果となった。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.30 に示す。全ての算定値が天端高を越える結果となった。

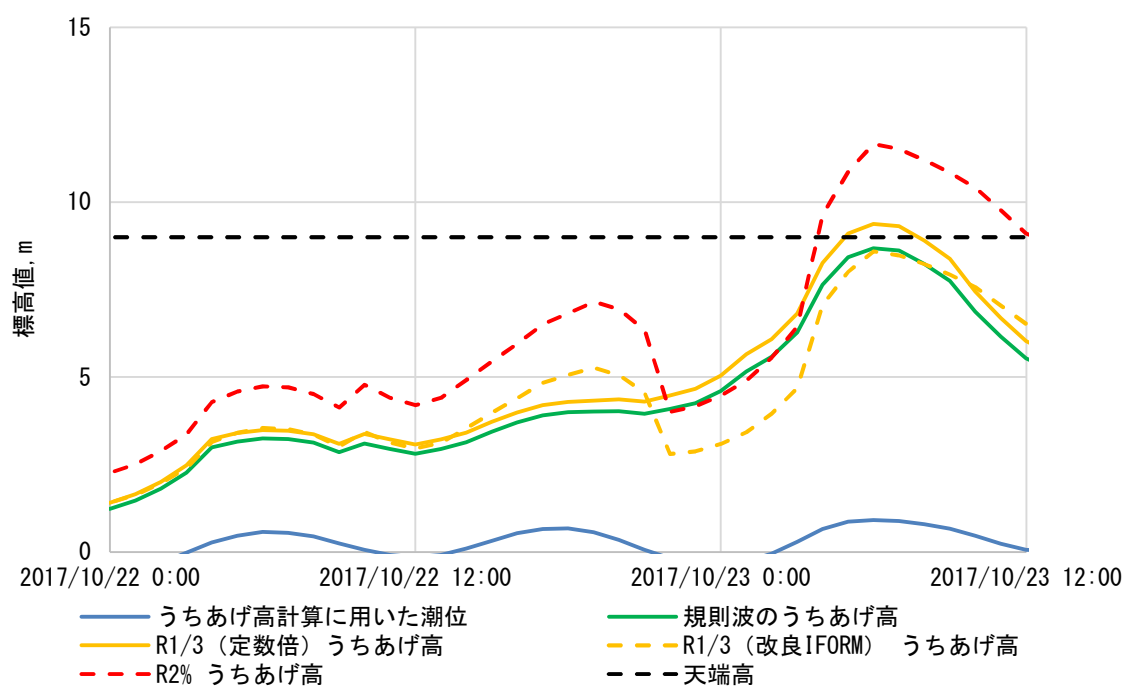


図-3.2.2.29 うちあげ高再現計算結果
(大磯海岸（東小磯地先）、2017 年台風第 21 号)

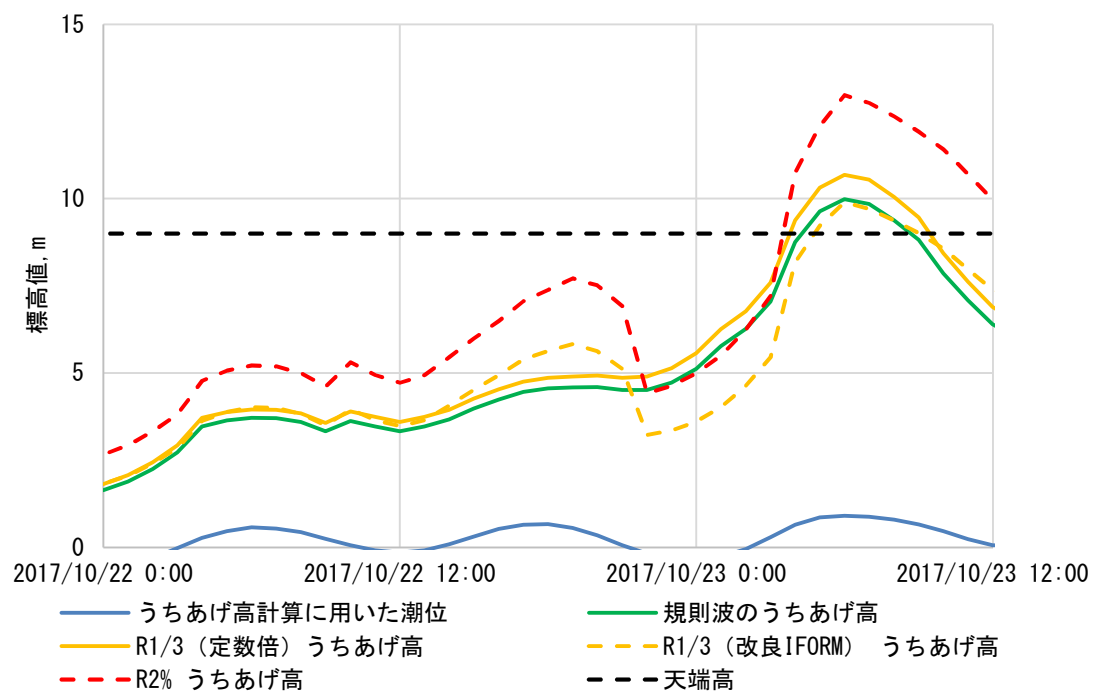


図-3.2.2.30 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(大磯海岸 (東小磯地先)、2017 年台風第 21 号)

② 大磯海岸東小磯地先（2019 年台風第 19 号）

本事例では、越波被害に加えて、Shimozono et al. (2020) による痕跡調査の結果も得られているため、遡上痕跡との比較も実施した。うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.31 に示す。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値と規則波のうちあげ高を定数倍（1.09 倍）して求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、天端高を越える結果となった。また、算定地点付近の痕跡値に対して、全ての算定値が最大値と最小値の間に収まった。

また、サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.32 に示す。全ての算定値も痕跡値の最小値を超える結果となるとともに、改良 IFORM による $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値を除いて天端高を越える結果となった。また、改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値が遡上痕跡の最大値の差が 2m 以内となり、痕跡の平均値（10.3m 程度）より大きい結果となった。

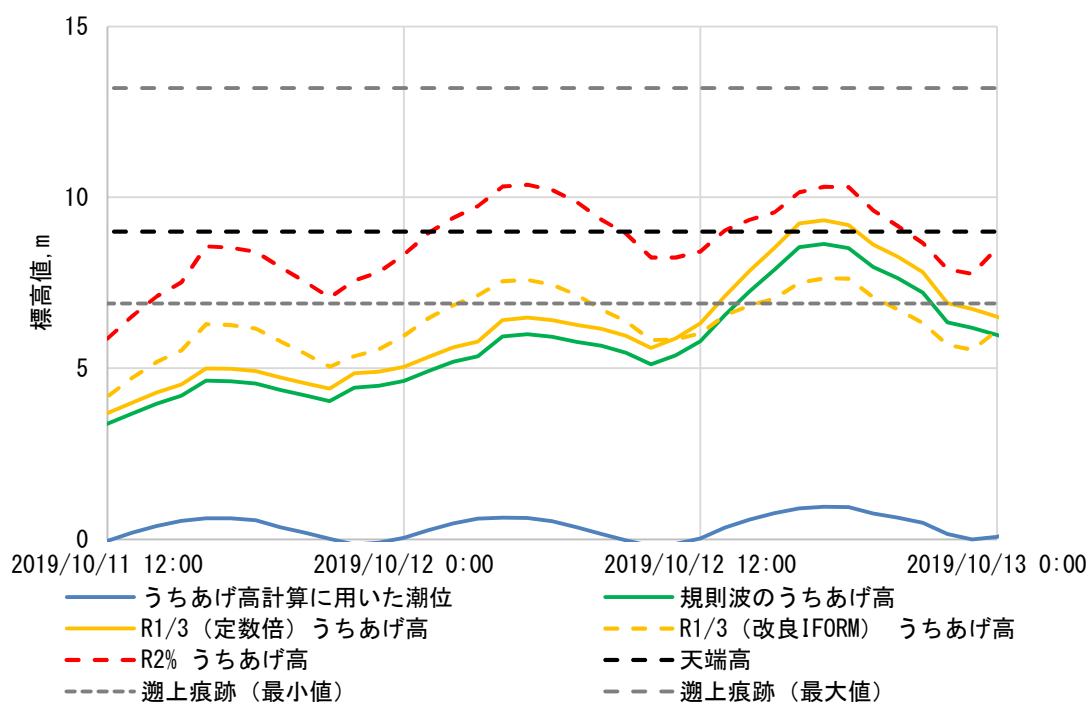


図-3.2.2.31 うちあげ高再現計算結果
(大磯海岸（東小磯地先）、2019 年台風第 19 号)

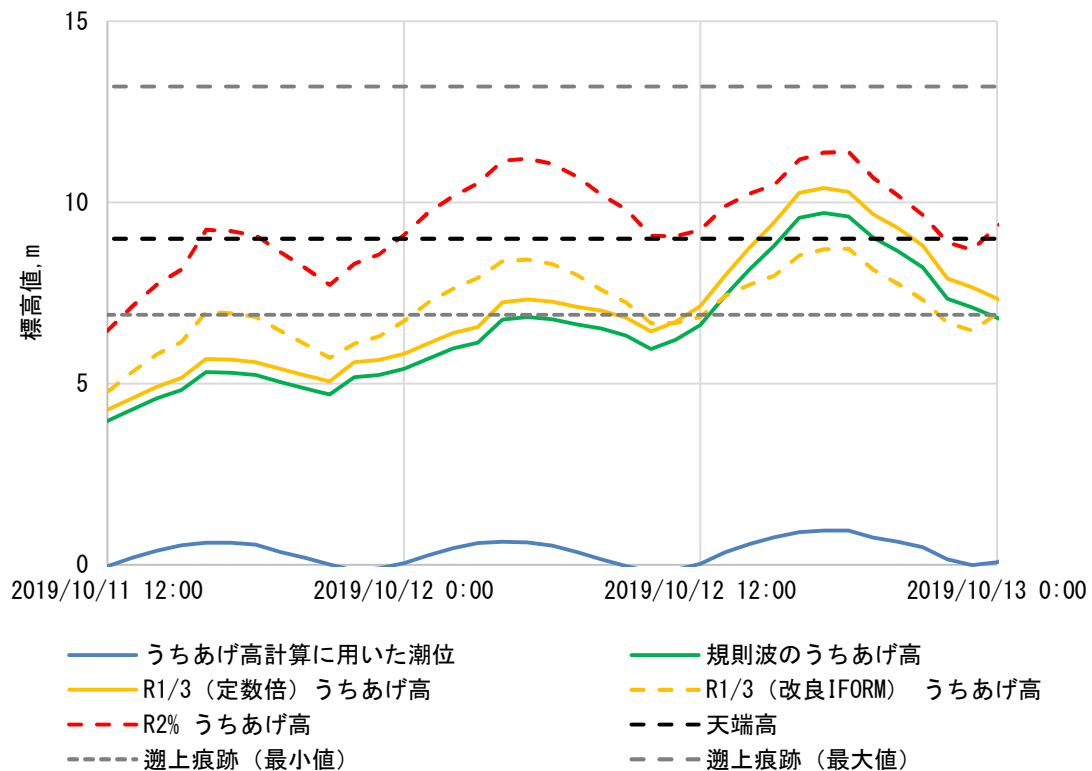


図-3.2.2.32 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(大磯海岸 (東小磯地先)、2019 年台風第 19 号)

③ まとめ

本事例の検証から、以下の知見が得られた。

- ・ サーフビートの上昇量を考慮することで、痕跡に対する再現性が向上する。
- ・ $R_{50\%}$ に対応する規則波のうちあげ高及び定数倍 (1.09 倍) することで求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、サーフビートの上昇量を考慮することで、両事例で天端高を上回った。
- ・ 周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は、サーフビートの上昇量を考慮しても天端高を上回らず、大磯海岸においては、より大きなうちあげ高代表値を用いる必要があることが示唆された。
- ・ 周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、遡上痕跡の平均値を概ね再現できた。

(7) 平塚海岸における検証

3. 1. 3 の検証では、2019 年台風第 19 号において、改良仮想勾配法 1/100 の規則波のうちあげ高が、台風通過後に実施された遡上痕跡の計測結果 (Shimozono et al.; 2020) を概ね再現することが分かっている。一方遡上痕跡の計測結果を再整理すると、図-3.2.2.33 に示すように、予測地点の近傍では、痕跡が複数得られており、標高値で最大 9.0m 程度の痕跡も確認されている。これらの痕跡に対する算定精度の検証を実施した。なお、概ね海底勾配が 1/50 程度であったことから、改良 IFORM の周期補正については、海底勾配が 1/50 程度再現性が確認されている 1.5 倍により算定した。また、規則波のうちあげ高は改良仮想勾配法 (中村ら) と改良仮想勾配法 1/100 (加藤ら) を 1:1 の比率で内挿することで求めることとした。



図-3.2.2.33 遡上痕跡の計測結果 (Shimozono et al. ; 2020、地理院地図に加筆)

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.34 に示す。周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、痕跡の最小値よりやや小さい。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.35 に示す。規則波のうちあげ高を定数倍 (1.09 倍) して求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は遡上痕跡の最小値に近くなり、周期補正を考慮した改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値は、痕跡の最小値と最大値の間となり、痕跡に対する再現性が向上することが分かる。

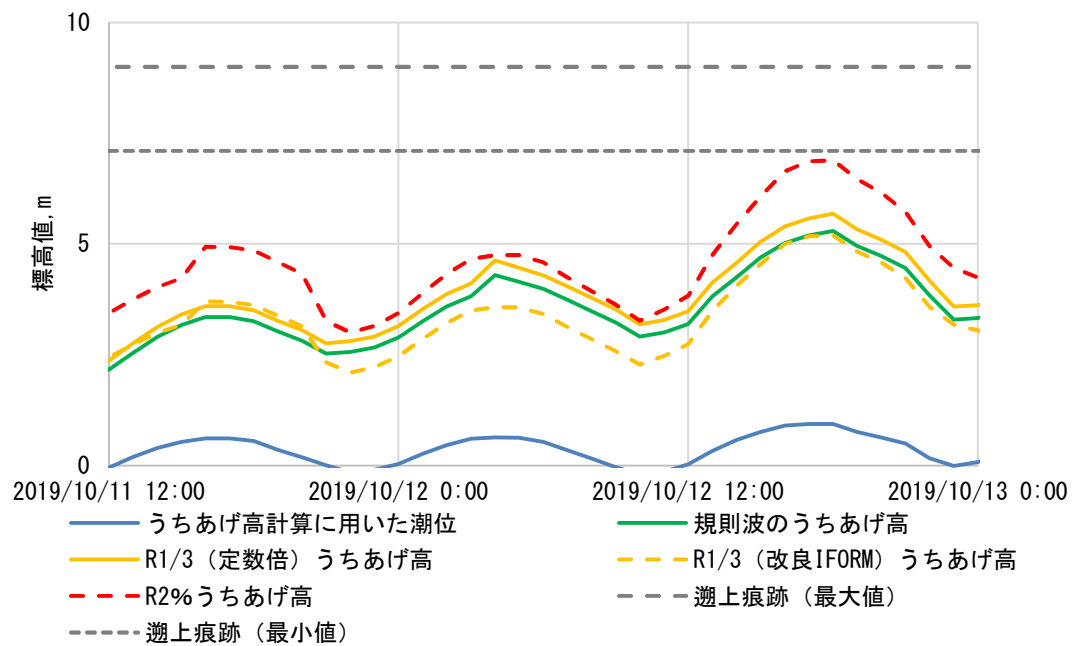


図-3. 2. 2. 34 うちあげ高再現計算結果
(平塚海岸、2019 年台風第 19 号)

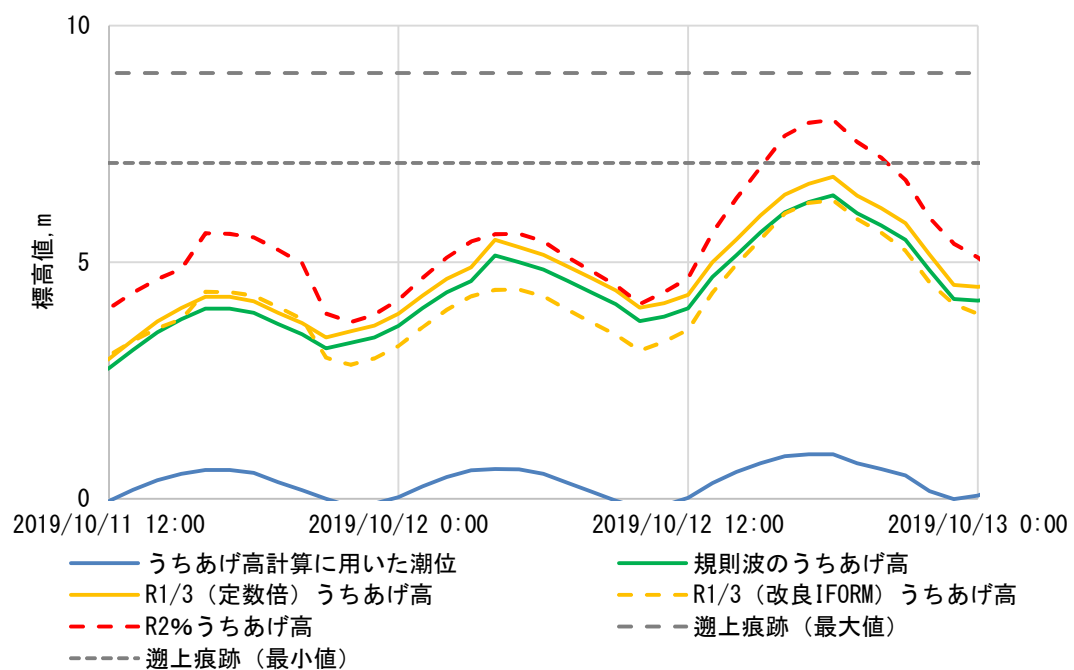


図-3. 2. 2. 35 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(平塚海岸、2019 年台風第 19 号)

(8) 周参見漁港海岸における検証

3. 1. 2 の検証では、規則波を対象とした算定方法で得られたうちあげ高算定値が越波痕跡より 1m 以上小さく、潮位予測の過小傾向が影響していた。そこで、潮位予測を観測値で補正した上で、規則波を対象とした算定方法に加えて、改良 IFORM による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ も含めて再検証を実施した。なお、越波痕跡は、沿岸方向に概ね 1km の範囲に確認された痕跡を再整理して比較した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3. 2. 2. 36 に示す。遡上痕跡に対して、いずれの算定値も過少傾向である。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3. 2. 2. 37 に示す。改良 IFORM による $R_{2\%}$ の算定値と遡上痕跡が同程度となり、再現性が向上することが分かる。

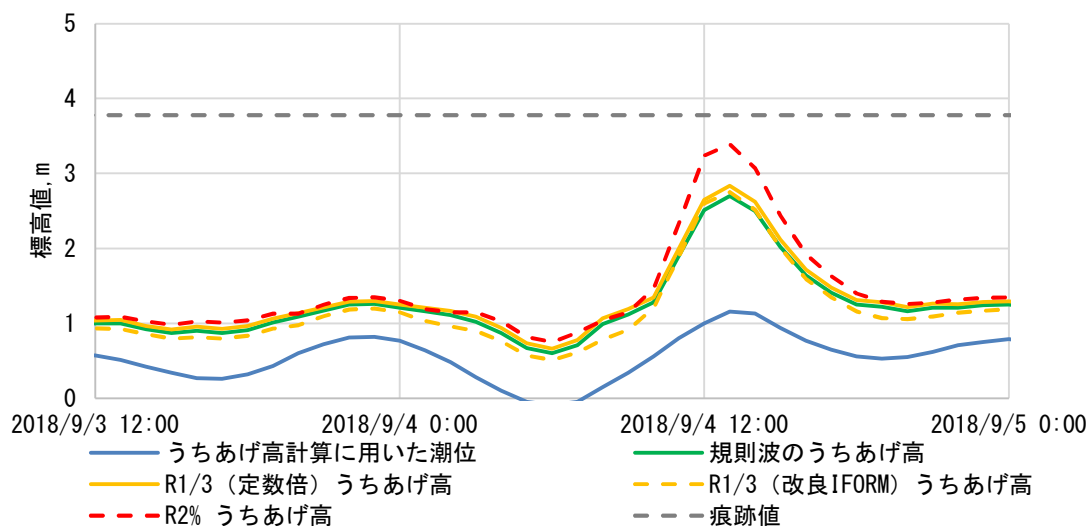


図-3. 2. 2. 36 うちあげ高再現計算結果

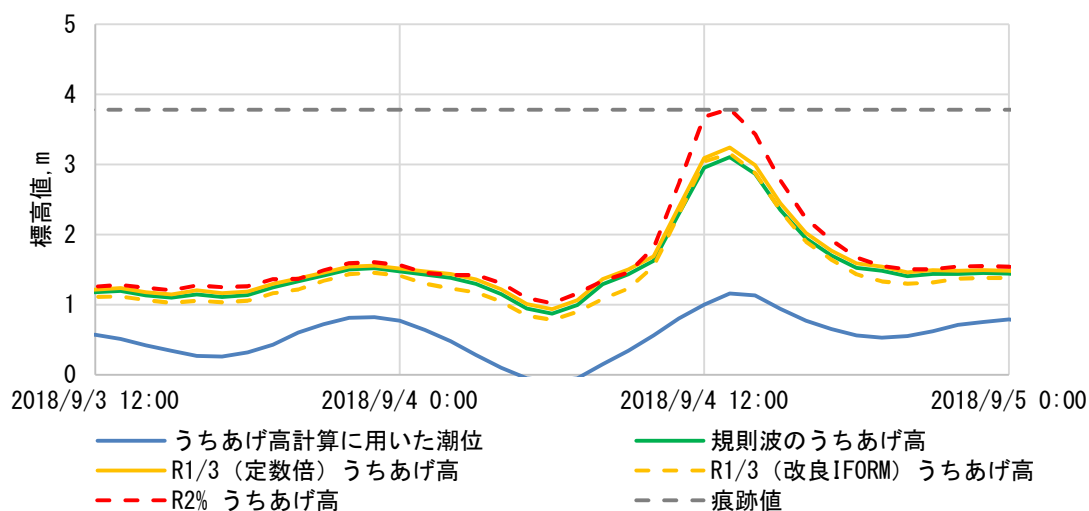


図-3. 2. 2. 37 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果

(9) 白浜海岸

3. 1. 2 の検証では、規則波を対象とした算定方法で得られたうちあげ高算定値が遡上痕跡よりやや小さいことが分かっている。そこで、規則波を対象とした算定方法に加えて、改良 IFORM による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ も含めて再検証を実施した。なお、越波痕跡は、沿岸方向に概ね 1km の範囲に確認された痕跡を再整理して比較した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.38 に示す。改良 IFORM による $R_{2\%}$ の算定値は遡上痕跡の最大値を上回り、規則波のうちあげ高と規則波のうちあげ高を定数倍 (1.09 倍) して求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は遡上痕跡の最大値と最小値の間にある。一方、改良 IFORM による $R_{2\%}$ や $R_{1/3}$ のうちあげ高と改良仮想勾配法(1/100)による規則波のうちあげ高はピーク時刻が異なる。図-3.2.2.39 に示すとおり、当該地点の計算に用いた断面は、T.P.-10.0m までの勾配が急勾配 (1/10 程度) で、そこから 1/100 程度より緩い状況である。一方、改良 IFORM によるうちあげ高のピーク時刻は波高 (換算沖波波高 10.5m 程度) が高く、砕波点は T.P.-20.0m 程度であるが、改良仮想勾配法(1/100)のうちあげ高のピーク時刻は波高が相対的に低く (換算沖波波高 6.0m 程度) の砕波点は、T.P.-10m 程度であり、後者は、改良仮想勾配法 1/100 ではなく、改良仮想勾配法の適用範囲と考えられる。このことから、改良仮想勾配法 1/100 の算定式の適用にあたっては、岸沖方向における海底断面の変化に留意する必要があると考えられる。

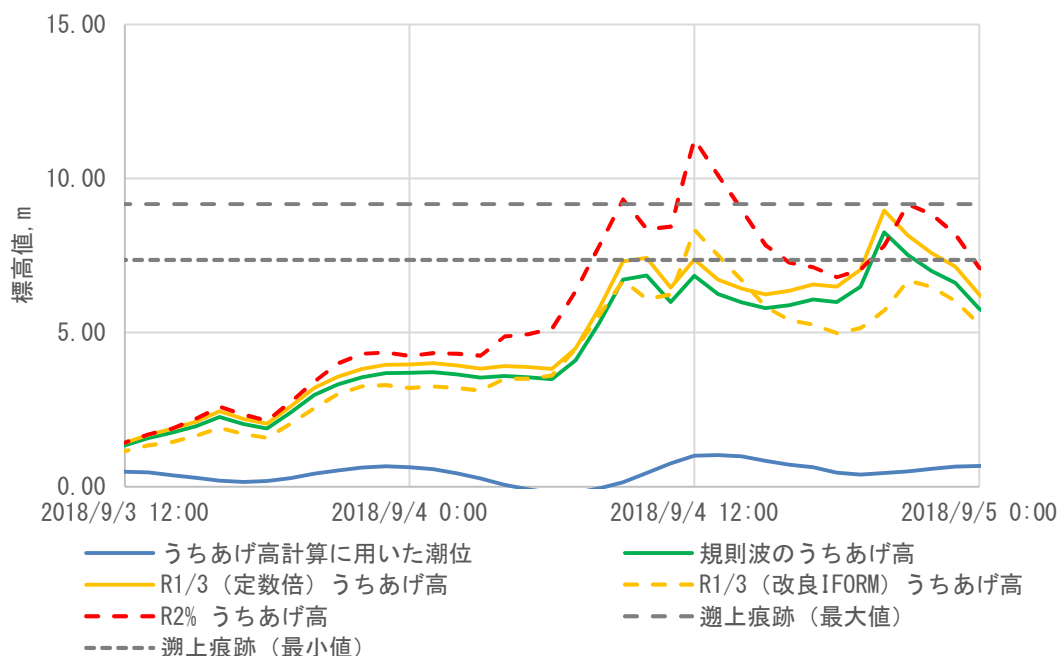


図-3.2.2.38 うちあげ高再現計算結果
(白浜海岸、2018 年台風第 21 号)

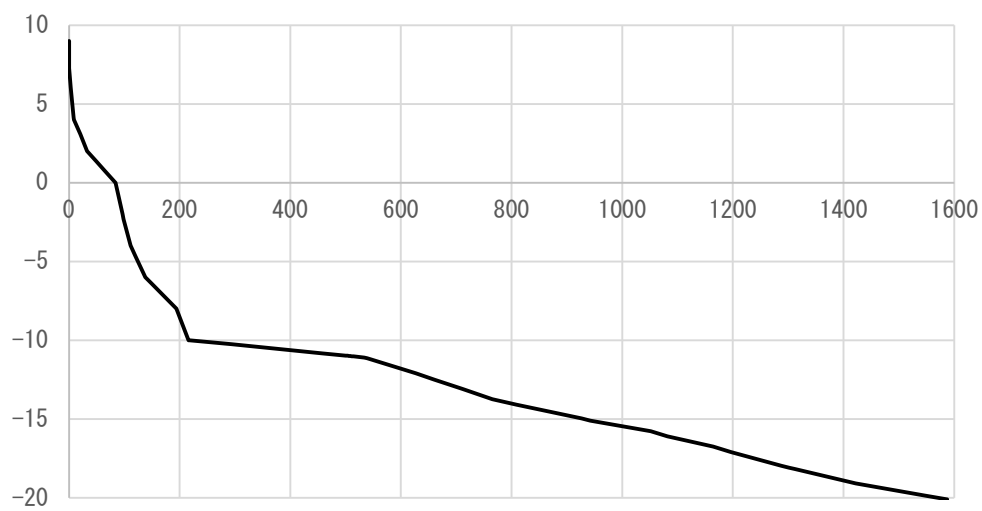


図-3. 2. 2. 39 白浜海岸の断面

(10) 日高港海岸

3. 1. 2 の検証では、規則波を対象とした算定方法で得られたうちあげ高算定値が遡上痕跡の平均値よりやや小さいことが分かっている。そこで、規則波を対象とした算定方法に加えて、改良 IFORM による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ も含めて再検証を実施した。なお、越波痕跡は、沿岸方向に概ね 1km の範囲に確認された痕跡を再整理して比較した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3. 2. 2. 40 に示す。改良 IFORM による $R_{2\%}$ 及び $R_{1/3}$ の算定値は遡上痕跡の最大値と最小値の間にあり、規則波のうちあげ高と定数倍(1.09 倍)して求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は遡上痕跡の最小値と同程度である。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3. 2. 2. 41 に示す。改良 IFORM による $R_{2\%}$ の算定値と遡上痕跡の最大値が同程度となり、再現性が向上することが分かる。

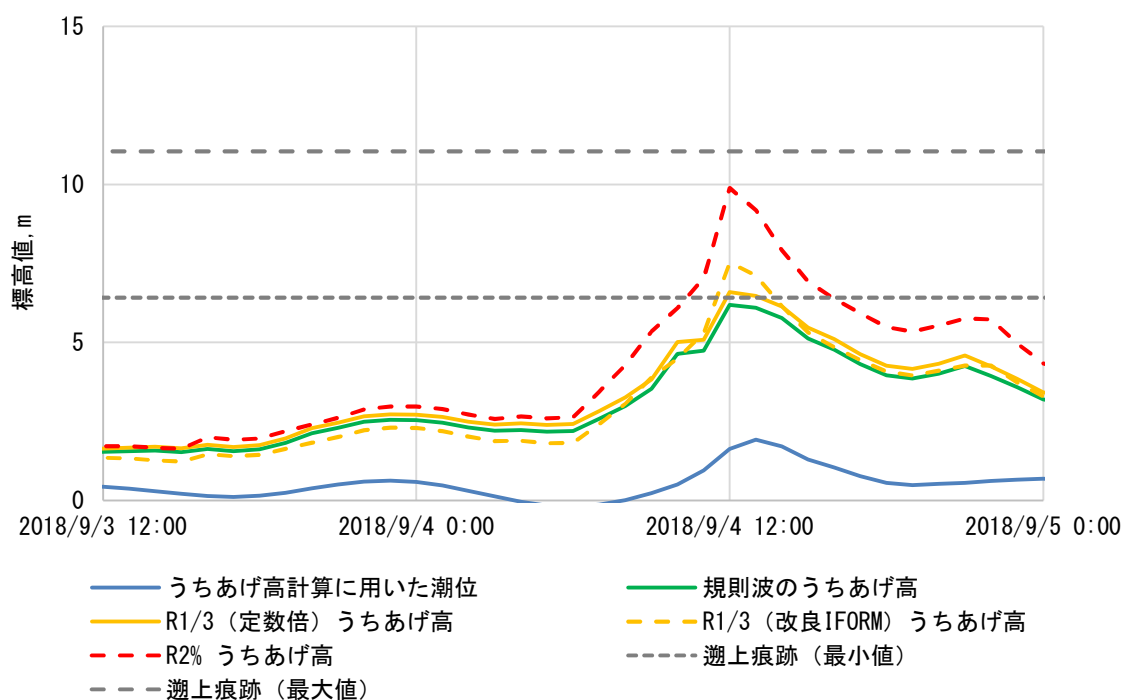


図-3. 2. 2. 40 うちあげ高再現計算結果
(日高港海岸、2018 年台風第 21 号)

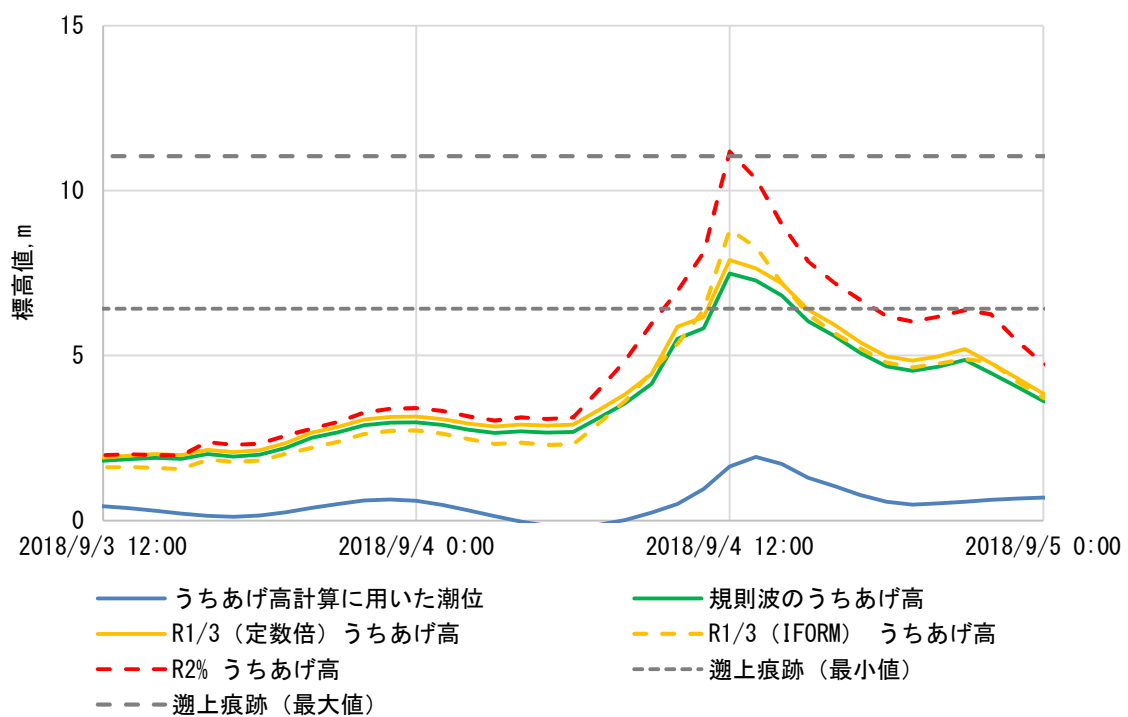


図-3.2.2.41 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果
(日高港海岸、2018 年台風第 21 号)

(11) 二色港海岸

3. 1. 2 の検証では、規則波を対象とした算定方法で得られたうちあげ高算定値が遡上痕跡の平均値よりやや大きいことが分かっている。そこで、規則波を対象とした算定方法に加えて、改良 IFORM による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ も含めて再検証を実施した。なお、越波痕跡は、沿岸方向に概ね 1km の範囲に確認された痕跡を再整理して比較した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.42 に示す。すべての算定値は遡上痕跡の最大値と最小値の間にある。

サーフビートの上昇量をうちあげ高に加えた結果を図-3.2.2.43 に示す。改良 IFORM による $R_{2\%}$ の算定値と遡上痕跡の最大値が同程度となり、再現性が向上することが分かる。

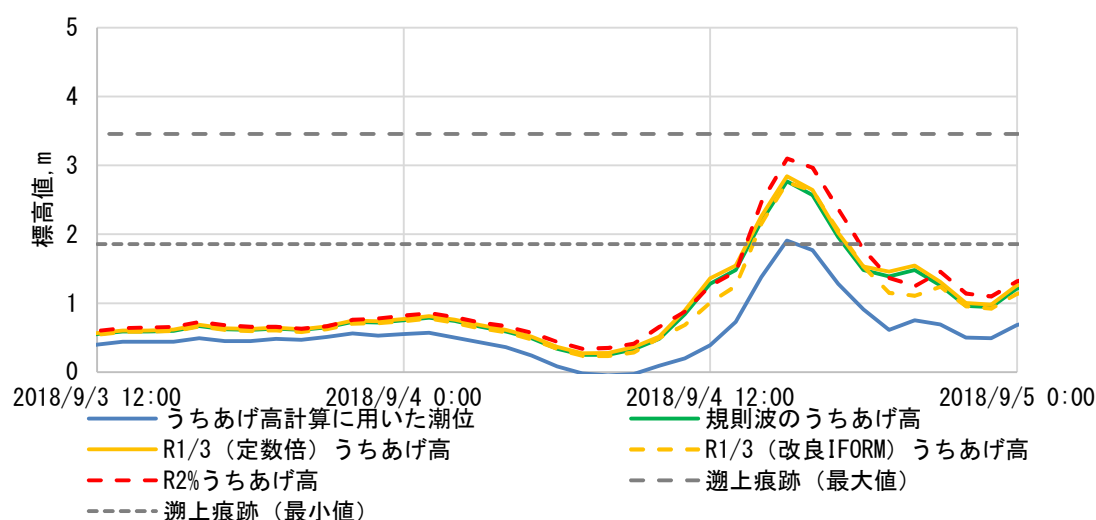


図-3.2.2.42 うちあげ高再現計算結果

(二色港海岸、2018 年台風第 21 号)

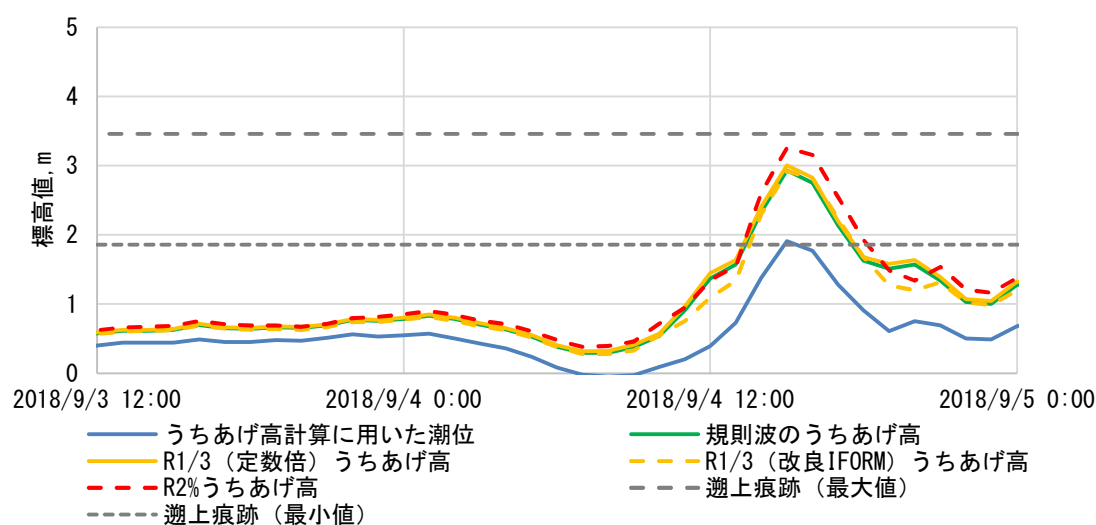


図-3.2.2.43 サーフビートの上昇量を考慮したうちあげ高再現計算結果

(二色港海岸、2018 年台風第 21 号)

(12) 神戸港海岸

3. 1. 2 の検証では、規則波を対象とした算定方法で得られたうちあげ高算定値が遡上痕跡の平均値よりやや小さいことが分かっている。そこで、規則波を対象とした算定方法に加えて、改良 IFORM による $R_{1/3}$ 、 $R_{2\%}$ も含めて再検証を実施した。なお、越波痕跡は、沿岸方向に概ね 1km の範囲に確認された痕跡を再整理して比較した。

うちあげ高の再現計算を実施した結果を図-3.2.2.44 に示す。改良 IFORM による $R_{1/3}$ や規則波のうちあげ高算定値、規則波のうちあげ高を定数倍 (1.09 倍) して求めた $R_{1/3}$ のうちあげ高算定値は遡上痕跡の最大値と概ね合致する。当該地点前面には、離岸堤が整備されており、今回の検証では施設による消波機能を考慮していないため、改良 IFORM による $R_{2\%}$ や規則波のうちあげ高算定値がやや遡上痕跡より大きい結果となったと考えられる。

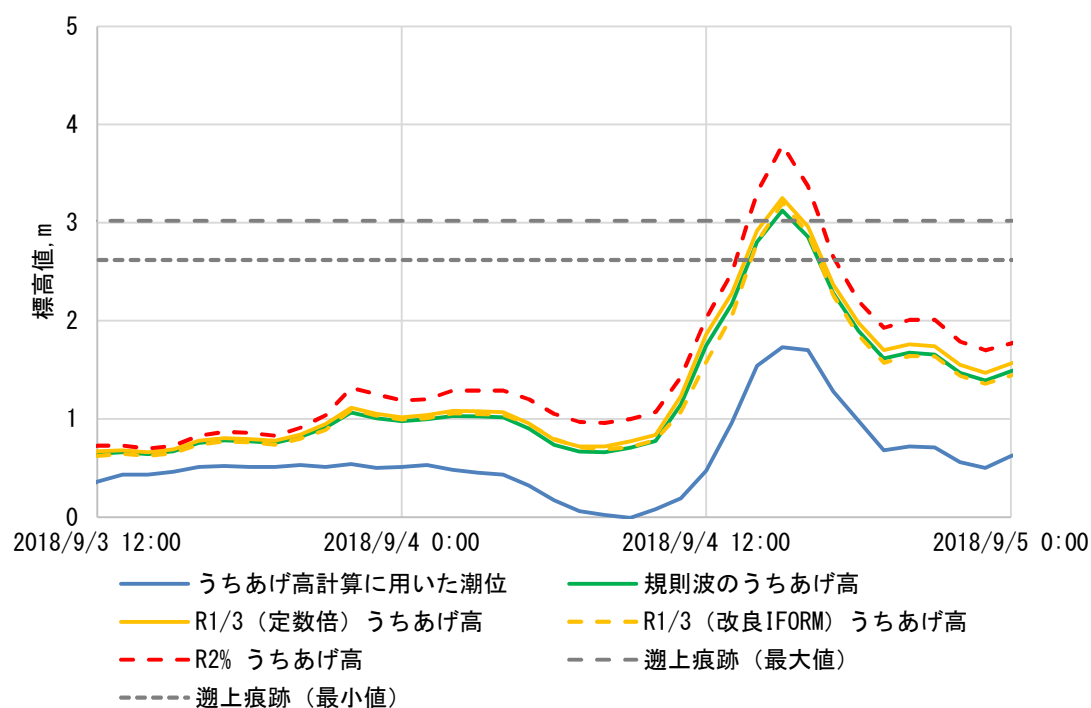


図-3.2.2.44 うちあげ高再現計算結果
(神戸港海岸、2018 年台風第 21 号)

3. 2. 3 まとめ

本検証により、以下の知見が得られた。

- 表法先から砕波点までの勾配が急な海岸では、適切な潮位・波浪の推算値を用いることにより、 $R_{1/3}$ や $R_{2\%}$ のうちあげ高を算定することで、7事例すべてで越波実態を再現できることが確認できたが、規則波のうちあげ高の算定方法（中村らの改良仮想勾配法）で越波実態を再現できた事例は、7事例中3事例に限られた。
- 表法先から砕波点までの勾配が緩やかな海岸では、適切な潮位・波浪の推算値を用いることにより、越波時刻との対応関係から、うちあげ高を過小評価している可能性があり、サーフビートの上昇量を考慮する必要があることが示唆された。また、地点の背後地の状況も踏まえて、 $R_{1/3}$ や $R_{2\%}$ のうちあげ高の算定値を用いることが必要であることが示唆された。
- 横浜港海岸における検証では、規則波のうちあげ高や $R_{1/3}$ や $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値が天端高を超える結果となるとともに、高山らや田中らによる越波流量の算定値が許容越波流量を越えており、越波流量を算定する手法が有効であることが分かった。
- 遡上痕跡との比較の結果、改良 IFORM による $R_{2\%}$ のうちあげ高算定値と遡上痕跡の最大値が概ね対応していることが分かった。

3. 3 うちあげ高予測の総合的な評価

前節では、個別の事例に対して、うちあげ高が適切に予測できる算定方法の検証を中心に紹介した。今後の高潮の予警報では、高潮予報海岸に指定された場合は、潮位予測に基づく発表に加えて、うちあげ高予測に基づく発表も行われることとなる。本節では、過去8年程度（2016～2023 年）の期間において沿岸部に被害をもたらした台風・冬季風浪について、うちあげ高予測を見込むことによる効果を検証する。また、これまでの精度検証では、越波実績や痕跡調査の結果を確認できる事例について主に見逃しの観点での検証を実施してきたため、空振りの観点での検証が十分ではない地点も多い。そこで、令和5年（2023 年）8 月～令和6 年（2024 年）7 月の一年間を対象に、うちあげ高予測を見込んだ場合の見逃しや空振りを評価するため、捕捉率等を検証した結果を示す。

3. 3. 1 平成 26 年（2014 年）～令和 5 年（2023 年）の台風等における予警報の改善効果の検証

潮位予測に基づく発表に加えて、うちあげ高予測に基づく発表を考慮した場合の警報・注意報の発表状況を再現計算により確認した結果を表-3.3.1.1 に示す。潮位予測は、令和 8 年 5 月 28 日以前の発表基準による当時の発表状況をもとに整理した。また、図-2.3.3.3 に示す算定方法の使い分けを実施しているうちあげ高予測システムで計算された規則波を対象としたうちあげ高の再現計算結果が、潮位・波浪予測の初期時刻から 3 時間以内に各海岸における天端高を越える予測結果となったものを「警報」発表として整理した。実際に浸水が発生した 23 事例に対して、潮位予測のみの場合は、8 事例が注意報のみの発表であったが、うちあげ高を加味することで、このうち 3 事例は警報が発表できることが確認できる。また、規則波を対象としたうちあげ高の再現計算結果でも「警報」発表に至らなかった 5 事例について、 $R_{1/3}$ の算定方法を用いて検証した結果、1 事例を除き警報が発表できることが確認できた。ただし、検証事例数は 23 事例と依然多くないため、引き続き精度検証を通じて、適切な算定方法を選定することが重要である。

表-3.3.1.1 うちあげ高再現計算による警報の発表状況

	潮位予測			潮位予測＋うちあげ高予測 (規則波の算定方法)			潮位予測＋うちあげ高予測 ($R_{1/3}$ の算定方法)		
	浸水実績	注意報	警報	浸水実績	注意報	警報	浸水実績	注意報	警報
H28台風10号	2	2	0	2	0	2	2	0	2
H29台風21号	6	2	4	6	2	4	6	0	6
H30台風21号	3	2	1	3	2	1	3	0	3
R1台風19号	6	0	6	6	0	6	6	0	6
R4.1冬季風浪	2	0	2	2	0	2	2	0	2
R4台風第14号	1	0	1	1	0	1	1	0	1
R5台風6号	2	1	1	2	0	2	2	0	2
R5台風7号	1	1	0	1	1	0	1	1	0
合 計	23	8	15	23	5	18	23	1	22

3. 3. 2 令和5年（2023年）8月～令和6年（2024年）7月における浸水被害の捕捉率・適中率の検証

令和5年（2023年）8月～令和6年（2024年）7月の間、高潮浸水の実績は2事例（2023年台風第6号）に限られるが、高潮警報（令和5年（2023年）7月から8月まで継続して発表された回数含む）は計44回（台風36回、台風以外8回）発表されており、浸水実績があった2事例のうち1事例では高潮警報の発表はない状況であった。さらに、うちあげ高を加味することで、捕捉率（警報を発表し実際に浸水が生じた回数／浸水が生じた回数）・適中率（警報を発表し実際に浸水が生じた回数／警報を発表した回数）がどのように変化するか検討した結果を表-3.3.2.1に示す。うちあげ高予測の結果は、約300地点において、図-2.3.3.3に示す算定方法の使い分けを実施しているうちあげ高予測システムで計算された規則波を対象とした算定方法による算定値を用いて、天端高と比較して整理した。なお、表中の（）で記載した数字は、台風要因によるものの数を示している。

浸水被害がなかったが、警報が発表される自治体数は3つ（台風1つ、台風以外2つ）増えるものの、捕捉率は100%となるとともに、適中率は軽微であるが若干向上する。台風の事例で、うちあげ高が天端高を越える予測となった3事例のうち、2事例は浸水被害があり適中率は高い。一方、台風以外の事例では、うちあげ高が天端高を越える予測となった2事例とも浸水被害は確認されなかった。前節までの検証で、規則波を対象としたうちあげ高より高い $R_{1/3}$ 等の算定方法を使うことで、越波実態に対する再現性が向上することが示されているため、今後の算定方法の見直しにより、「空振り」となる事例は増えることも考えられるが、うちあげ高予測を加味することで著しく空振りが増えることはないことが確認できる。台風事例での精度が台風以外を要因としたものより捕捉率や適中率が高い傾向は読み取れるが、検証対象期間はあまり大きな台風等の擾乱が生じなかったことから、今後うちあげ高予測システムを運用しながらさらなる検証が必要である。

表-3.3.2.1 浸水被害の捕捉率・適中率の比較結果

			浸水被害有	浸水被害無	捕捉率 (警報を発表し実際に浸水が生じた回数) / (浸水が発生した回数)	適中率 (警報を発表し実際に浸水が生じた回数) / (警報を発表した回数)
従来	潮位予測	警報有	1 (1)	43 (33)	1回/2回=50% (1回/2回=50%)	1回/44回=2% (1回/34回=3%)
		警報無	1 (1)	—		
改善した場合	潮位予測＋ うちあげ高予測	警報有	2 (2)	46 (34)	2回/2回=100% (2回/2回=100%)	2回/48回=4% (2回/36回=6%)
		警報無	0	—		

3. 4 まとめ

3. 1 の検証では、2. 3. 3 で示した海底勾配等の特徴を踏まえて選定されたうちあげ高算定方法（算定方法の使い分け）に適切な潮位・波浪予測値を入力することにより、各うちあげ高代表値を一定の精度で予測できることを示し、各算定方法とうちあげ高代表値の対応関係を整理した。

また、3. 2 では、表法先から砕波点までの勾配が急な海岸、緩やかな海岸ごとに、どのような代表うちあげ高が越波被害や痕跡を再現するか検証を実施し、対象地点の背後地の状況も踏まえて、波の不規則性を考慮したうちあげ高の算定方法を用いることが必要であることを示した。

さらに、3. 3 では、沿岸部に被害をもたらした台風・冬季風浪について、うちあげ高予測を高潮の予警報に見込むことによる効果を検証するとともに、令和 5 年（2023 年）8 月～令和 6 年（2024 年）7 月の一年間を対象に、うちあげ高予測を見込んだ場合の予警報の見逃しや空振りを評価し、うちあげ高予測を考慮することで高潮の予警報が改善されることを確認した。

4. まとめと今後の課題

本資料では、うちあげ高予測システムにおいて用いられているうちあげ高予測の手法及びこれまで実施してきた精度検証の結果を整理した。その成果を以下にまとめる。

- ・ 2章では、気象庁の潮位・波浪予測値を入力値として、対象地点の地形や施設形状を考慮してうちあげ高をリアルタイムで予測するシステムの全体構成を整理した。また、うちあげ高予測に使用する波浪の要件を整理した上で、沿岸地形による浅海効果を考慮して波浪を推算する方法を示した。さらに、予測に用いるうちあげ高の算定方法を示し、算定方法の使い分けを堤防等の設置位置や海底勾配から整理するとともに、うちあげ高算定にあたり、離岸堤と人工リーフ、消波工について、消波施設の考慮方法を整理した。
- ・ 3章では、海底勾配等の特徴を踏まえて選定されたうちあげ高算定方法に適切な潮位・波浪予測値を入力することにより、各うちあげ高代表値を一定の精度で予測できることを示し、各算定方法とうちあげ高代表値の対応関係を整理した。また、表法先から砕波点までの勾配が急な海岸、表法先から砕波点までの勾配が緩やかな海岸ごとに、どのような代表うちあげ高が越波被害や痕跡を再現するか検証を実施し、対象地点の背後地の状況も踏まえて、波の不規則性を考慮したうちあげ高の算定方法を用いることが必要であることを示した。さらに、沿岸部に被害をもたらした台風・冬季風浪について、うちあげ高予測を見込むことによる効果を検証するとともに、令和5年（2023年）8月～令和6年（2024年）7月の一年間を対象に、うちあげ高予測を見込んだ場合の予警報の見逃しや空振りを評価し、うちあげ高予測を考慮することで高潮の予警報が改善されることを確認した。

現状において、精度検証事例は限られており、予測を実施している約 500 地点全てにおいて検証がなされているものではない。しかし、3章で述べた精度検証の結果から、うちあげ高予測システムによる予測情報は、高潮による浸水被害からの的確な避難判断など、高潮警戒避難体制の充実・強化に資する予測情報として一定の水準の精度があることが確認され、令和7年（2025年）の気象業務法及び水防法の改正により、波のうちあげ高予測システムの結果の一部が、高潮の予警報に活用されはじめたものである。高潮予報海岸は、当該海岸の存する関係都道府県知事と協議・調整を行い、国土交通大臣が指定を進めていくものであり、指定に際しては、波のうちあげ高や現地の施設状況・浸水状況等の観測、監視体制を整備することが必要である。

また、うちあげ高予測システムによる予測精度の更なる向上が必要であり、その技術的課題としては、以下の内容があげられる。

- ・うちあげ高算定におけるサーフビートの考慮

3. 2. 2の検証では、特に遠浅の海岸で、サーフビートの上昇量を加味することで、越波実績や遡上痕跡の再現性が向上することが分かっている。サーフビートの上昇量を適切に加味することで、予測精度の向上につながるが、必ずしも潮位の上昇が発生するわけではないため、その効果を考慮するにあたっては空振りの観点からの検証が必要である。そのため、うちあげ高予測計算に用いる波浪条件からサーフビートの上昇量を適切に算定する手法の検討が必要である。

- ・表法先から砕波点までの勾配に応じた算定方法の検討

各算定方法の適用範囲について、3. 2. 1の検証を通じて、海底勾配として表法先から砕波点までの勾配を用いて整理した。砕波点の位置は、波浪・潮位条件によって変化するため、海底勾配として表法先から砕波点までの勾配も時々刻々の波浪・潮位条件に応じて変化する。各地点で、適切な算定方法を選択するにあたり、定量的な精度検証を通じて、この変化を考慮した算定方法の改良の検討が引き続き求められる。

- ・うちあげ高予測の精度検証事例の蓄積と検証

全国の海岸管理者の協力を得ながらうちあげ高予測の精度検証を行っているところだが、高波時の検証事例は依然として限られている。越波実態との対比によりうちあげ高予測の検証を行うとともに、両者に乖離がある場合にはその原因の究明を行い、必要に応じて算定方法などを変更する必要がある。算定方法の変更の検討にあたっては、上述したサーフビートの影響や表法先から砕波点までの勾配に応じた算定方法のほか、3. 1や3. 2の検証と同様に、入力値となる気象庁の潮位・波浪予測値の誤差の影響や2. 2で述べた換算沖波波高の推算方法の検証等、多岐に亘る検討が必要になることに留意する必要がある。

- ・うちあげ高予測の精度検証に必要なうちあげ高の計測技術

うちあげ高予測の精度検証にはうちあげ高の定量的な計測値があることが望まれるが、大きな波力が作用する海岸堤防等においてうちあげ高を継続的に計測する技術は確立されているとは言えない。3章で紹介したビデオカメラや容量式波高計による観測のほか、ステップ式波高計（加藤ら；2011）や超音波式波高計による観測（福原ら；2020）が試験的に行われているが、機器の設置やデータの解析に一定の費用を要している。国土交通省の水管理・国土保全局の河川砂防技術研究開発ではLiDAR（レーダー光のセンサー）などを用いた安価なうちあげ高観測技術の開発が行われており、その実装に向けた検討が進んでいる。今後、うちあげ高計測技術の改良、開発を進めるとともに、得られる海岸毎の現地観測値を踏まえた定量的な検証を通じて、うちあげ高予測のより一層の精度向上を図ることが期待される。

5. 資料編

本システムの開発過程で、うちあげ高予測の精度向上のため、浅海域での波浪変形を考慮する浅海波浪モデルの開発、潮位・波浪予測の観測値補正の検討、緩勾配海岸におけるうちあげ高の算定式の開発を実施してきた。

以下に、資料編としてその検討の詳細を記載する。

(資料1) 浅海波浪モデルの開発

(資料2) 潮位・波浪予測の補正方法

(資料3) 緩勾配海岸を対象としたうちあげ高算定式の開発

資料 1 浅海波浪モデルの開発

1. 波浪推算モデルの選定

1) モデル選定の考え方

浅海域に適用できる代表的な波浪推算手法として、WAM (WAVE Model) や SWAN (Simulating WAVes Nearshore) が知られている。これらは、外力として風を与えて波浪を推算するものであり、特に沿岸域において重要な現象である浅水変形や屈折を考慮することができる。WAM は外洋での波浪推算に実績があり、浅海域への適用についても検討されている (川口ら ; 2003、橋本ら ; 2003, 2004a, 2004b)。SWAN は、WAM と同じく第 3 世代波浪推算モデルであり、地形性砕波も考慮されている。一方、海岸保全施設の設計においては、施設近傍での波浪の諸元を求めるため、風を考慮せずに入射波の屈折や砕波等を計算する波浪変形モデルが多用されてきた。波浪変形モデルは、風による波の発達等を考慮していないが、それ故に計算所要時間が短いという利点を持っている。

本研究では、リアルタイムのうちあげ高予測への活用を念頭に、図-5.1.1~3 に示す伊勢湾、播磨灘、有明海を対象として、1997~2004 年に各海域に影響を及ぼした主な台風について波浪推算を行った。計算領域は表-5.1.1 のように設定し、表-5.1.2 のように、領域毎に WAM(Cycle 4)、SWAN(40.41)、波浪変形モデル (エネルギー平衡方程式) を用いて、計算精度及び計算所要時間を比較した。本研究では中領域と狭領域での計算が検討対象となり、「沿岸波浪モデル」の守備範囲となる広領域 1~3 の波浪推算は全ケースとも WAM で行った。広領域 2 から広領域 3 へネスティングする際、方向スペクトルは f^5 乗則に従って周波数帯を高周波側に拡張し、スプライン補間によって方向分割数を上げた。ケース 1~4 では、広領域 3 の結果を境界条件として、中領域の波浪を計算格子間隔約 1.7km で推算し、さらにその結果を境界条件として狭領域での計算を行った。ケース 5 では、中領域の計算を行わず、広領域の計算結果を境界条件として、狭領域での波浪変形計算をエネルギー平衡方程式 (周波数 10 成分) で行った。なお、狭領域での計算格子間隔については、WAM と SWAN は約 0.4km とし、波浪変形モデルは計算量が少ないので 50m とした。

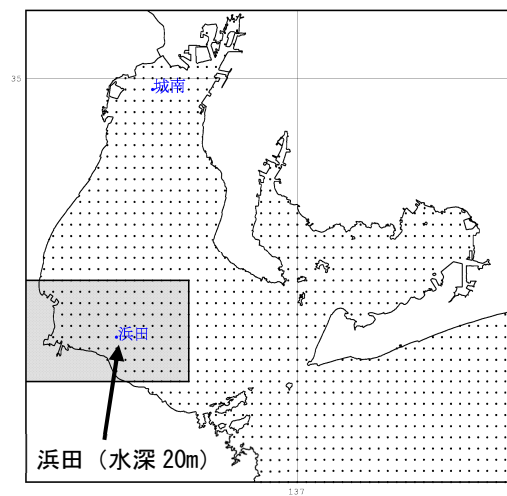


図-5.1.1 伊勢湾の中領域・狭領域（矢印：波浪観測点）

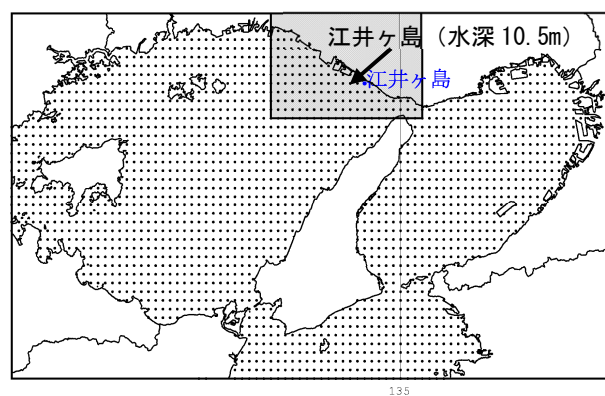


図-5.1.2 播磨灘の中領域・狭領域（矢印：波浪観測点）

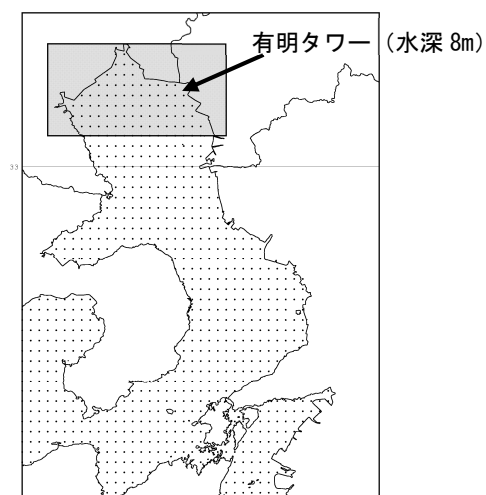


図-5.1.3 有明海の中領域・狭領域（矢印：波浪観測点）

表-5.1.1 各計算領域の設定

	広領域 1	広領域 2		広領域 3	中領域	狭領域
計算範囲	N 15.0～50.0 E 120.0～155.0	N 30.0～35.5 E 128.0～140.0	伊勢湾	N 34.0～35.25 E 136.5～137.75	N 34.4～35.1 E 136.5～137.4	N 34.55～34.7 E 136.5～136.8
			播磨灘	N 33.5～35.0 E 134.0～135.5	N 34.1～34.8 E 134.1～135.5	N 34.6～34.8 E 134.7～135.05
			有明海	N 32.0～33.5 E 129.25～130.75	N 32.45～33.25 E 130.05～130.75	N 33.05～33.2 E 130.1～130.45
格子数	71×71	49×23	伊勢湾	26×26	55×43	73×37
			播磨灘	31×31	85×43	85×49
			有明海	31×31	43×49	73×37
格子間隔	30分 (約50km)	15分 (約25km)	3分(約5km)		1分(約1.7km)	0.25分 (約0.4km)
周波数分割数	25成分		35成分			
	$f(1) \times 1.10^{(i-1)}$ ($f(1)= 0.04177248$)					
周期成分	約24秒～2.4秒		約24秒～0.9秒			
方向分割数	16成分		36成分			
入力風データ	傾度風モデル		RSM、ANEMOS、傾度風モデル			

表-5.1.2 計算ケース

ケース	中領域	狭領域
1	WAM	WAM
2	WAM	SWAN
3	WAM	波浪変形モデル
4	SWAN	SWAN
5	—	波浪変形モデル

計算は、PentiumIV(周波数 3.6GHz)を積んだパソコンで行った。また、水深データは、伊勢湾と播磨灘については中央防災会議（東南海、南海地震等に関する専門調査会）が整備したデータを、有明海については日本水路協会の JTOPO30 をもとに作成した。

外洋の風に関しては、傾度風モデル (Cardone-Myers ハイブリッドモデル(岡田ら; 1995)) と ECMWF データを四国沖ブイ(N29° 0' , E135° 0')と東シナ海ブイ(N28° 10' , E126° 20')の実測値 (1997～1999 年) と比較したところ、両者の相関係数がほぼ同等だったことから、回帰係数が 1 により近い傾度風モデルを波浪推算に用いることとした。一方、湾内の風に関しては、気象庁 GPV(RSM)、局地気象モデル(ANEMOS)、傾度風モデル (Cardone-Myers ハイブリッドモデル(岡田ら; 1995)+マスコンモデル) を対象に、検証地点 (伊勢湾 8 地点、播磨灘 6 地点、有明海 6 地点) での実測値 (風向・風速) との相関係数を求め、実測値ともっとも適合するモデルを台風毎に選定した (表-5.1.3 参照)。なお、選定したモデルで推定した風を波浪推算モデルに入力する際には、浜田 (伊勢湾)、江井ヶ島 (播磨灘)、有明タワー (有明海) での回帰係数で推定風速を除した。

表-5.1.3 内湾での波浪推算に用いた風モデル

伊勢湾		播磨灘		有明海	
T9807	RSM	T9708	ANEMOS	T9711	傾度風
T9810	RSM	T9805	RSM	T9918	ANEMOS
T0111	RSM	T9807	RSM	T0014	ANEMOS
T0310	ANEMOS	T9810	ANEMOS	T0205	RSM
T0406	RSM	T9918	ANEMOS	T0215	傾度風
		T0310	ANEMOS	T0306	ANEMOS
		T0416	RSM	T0314	RSM
		T0418	RSM	T0418	ANEMOS

2) 検討結果

波浪の実測値は、浜田、江井ヶ島、有明タワーで得られている。各海岸での波高及び周期の相関係数(R)、誤算の2乗平均(E)、一次回帰式(A:回帰係数、y:推算値、x:観測値)、東播海岸を対象とした計算所要時間を表-5.1.4 にまとめた。相関係数は、いずれのモデルでも周期と比べて波高の方が高く、モデル間で大差は見られなかった。また、誤差の2乗平均については、いずれのモデルでも波高は0.6m未満と比較的よいが、周期はSWANを用いたケース2やケース4で大きかった。一方、計算所要時間については、中領域、狭領域ともWAMを用いたケース1が最も短く、中領域約14分、狭領域53分であった。ケース1では、周期の回帰係数は1程度であり、波高の回帰係数は1を上回っており、平均的には実測値よりやや大きめの推算値が得られた。また、図-5.1.4のように時系列で比較しても、推算値は実測値とよく対応していた。

表-5.1.4 各ケースの計算精度及び東播海岸を対象とした計算所要時間

	伊勢湾西南海岸(浜田)		東播海岸(江井ヶ島)		有明海岸(有明タワー)		24時間の計算所要時間		
	波高	周期	波高	周期	波高	周期	広領域	中領域	狭領域
ケース1 (WAM-WAM)	R=0.81	R=0.55	R=0.91	R=0.73	R=0.86	R=0.42	約1.5分	約14分	約53分
	E=0.58m	E=1.49s	E=0.34m	E=1.07s	E=0.43m	E=1.26s			
	y=1.26x	y=1.09x	y=1.08x	y=1.05x	y=1.42x	y=0.99x			
ケース2 (WAM-SWAN)	R=0.81	R=0.40	R=0.85	R=0.64	R=0.85	R=0.40		約14分	約232分
	E=0.51m	E=2.58s	E=0.40m	E=1.83s	E=0.34m	E=1.82s			
	y=1.21x	y=0.48x	y=0.96x	y=0.54x	y=1.19x	y=0.50x			
ケース3 (WAM-波浪変形モデル)	R=0.74	R=0.56	R=0.92	R=0.86	R=0.88	R=0.56		約14分	約92分
	E=0.55m	E=1.23s	E=0.31m	E=0.96s	E=0.48m	E=0.96s			
	y=1.11x	y=1.02x	y=0.98x	y=0.86x	y=1.48x	y=0.90x			
ケース4 (SWAN-SWAN)	R=0.81	R=0.48	R=0.97	R=0.91	R=0.95	R=0.85		約113分	約232分
	E=0.43m	E=2.83s	E=0.40m	E=2.21s	E=0.32m	E=1.61s			
	y=1.04x	y=0.44x	y=0.84x	y=0.53x	y=0.80x	y=0.52x			
ケース5 (波浪変形モデルのみ)	R=0.73	R=0.57	R=0.92	R=0.80	R=0.87	R=0.56		なし	約92分
	E=0.55m	E=1.34s	E=0.32m	E=0.92s	E=0.44m	E=0.96s			
	y=1.08x	y=1.06x	y=1.02x	y=0.88x	y=1.39x	y=0.88x			

R: 相関係数、E: 誤差の2乗平均、y=A_x: 一次回帰式

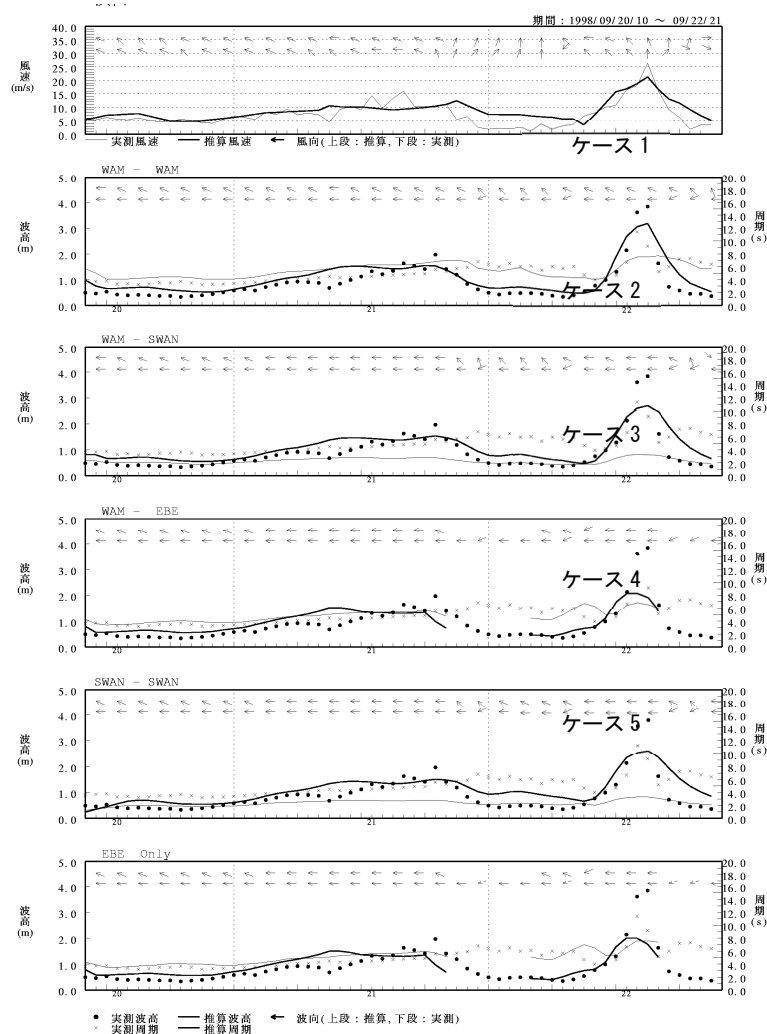


図-5.1.4 推算値と実測値の経時変化（1998 年台風第 7 号，浜田）

もっとも計算所要時間が短かったケース 1 について，計算所要時間をさらに短縮する方法として，浅海域での非線形相互作用の計算省略と，計算格子を粗くすることを検討した。非線形相互作用は，波浪の周波数成分間でエネルギー輸送を起こすことで，波浪の発達・減衰の重要な要素であるが，閉鎖的な海域ではその効果は小さいと考えられる。そこで，各海域の波浪観測点でもっとも波高が大きかった台風について，非線形項を省略して計算したところ，図-5.1.5 のように推算波高の差異は小さいこと，計算所要時間を 30%短縮できることが確かめられた。一方，計算格子を粗くすることの効果を評価するため，中領域と狭領域の計算結果を比較したところ，中領域と狭領域の波高・周期推算値はほぼ一致した。

以上のように，約 1.7km メッシュの WAM により短時間で比較的精度よく内湾波浪を推算できることが確かめられたので，これをベースに浅海波浪モデルを構築することとした。

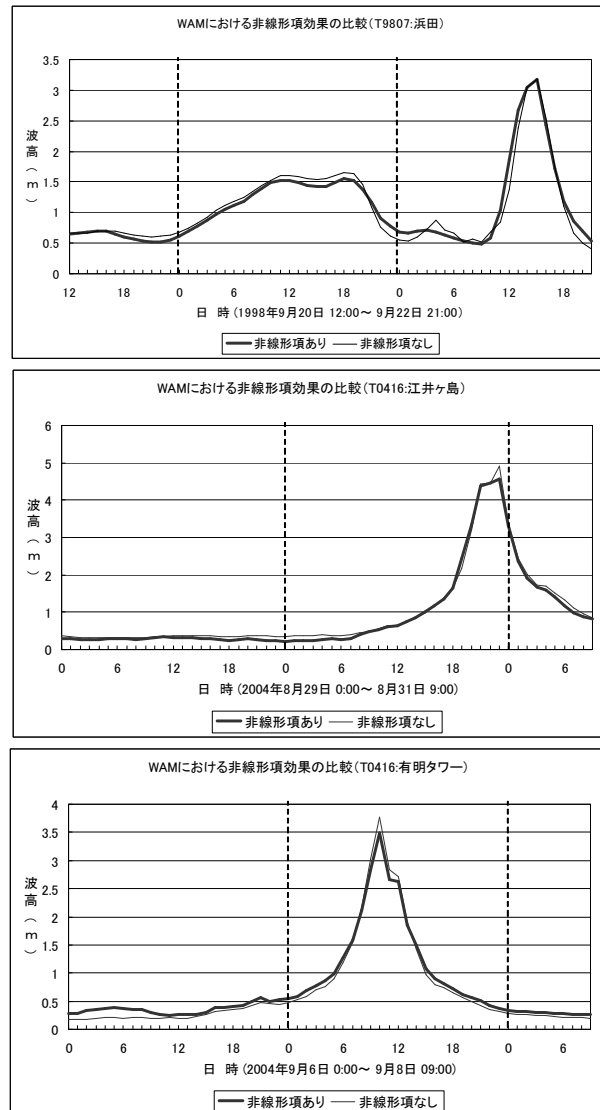


図-5.1.5 非線形項の効果（上：浜田，中：江井ヶ島，下：有明タワー）

2. 地形性砕波及び潮位の考慮の必要性検討

1) モデル改良の考え方

内湾は水深が比較的小さく、海岸近傍では地形性砕波が生じるが、WAM は SWAN とは異なり地形性砕波が考慮されていない。また、潮汐による潮位の時間的変化が比較的大きく、水深変化が波浪に影響する可能性がある。リアルタイム波浪予測において地形性砕波と潮汐を考慮する必要性を検討するため、SWAN の地形性砕波の計算に採用されている bore モデル (Battjes et al.; 1978) を WAM に組み込むとともに、海洋潮汐モデル (NAO.99b(Matsumoto et al.; 2000)) で作成される 1 分メッシュの潮位面データを使用して 1 時間毎に水深を変化させて波浪推算を行い、実測値と比較した。bore モデルは、砕波と段波の類似性に着目し、段波におけるエネルギー消散量を砕波として計算する方法である (川口ら ; 2003)。

対象とした台風を表-5.1.5 に示す。計算範囲や周波数分割数などは表-5.1.1 と同一であるが、入力風データは広領域 3 と中領域では、RSM を実測風速により補正したものを使用した。

表-5.1.5 改良モデルの検証対象台風

領域	台風	最大有義波高	期間
伊勢湾	T9807	3.84m	1998 年 9 月 20-22 日
	T9810	3.08m	1998 年 10 月 16-18 日
	T9805	2.78m	1998 年 9 月 14-16 日
播磨灘	T0416	3.94m	2004 年 8 月 27-31 日
	T9810	2.85m	1998 年 10 月 16-18 日
	T0418	2.62m	2004 年 9 月 4-8 日
有明海	T0418	2.85m	2004 年 9 月 4-8 日
	T0306	2.42m	2003 年 6 月 16-20 日
	T0415	2.08m	2004 年 8 月 17-19 日
	T0314	1.84m	2003 年 9 月 10-13 日

2) 検討結果

表-5.1.6 および表-5.1.7 のように、伊勢湾の浜田では改良の効果は現れていないが、播磨灘の江井ヶ島や有明海の有明タワーでは地形性砕波の考慮により波高の回帰係数および RMS 誤差が改善された。たとえば、浜田では図-5.1.6 のようにモデル間の差異は小さいが、有明タワーでは、図-5.1.7 のように、地形性砕波の考慮により波高ピーク時の精度が向上している。水深 20m の浜田と比べ、江井ヶ島や有明タワーは水深が比較的小さいため、地形性砕波の効果が現れやすかったと考えられる。一方、潮汐の考慮による効果は、波高、周期とも、地形性砕波より小さかった。これらのほか、地形性砕波と潮位変動を考慮しても、

計算所要時間は 10%程度しか増加しないことも確かめられた。

表-5.1.6 推算波高と実測波高との相関

領域	推算方法	回帰係数	相関係数	RMS 誤差
伊勢湾	改良前	1.17	0.82	0.47m
	+ 碎波	1.16	0.82	0.46m
	+ 潮汐	1.18	0.82	0.48m
	+ 碎波・潮汐	1.17	0.82	0.48m
播磨灘	改良前	1.15	0.91	0.39m
	+ 碎波	0.98	0.90	0.32m
	+ 潮汐	1.15	0.91	0.39m
	+ 碎波・潮汐	0.99	0.90	0.32m
有明海	改良前	1.44	0.93	0.42m
	+ 碎波	1.23	0.92	0.33m
	+ 潮汐	1.42	0.94	0.40m
	+ 碎波・潮汐	1.20	0.93	0.31m

表-5.1.7 推算周期と実測周期との相関

領域	推算方法	回帰係数	相関係数	RMS 誤差
伊勢湾	改良前	1.17	0.61	1.6s
	+ 碎波	1.17	0.62	1.5s
	+ 潮汐	1.20	0.61	1.7s
	+ 碎波・潮汐	1.20	0.61	1.6s
播磨灘	改良前	0.98	0.71	1.3s
	+ 碎波	0.97	0.71	1.3s
	+ 潮汐	1.01	0.69	1.3s
	+ 碎波・潮汐	1.00	0.69	1.3s
有明海	改良前	0.91	0.55	1.3s
	+ 碎波	0.89	0.53	1.2s
	+ 潮汐	0.91	0.55	1.3s
	+ 碎波・潮汐	0.89	0.53	1.2s

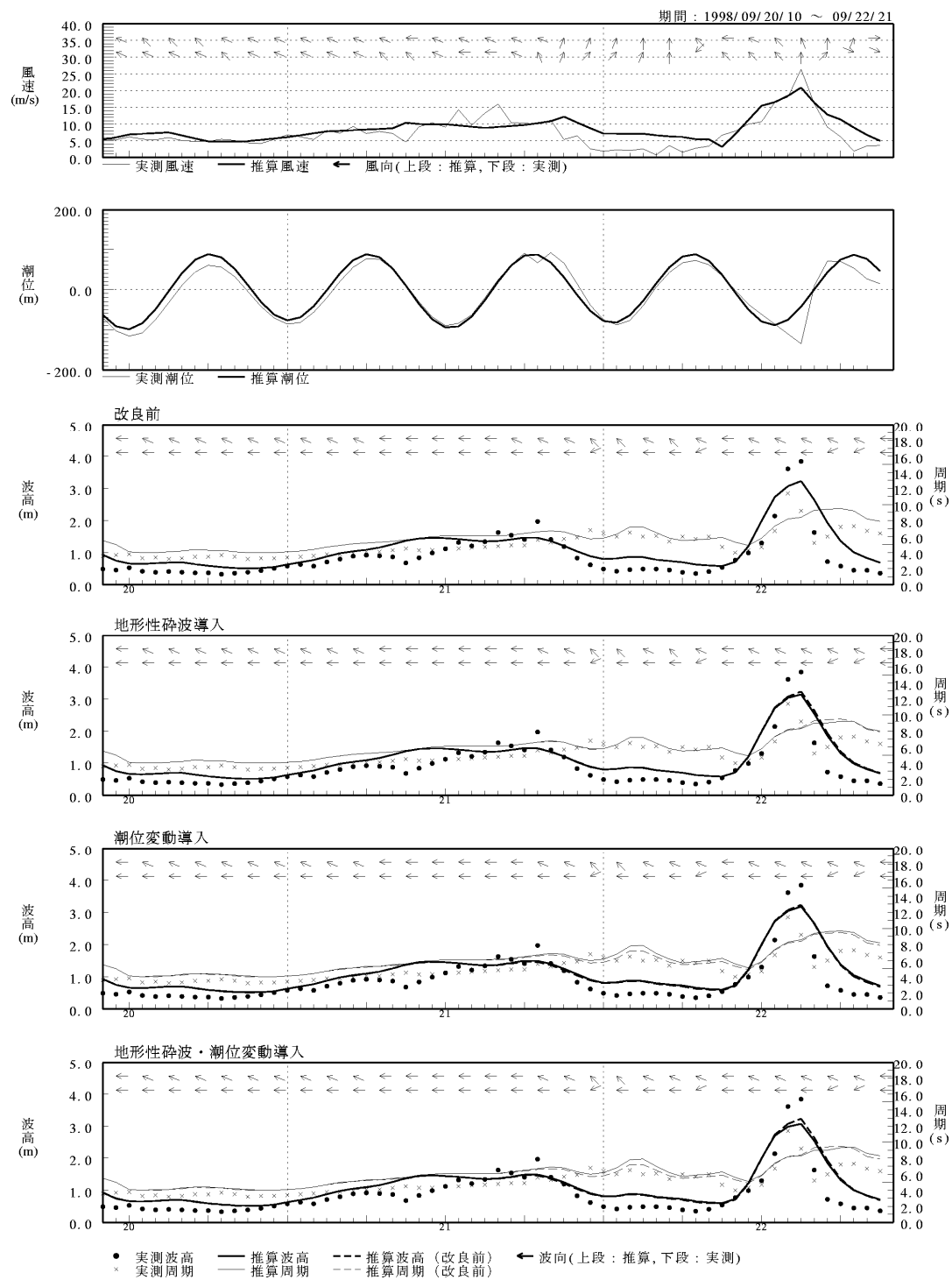


図-5.1.6 推算値と実測値との比較（1998年台風第07号，浜田）

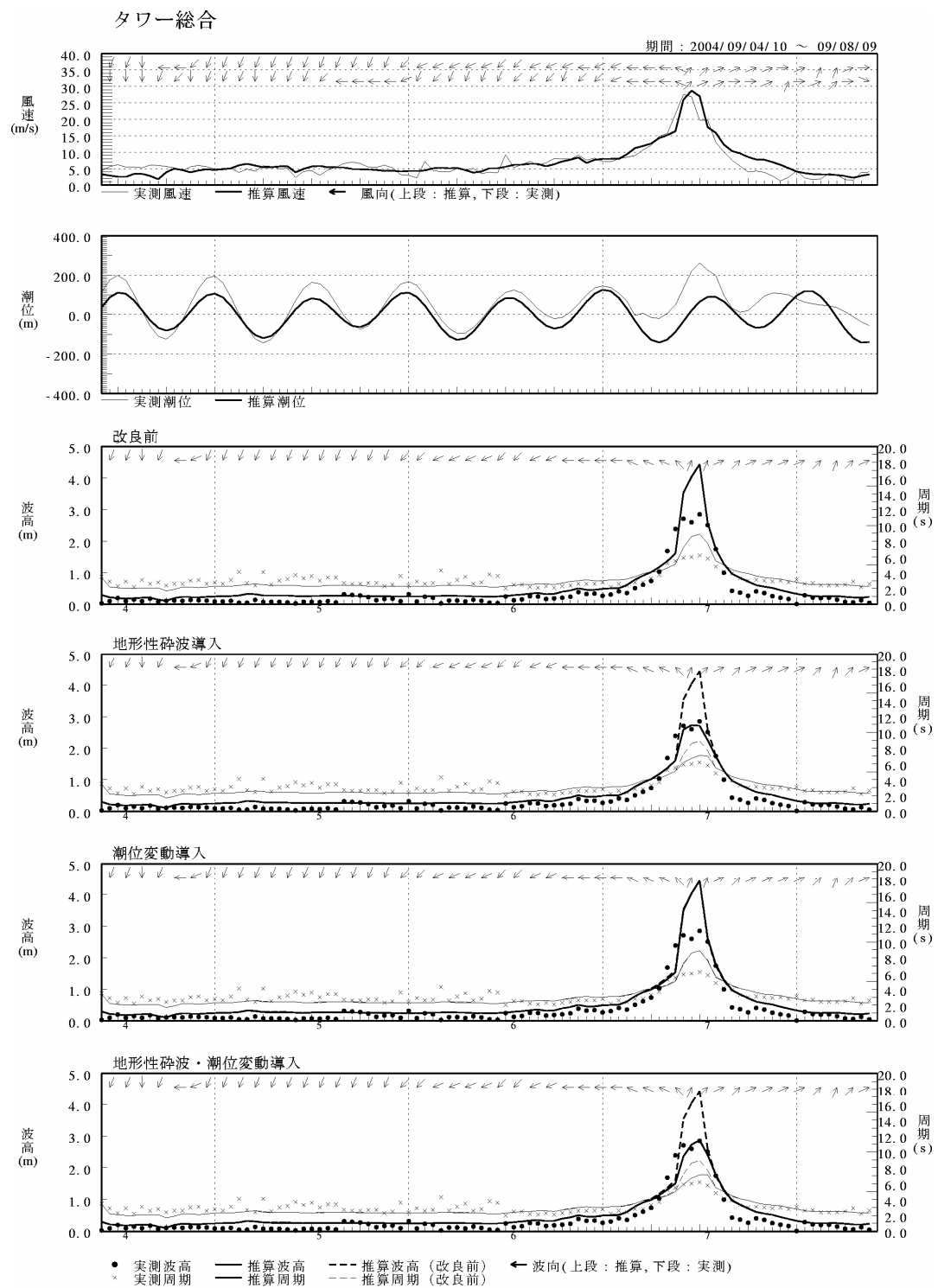


図-5.1.7 推算値と実測値との比較 (2004 年台風 18 号, 有明タワー)

3. 周期予測の精度向上

1) 周期過大予測事例の抽出

浅海波浪モデルでは周期が過大に予測される事例があったことから、図-5.1.8 に示す観測地点について、2009 年 1 年間の観測値と浅海波浪モデル予測値（初期値～5 時間先予測値）を比較した。時系列図を図-5.1.9～図-5.1.13 に示す。各観測地点の比較結果の特徴を以下に述べる。

・東京湾（東京灯標）

波高：ほぼ一致しているが、低波高時に過小予測の傾向がある。

周期：レベル的にはほぼ一致しているが、低波高時に異常に長い周期が出現している。

また、高波高事例で過大予測となる傾向がある（特に波高ピーク以降）。

・伊勢湾

（浜田）

波高：北系の波向の時は過小評価、東系の波向の時は過大予測の傾向がある。

周期：北系の波向の場合はほぼ一致しているが、東系の波向の時は、過大予測の傾向がある。北系でも低波高時は異常に長い周期が出現している。

（城南）

波高：T0918 号の事例を除き、過大予測の傾向がある。

周期：高波高時はほぼ一致しているが、その他は過小予測の傾向がある。低波高時は異常に長い周期が出現している。

・大阪湾・播磨灘（江井ヶ島）

波高：ほぼ一致している。

周期：高波高時はほぼ一致しているが、その他は過小予測の傾向がある。低波高時は異常に長い周期が出現している。

・有明海（タワー総合）

波高：ほぼ一致している。

周期：高波高時はほぼ一致しているが、その他は過小予測の傾向がある。低波高時は異常に長い周期が出現している。

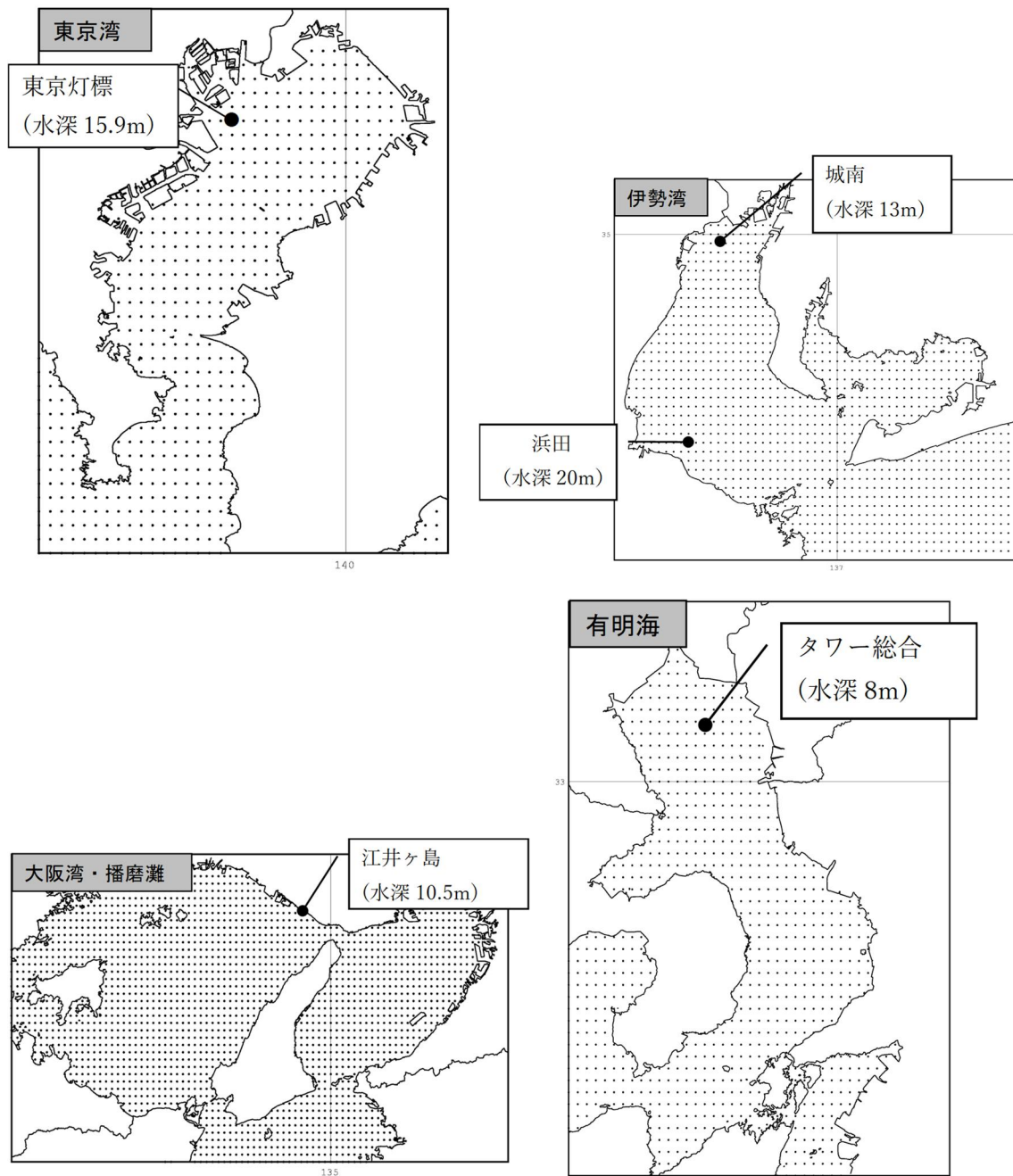


図-5.1.8 比較地点の位置図

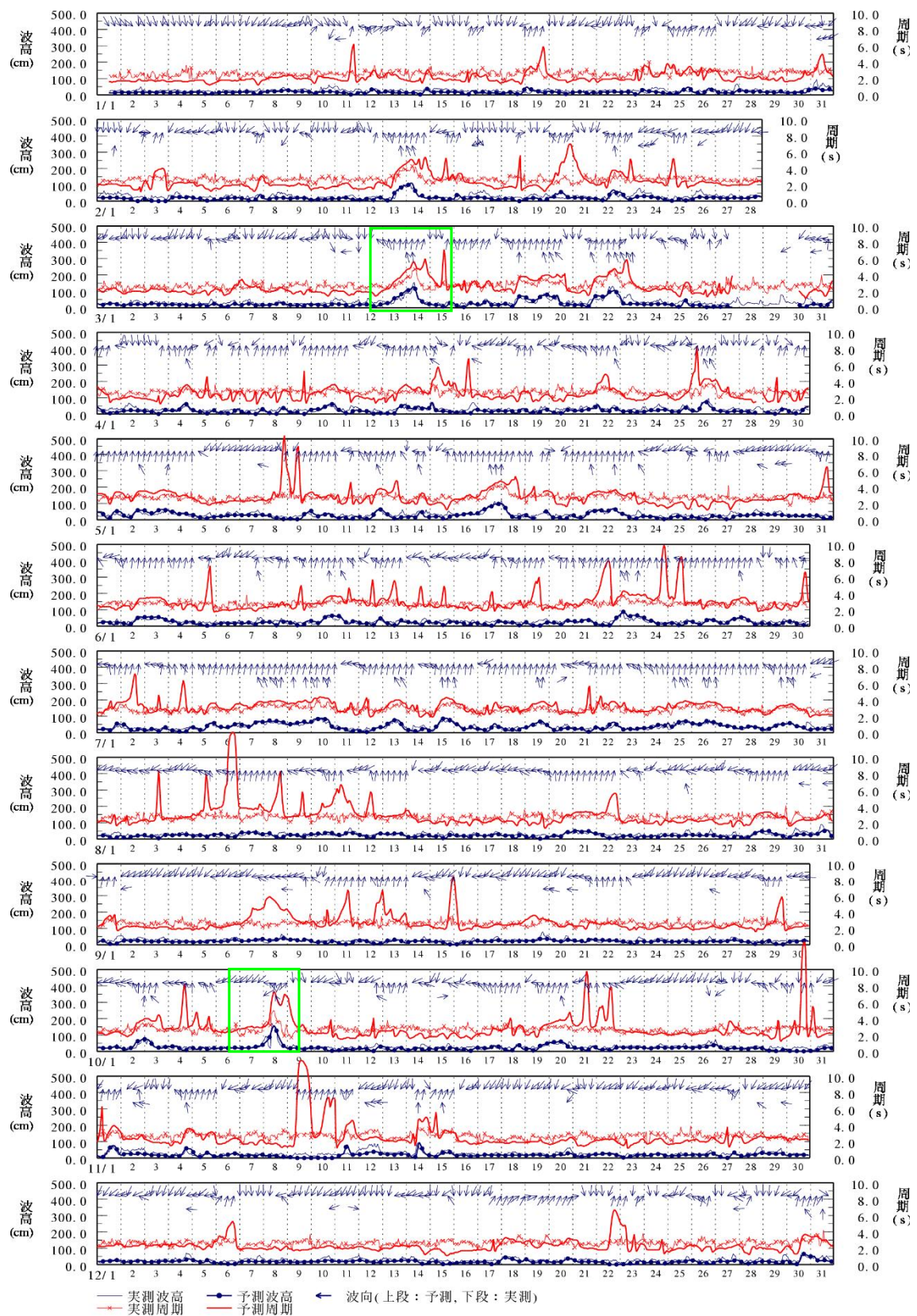


図-5.1.9 観測値と予測値の時系列図 (2009 年: 東京灯標)

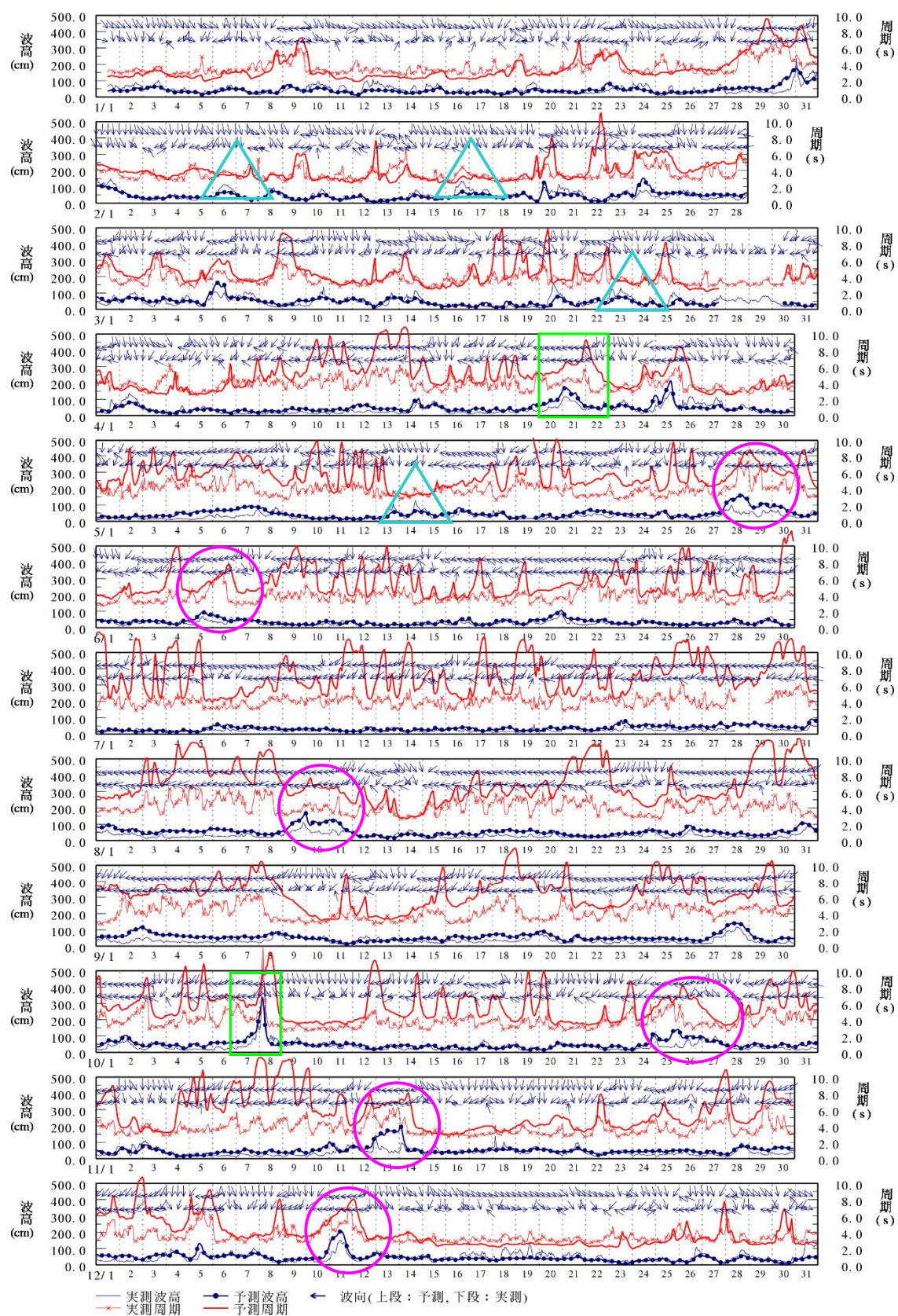


図-5.1.10 観測値と予測値の時系列図 (2009年：浜田)

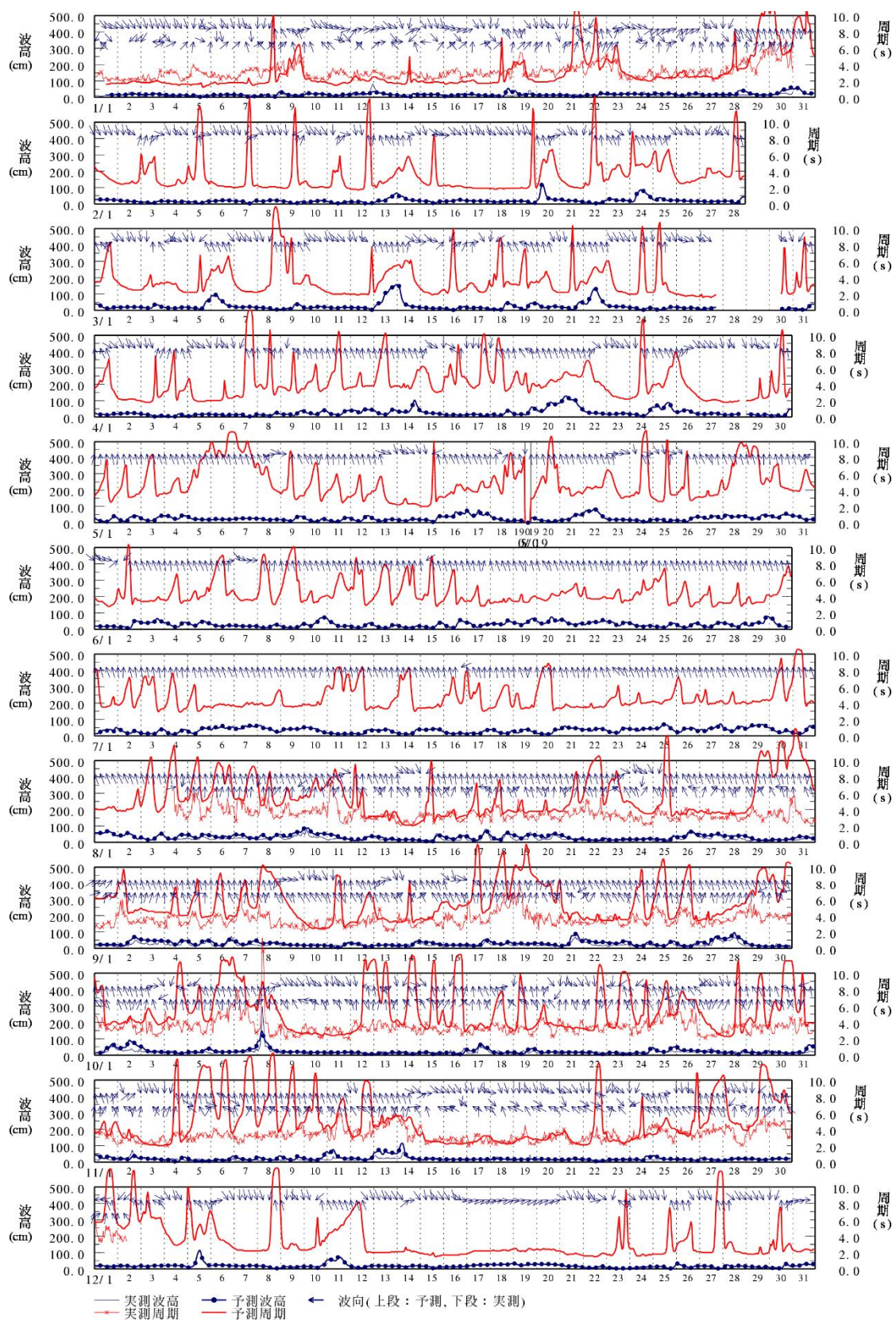


図-5.1.11 観測値と予測値の時系列図 (2009 年: 城南)

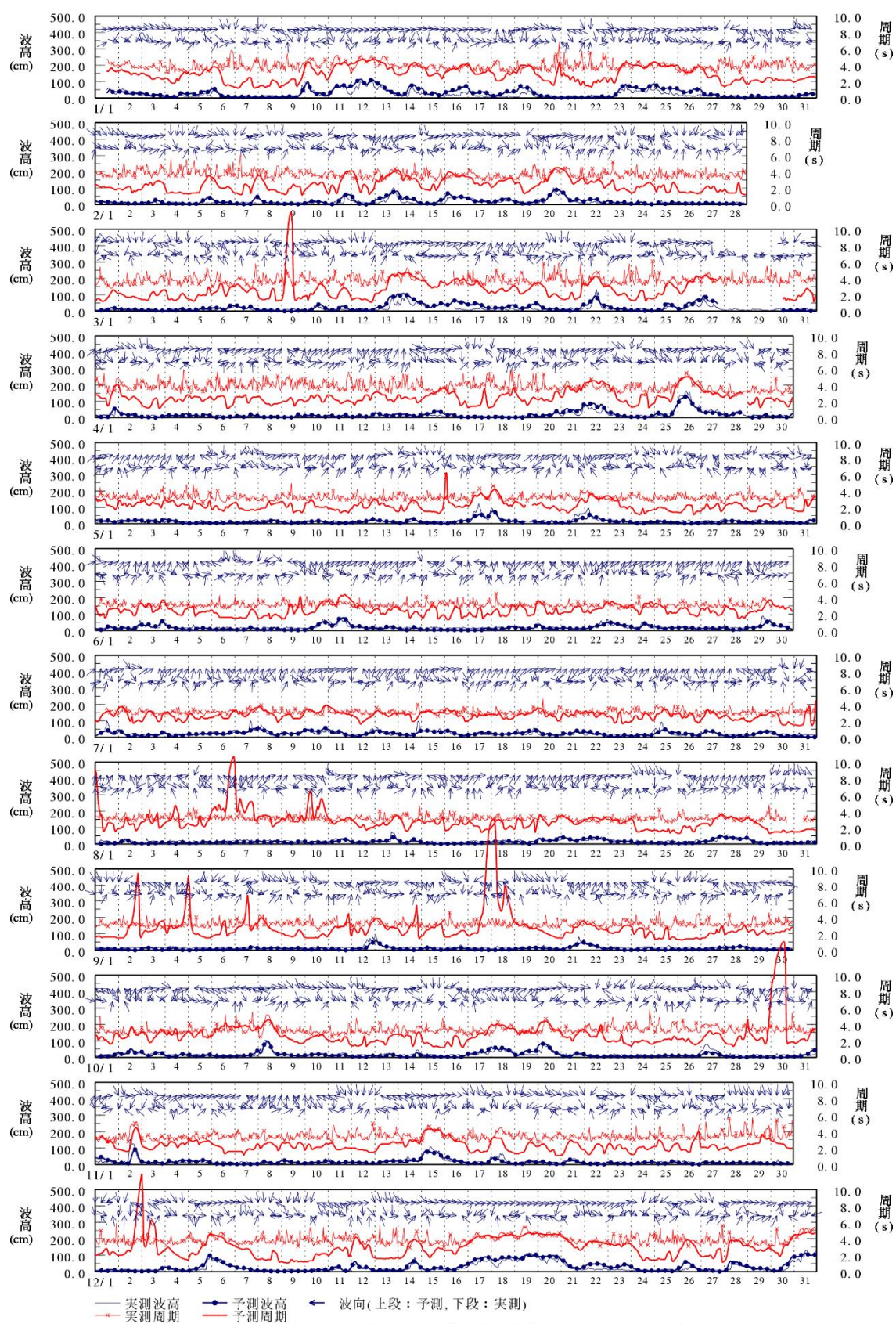


図-5.1.12 観測値と予測値の時系列図 (2009年：江井ヶ島)

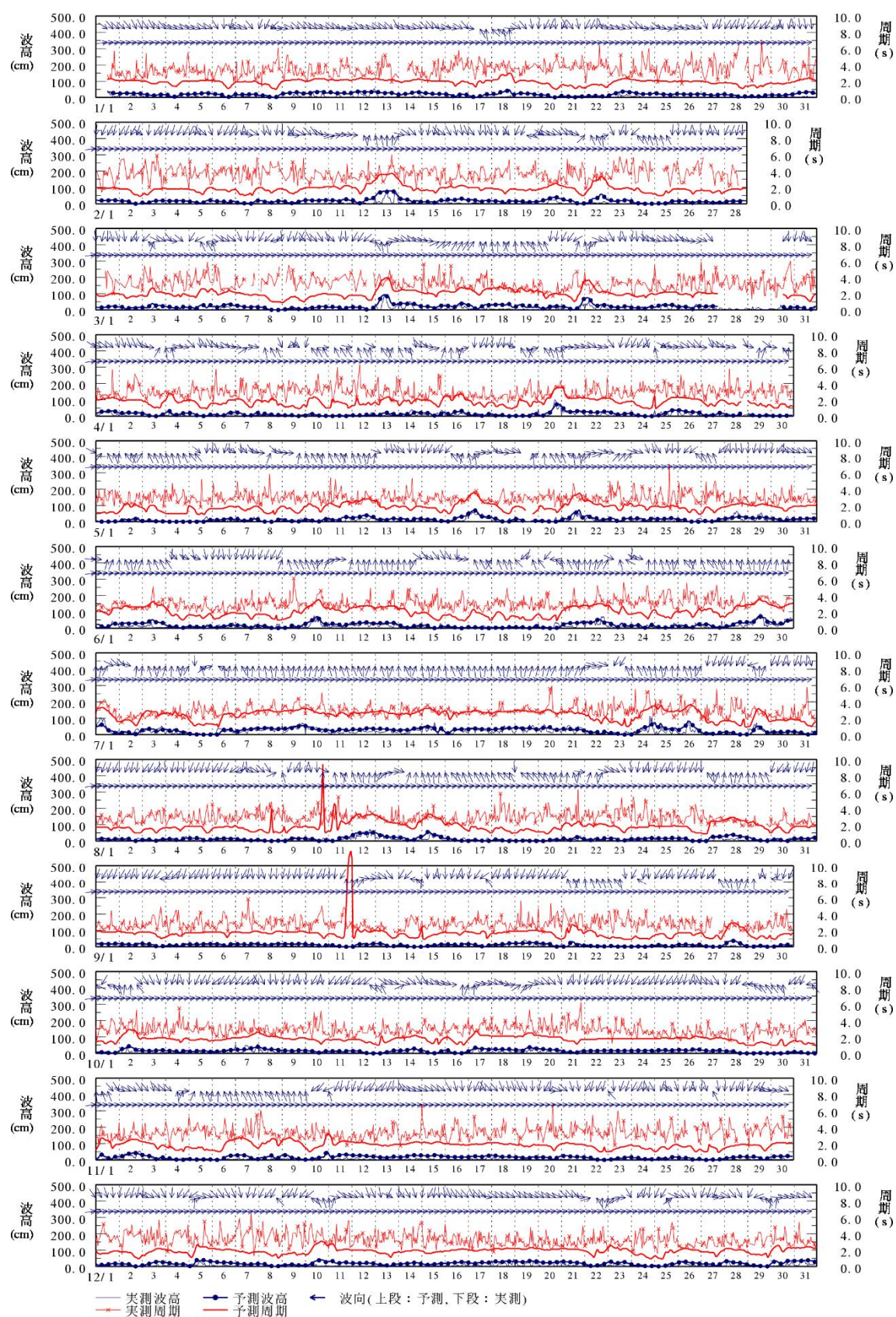


図-5.1.13 観測値と予測値の時系列図 (2009年: タワー総合)

予測値と観測値の比較結果をもとに、課題とその検討方法を以下のように整理した。

課題 1：東京灯標において、高波高時に周期過大予測

検討方法：高波高時を対象に再現計算を行い、入力値（湾口地形、境界値）、伝搬過程を検討

課題 2：浜田において、波向が東系の場合に周期過大予測

検討方法：波向が東系の高波高時を対象に再現計算を行い、入力値（湾口地形、境界値）、伝搬過程を検討

課題 3：全観測地点で低波高時に異常に長い周期が出現

検討方法：低波高時を対象に再現計算を行い、入力値（境界値）、伝搬過程を検討

検討対象事例として、時系列図（図-5.1.9～図-5.1.13）を参考に、以下の事例を選定した（表-5.1.8、および図-5.1.9～図-5.1.13 の□）。

表-5.1.8 対象事例

Case	対象湾	期間	選定理由	気象擾乱
1	伊勢湾	10月6日12時～8日18時 (10月6日3時UTC～8日9時UTC)	・高波高 ・顕著な周期過大予測	2009年台風18号
2		4月19日12時～22日12時 (4月19日3時UTC～22日3時UTC)	・高波高 ・顕著な周期過大予測	二つ玉低気圧
3	東京湾	10月6日12時～9日12時 (10月6日3時UTC～9日3時UTC)	・高波高 ・顕著な周期過大予測	2009年台風18号
4		3月12日12時～16日0時 (3月12日3時UTC～15日15時UTC)	・高波高 ・顕著な周期過大予測 ・低波高時の異常に長い周期を含む	日本海低気圧

2) 周期過大予測要因の検討

周期過大予測の要因を検討するためには、気象庁で計算された浅海波浪予測について、入力値の特性や波浪の発達・伝搬過程等、予測の詳細を把握する必要がある。そこで、気象庁提供の浅海波浪モデル入力データ（境界値、風）を用いて 2009 年台風第 18 号通過時の再現計算を行い、入力値や発達・伝搬過程の妥当性について検討した。

2009 年台風第 18 号通過直前である 10 月 8 日 0 時時点の予想経路と実際の経路を図-5.1.14 に示す。実際の台風は、3 時頃は中心コース、3～6 時は、一時右寄りコースに近づき、中心コースと右寄りコースの間を進んだ。以下の検討は、10 月 8 日 0 時を初期時刻とし、実際のコースに最も近かった中心コースの事例を対象として進める。

気象庁で現在運用されている浅海波浪モデルの予測結果（以下、浅海波浪 GPV）と再現計算結果を図-5.1.15、図-5.1.16 に示す。両者の計算結果は一致しており、気象庁の浅海波浪モデルの運用状況を再現することができた。再現計算の計算条件を表-5.1.9 に示す。なお、初期値は、前回予測の同時刻の計算結果を用いた。初期値の精度を確保するため、10 月 6 日 12 時初期時刻の予測から継続して予測計算を行い、前回予測（7 日 18 時初期時刻）の予測計算結果のうち、8 日 0 時のスペクトルデータを保存しておき初期値として利用した。

表-5.1.9 計算条件

項目	再現計算の条件
風から波へのエネルギー輸送	Jannsen (1989,1991)
リミター	WAM オリジナル
非線形相互作用の考慮	あり
海底摩擦	Hasselmann et.al(1973)
初期値	前回予測の同時刻スペクトルを利用

表-5.1.9 の計算条件では非線形相互作用が考慮されていることから、周波数成分間のエネルギー輸送はモデル上問題なく取り扱われていることが確認できた。また、初期値は、前回予測の計算結果を使用していることから、初期値の信頼性（計算助走期間の設定など）についても問題がないことが確認できた。

ここで、WAM オリジナルのリミターは、細かい空間格子に適用した場合、波浪が十分に発達しないことが既存の調査で報告されており(間瀬(2001))、内湾の詳細な計算を対象とする浅海波浪モデルへの適用は適切ではなく、浅海向けに改良された修正リミター(Hersbach・Janssen(1999))を用いるべきである。リミターは、風から波へのエネルギー入力計算の際、高周波領域における成分波が発達しすぎるのを回避するため単位時間当たりの波浪の発達を制限するものである。WAM オリジナルのリミターと修正リミターは、それぞれ以下の式を用いている。

(オリジナルリミター)

$$|\Delta F|_{\max} = 6.4 \times 10^{-7} g^2 f^{-5} \Delta t / \tau \quad (5.1.1)$$

ここで、 $|\Delta F|_{\max}$ はエネルギー増分の上限、 f は周波数、 g は重力加速度、 Δt はタイムステップ、 $\tau = 1200s$ である。

(修正リミター)

$$|\Delta F|_{\max} = 3.0 \times 10^{-7} g \overline{u_*} f^{-4} f_c \Delta t \quad (5.1.2)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 $\overline{u_*} = \max(u_*, g f_{PM}^* / f)$ 、 $f_{PM}^* = 5.6 \times 10^{-3}$ 、 f_c はカットオフ周波数である。修正リミターは、高周波数側のスペクトルに摩擦速度を考慮し、高周波数側の傾きを-4乗としている。

図-5.1.17 に、オリジナルリミターと修正リミターを用いた計算結果を示す。修正リミターを用いた計算結果では、浅海波浪 GPV でみられた三河湾の異常に長い周期分布が改善され、波高も観測値に近くなっており、波高、周期ともに、修正リミターを用いた計算結果の方が妥当な結果を示している。そこで、今後の検討は、修正リミターを用いて行う。

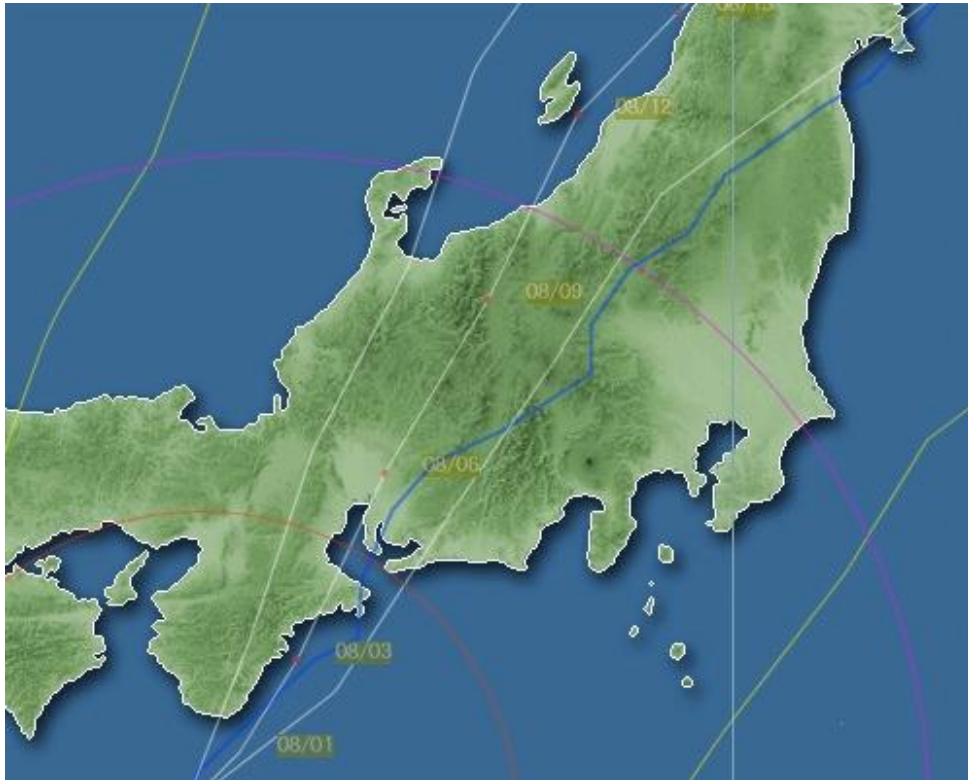


図-5.1.14 10月8日0時の進路予報と実際の経路

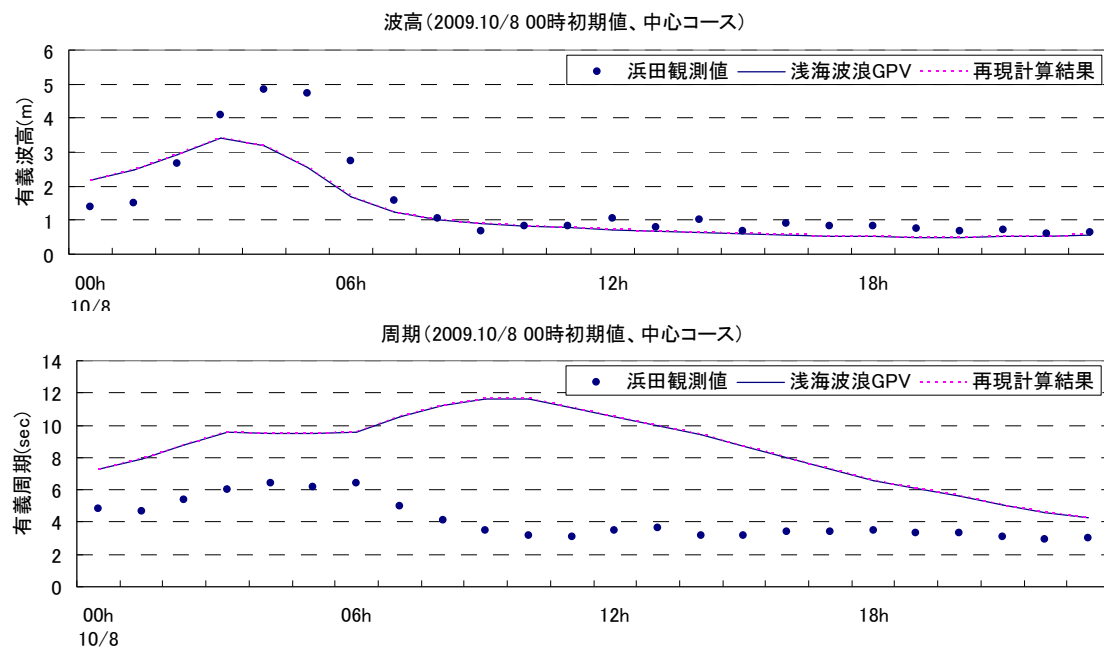


図-5.1.15 浅海波浪 GPV と再現計算結果の比較 (10月8日0時初期値、中心コース)

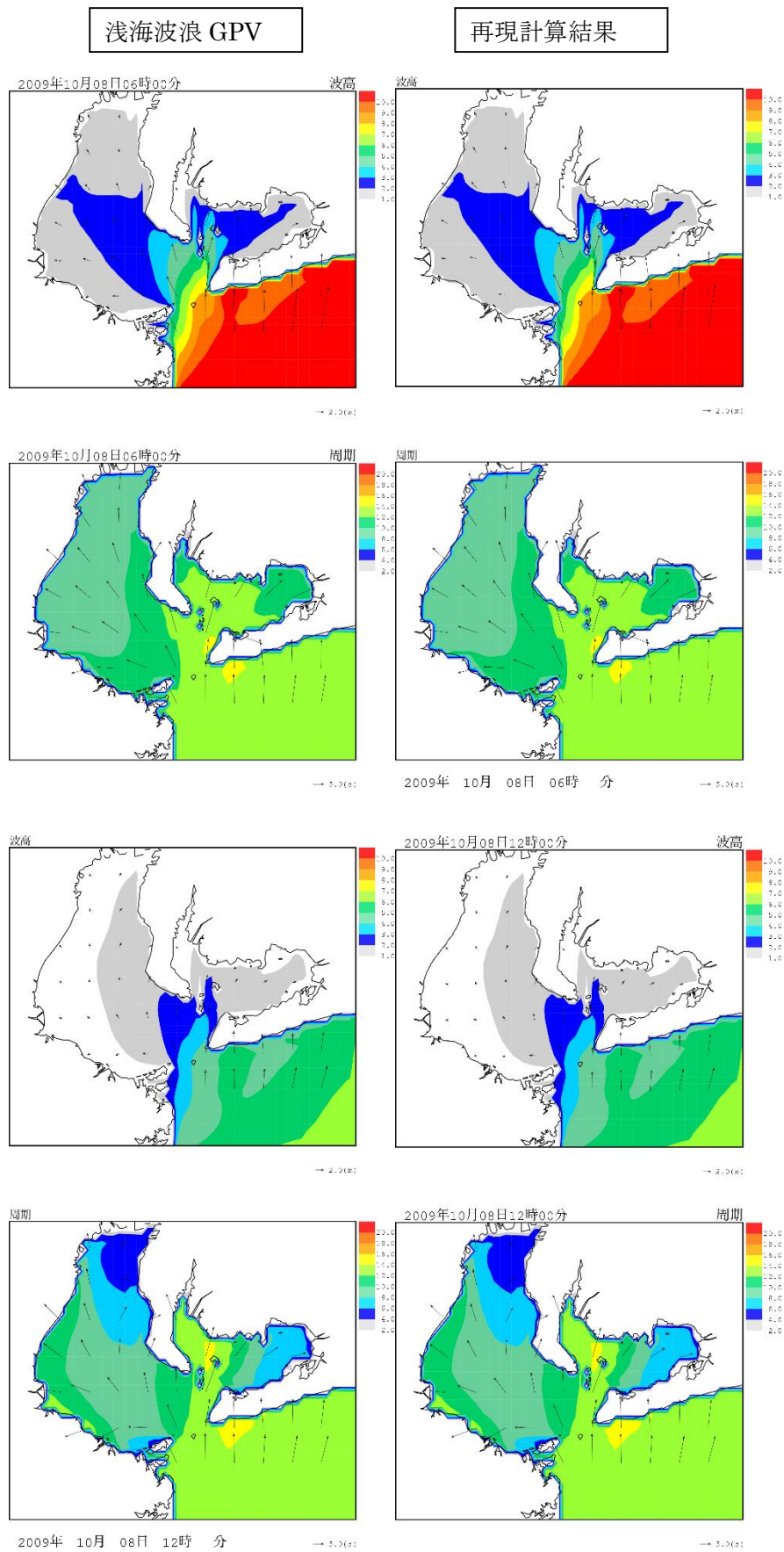


図-5.1.16 浅海波浪 GPV と再現計算結果の比較 (10月8日0時初期値、中心コース)

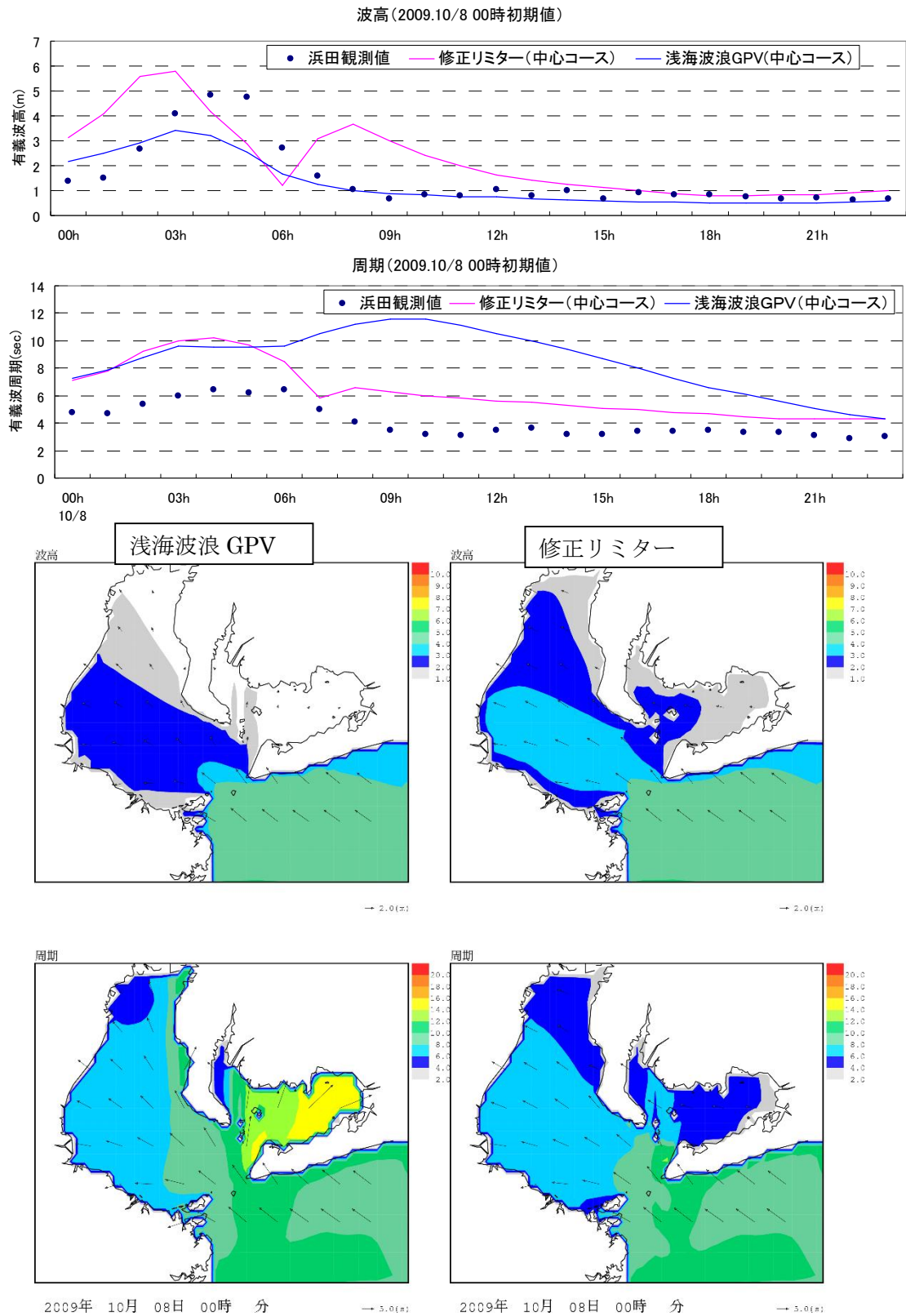


図-5.1.17 リミターによる予測値の差異 (10月8日0時初期値)

上記の周期過大予測事例について、過大予測要因の検討を行った。

ここでは、物理過程モデル（風から波へのエネルギー輸送項（ S_{in} ）やエネルギー消散項（ S_{ds} ））の適合性についても併せて検討した。エネルギー消散項はそのメカニズムが十分に解明されていないため、他のソース項（ S_{in} や非線形相互作用）とのバランスを考慮して平衡状態を保つように設定されており、他項との依存関係にある。このため、 S_{in} と S_{ds} を適切に組み合わせ、4通りの方法とした（表-5.1.10）。これらの方法は、現在提案されている主な第3世代波浪モデルで採用されている方法であり、浅海波浪モデルに実装されているものである。

①Janssen の方法は、波齢による風から波へのエネルギー輸送量の違いを考慮できることが特徴であり、WAMCycle-4 で採用されている方法である。②Wu の方法は、基本的に①の Janssen の方法と同じであるが、摩擦速度の計算に Wu の関係式を用いた方法である。③Mitsuyasu & Honda の方法は、Suzuki(1995)が波浪モデル JWA3G に適用した方法であり、Mitsuyasu・Honda(1982)と Hsiao・Shemdin(1983)のエネルギー輸送の考え方をそれに適合する S_{ds} とあわせて採用している。④Komen の方法は、WAMCycle-3 で採用されている方法である。摩擦速度の計算に Wu の関係式を用いているが、波齢が考慮されていないところが②Wu の方法とは異なる。

各物理過程の概要を以下に示す。

(1) 風から波へのエネルギー輸送

風による波の成長は一般的に下式によって示される。

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (5.1.3)$$

Aは線形発達項で波が発生する現象を表しており、BEは指数発達項で波の発達過程を表している。浅海波浪モデルでは、初期の波浪場を与え、Aの項を省略している。

表-5.1.10 の各 S_{in} で使用されているBは以下のように表される。

①Janssen(1989, 1991)

$$B = \beta \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(\frac{U_*}{C} \right)^2 \cdot \max[0, \cos(\theta - \theta_w)]^2 \cdot \sigma \quad (5.1.4)$$

ここで、 θ は風向、 θ_w は波向、 ρ_w は海水の密度、 ρ_a は空気の密度、 C は位相速度、 U_* は摩擦速度である。 β は Miles 定数であるが、これはパラメータ λ より推定され、

$$\begin{cases} \beta = \frac{1.2}{K^2} \lambda \ln^4 \lambda, & \lambda \leq 1 \\ \lambda = \frac{gZ_e}{C_{ph}^2} e^r, & r = KC/[U_* \cos(\theta - \theta_w)] \end{cases} \quad (5.1.5)$$

で表される。ここで、 K は Von Karman 定数で $K = 0.41$ ， Z_e 有効海面粗度である。 $\lambda > 1$ となる場合は Miles 定数を $\beta = 0$ とする。Janssen(1991)は風の鉛直分布を下式で与えられるものと仮定している。

$$U(z) = \frac{U_*}{K} \ln \left(\frac{z + z_e - z_o}{z_e} \right) \quad (5.1.6)$$

$U(z)$ は平均海面上の高さ z (浅海波浪モデルでは 10m) における風速、 z_o は粗度長さを示す。有効粗度長さ z_e は粗度長さ z_o に依存し、また海上では波の誘発応力と全応力より、

$$z_e = \frac{z_o}{\sqrt{1 - \tau_w / \tau}} \quad \text{及び} \quad z_o = \hat{\alpha} \frac{U_*^2}{g} \quad (5.1.7)$$

である。

2 つ目の式は、 $\hat{\alpha}$ の値が $\hat{\alpha} = 0.01$ のとき Charnock の関係式となる。波の誘発応力 τ_w ベクトルは下式で与えられ、

$$\tau_w = \rho_w \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma BE(\sigma, \theta) \frac{k}{k} d\sigma d\theta \quad (5.1.8)$$

となる。

摩擦速度 U_* は、10m 高度の風速と波のエネルギーから、上式を用いて算定する。

② Janssen(1989, 1991) において U_* を Wu(1982) の関係式から求める方法

① の方法において、 U_* を以下の式により求める。

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (5.1.9)$$

ここに、 C_D は Wu(1982) の理論からくる抗力係数であり、

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1.2875 \times 10^{-3} & (U_{10} < 7.5 \text{ m/s}) \\ (0.8 + 0.065 \text{ s/m} \times U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} \geq 7.5 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (5.1.10)$$

である。

③Mitsuyasu・Honda(1982)とHsiao・Shemdin(1983)

$$B = \begin{cases} 0.065 \left(\frac{U^*}{C} - 0.018 \right)^2 \cdot 2\pi f & \frac{U^*}{C} \leq 0.2 \\ 0.34 \left(\frac{U^*}{C} \right)^2 \cdot f & \frac{U^*}{C} > 0.2 \end{cases} \quad (5.1.11)$$

ここで、摩擦速度 U^* は②と同様に求められる。

④Komen et al. (1984)

$$B = \max \left[0, 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left[28 \frac{U_*}{C} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right] \right] \cdot \sigma \quad (5.1.12)$$

ここで、摩擦速度 U^* は②と同様に求められる。

(2) エネルギー消散項（白波砕波）

①Janssen(1992)

K.Hasselmann の白波理論(1974)に基づき WAMDI group による改良(1984 年)が加えられたものを採用している。この理論では特に高周波領域における適切なエネルギーバランスを考慮して以下のように定式化されている。

$$S_{ds} = -\Gamma \tilde{\omega} \frac{k}{\tilde{k}} E \quad (5.1.13)$$

ここで、

$$\Gamma = C_{ds} \left[(1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \left[\frac{\tilde{k} \sqrt{E_{tot}}}{\tilde{s}_{PM}} \right]^m \right] \quad (5.1.14)$$

$$\tilde{\omega} = E_{tot} / \frac{1}{\omega} E(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (5.1.15)$$

$$\tilde{k} = \left[E / \left(\frac{1}{\sqrt{k}} E(\omega, \theta) d\omega d\theta \right) \right]^2 \quad (5.1.16)$$

と表され、 k は波数、 $\tilde{\omega}$ 及び $\tilde{k}$ はそれぞれ平均角周波数及び平均波数である。また、 C_{ds} 及び δ は調整係数、 m は調整指数、 $E(\omega, \theta)$ は波浪の方向スペクトル、 E_{tot} は波浪スペクトルの全エネルギーで、

$$E_{tot} = E(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (5.1.17)$$

である。

$\tilde{S}_{PM}$ は Pierson-Moskowitz スペクトルにおける全波浪の波形勾配で、

$$\tilde{S}_{PM} = \sqrt{3.02 \times 10^{-3}} \quad (5.1.18)$$

である。ここで、調整係数、調整指数は、それぞれ $C_{ds}=4.5$ 、 $\delta=0.5$ 、 $m=4$ として計算を行う。

② Suzuki・Isozaki (1994)

風波スペクトルの平衡領域では、ソース項の物理機構がバランスしているという phillips の仮説をもとに、平衡領域においては、各物理機構の大きさは同程度のオーダーであると仮定し、次元解析およびスケーリングを行い、定式化している。ここで、 $F(\omega, \theta)$ は波浪の方向スペクトルである。調整指数は、 $m = 2$ 、調整係数は $c_b = 6.0 \times 10^{-5}$ である。

$$S_{ds} = -C_b \varpi \left(\frac{\omega}{\varpi} \right)^3 \left(\frac{E^*}{E_{PMshallow}^*} \right)^m F \quad (5.1.19)$$

ここで、

$$\varpi = E^{-1} \omega F(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (5.1.20)$$

$$E = F(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad (5.1.21)$$

$$E^* = E \varpi^4 / g^2 \quad (5.1.22)$$

$$E_{PMshallow}^* = 4.57 \times 10^{-3} \times \frac{\tanh^2 kh}{1 + 2kh / \sinh 2kh} \quad (5.1.23)$$

③ Komen et al. (1984)

① の Janssen (1992) と同様の式を用いる。ただし、調整係数 $\delta=0$ とする。

表-5. 1. 10 各方法で用いた理論の組み合わせ

方法	物理過程モデル		採用している 主な波浪モデル
	風から波への エネルギー輸送項 (Sin)	エネルギー消散項 (白波砕波) (Sds)	
Janssen	Janssen(1989, 1991)	Janssen(1992)	WAMCycle-4 SWAN Wave WatchIII
Wu	Janssen(1989, 1991)の方法を用いるが、 U_{10} から U_* への変換に Wu の関係式を利用する	Janssen(1992)	
Mitsuyasu & Honda	Mitsuyasu・Honda(1982)と Hsiao・Shemdin(1983)	Suzuki・ Isozaki(1994)	JWA3G
Komen	Komen et al.(1984)	Komen et al.(1984)	WAMCycle-3 SWAN Wave WatchIII

(1) 伊勢湾 (Case1、Case2)

検討に用いた波浪観測地点の位置図を図-5.1.18に示す。浅海波浪モデルの境界値である沿岸波浪 GPV の精度を確認するため、浅海波浪モデルの計算対象領域外の観測地点である竜洋についても検討する。

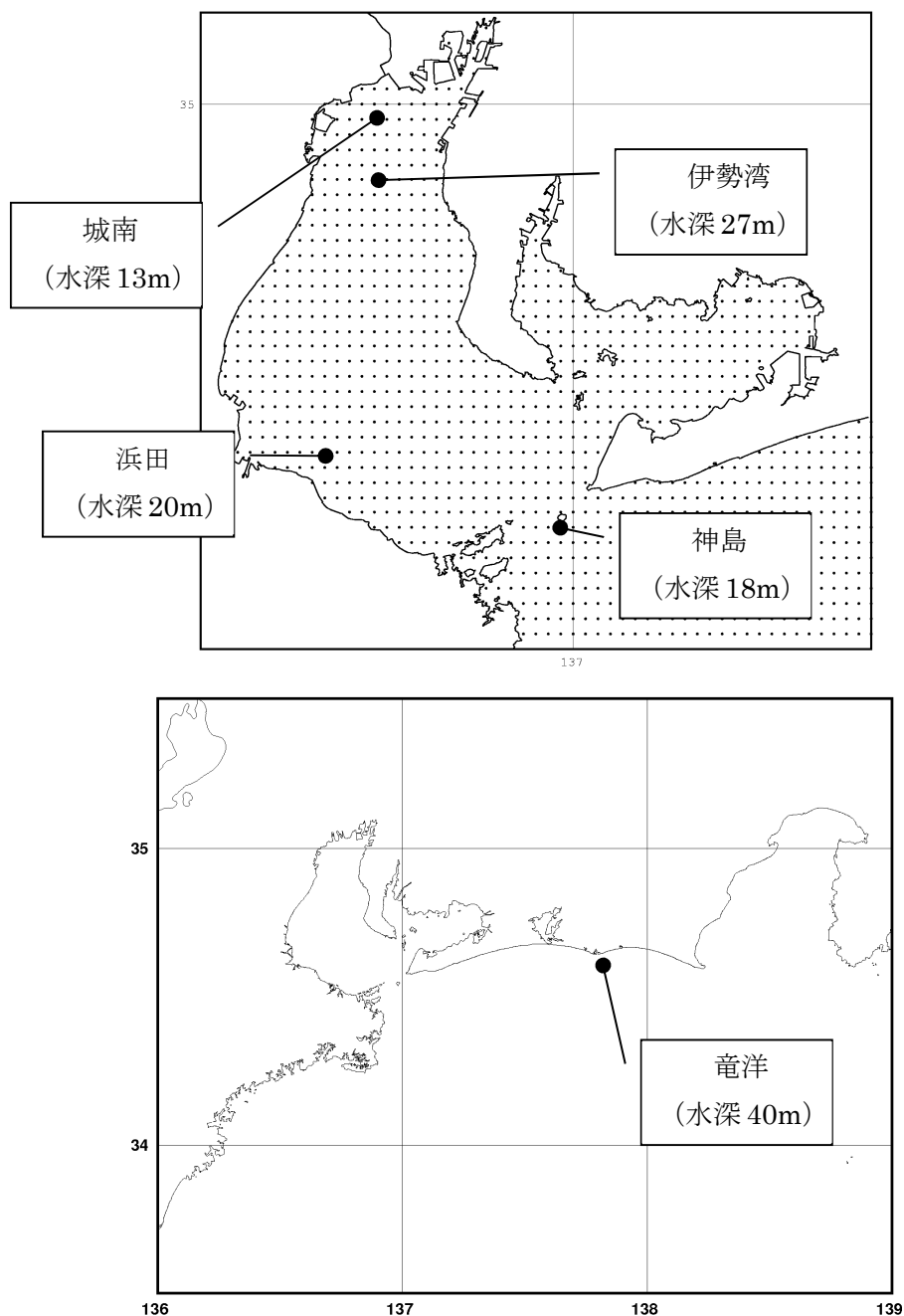


図-5.1.18 観測地点位置図

*上図は浅海波浪モデルの計算領域

① Case1 (2009 年台風第 18 号)

a)有義波による検討

浜田観測所における風の観測値と予測値を比較した図を図-5.1.19 に示す。台風通過時(3～6 時頃)は風が弱く、通過後の吹き返しは強く予測されている。

図-5.1.20～図-5.1.24 に、各観測地点について観測値と予測値の有義波を比較した図を示す。神島については、現地演算値と本業務で水圧波形データから計算した値の差が大きかったため、両方を示した。本業務では、微小振幅波理論の式による伝達関数を用いて水圧値を表面波形に換算しゼロアップクロスにより波浪諸元を求めた。

湾内地点(浜田、城南、伊勢湾)では、いずれの方法も周期は過大予測の傾向がある。湾口に位置する神島では、波高はいずれの方法でも著しく過大予測である。周期は、風が強い 5 時頃までは比較的一致しているが、風が弱くなると過大予測の傾向となっている。湾外の竜洋では、台風の通過時(3～6 時頃)に限ってみると、波高はほぼ一致しており、周期については、前半は 4 秒程度短い予測であるものの後半は一致している。

b)波浪スペクトルによる検討

図-5.1.25 に神島と浜田の周波数スペクトル図、図-5.1.26、図-5.1.27 に浜田の方向スペクトル図を示す。ここで、予測は Janssen の方法を用いている。

神島について予測と観測のスペクトルを比較すると、エネルギー密度は大きく異なっているものの、ピーク周波数はほぼ一致している。浜田では、4 時、5 時については、予測のピーク周波数は実測と比較して低周波側に偏る傾向がみられる。6 時、7 時については形状が双山型になっており、観測値にはみられないピークが低周波側に出現している。また、観測スペクトルでは、北西と東南東の風波が卓越しているのに対し、予測スペクトルでは東寄りのうねりが卓越している。

以上の結果から、台風の通過時の周期予測について以下のことがいえる。

- ・ 湾外、湾口付近での予測周期は、ほぼ妥当な値である。
- ・ 湾内での周期は過大予測であり、特に湾口方向からのうねり成分が過大である。

② Case2 (二つ玉低気圧)

図-5.1.28～図-5.1.31 に、各波浪観測地点について観測値と予測値の代表波を比較した図を示す。

湾内地点では、周期はいずれの方法も周期は 1～2 秒程度の過大予測となっている。湾口に位置する神島では、波高ピーク前後の時間帯の周期はほぼ一致している。湾外の竜洋の周期は、1～2 秒程度の過大予測となっている。

以上の結果から、波高ピーク前後の時間帯の周期予測についてまとめると以下のことがいえる。

- ・ 湾口付近での予測周期は、ほぼ妥当な値である。
- ・ 湾内での周期は過大予測である。

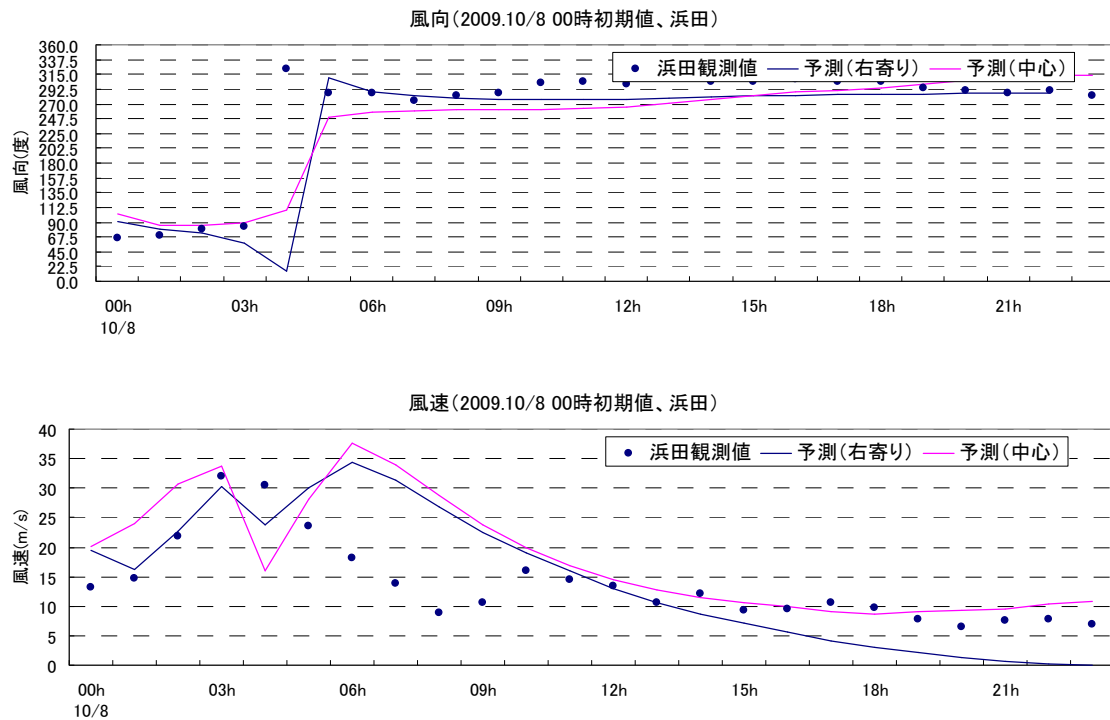


図-5.1.19 浜田における予測風と観測風の比較 (10月8日0時初期値)

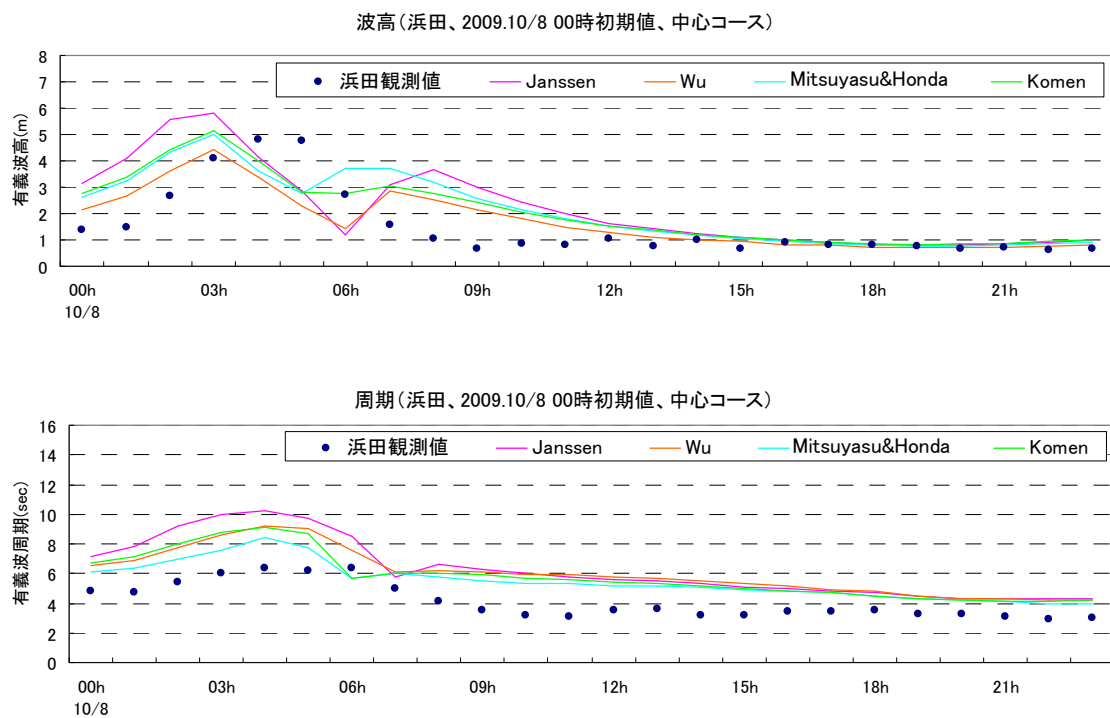


図-5.1.20 観測値と予測値の比較 (浜田、10月8日0時初期値、中心コース)

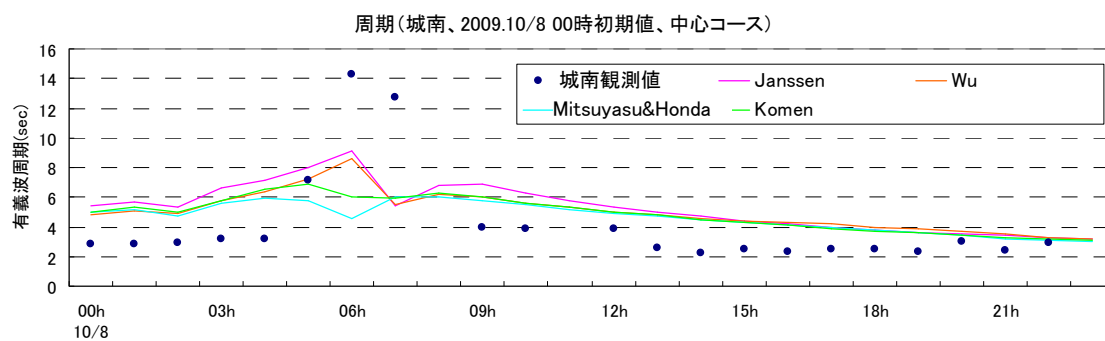
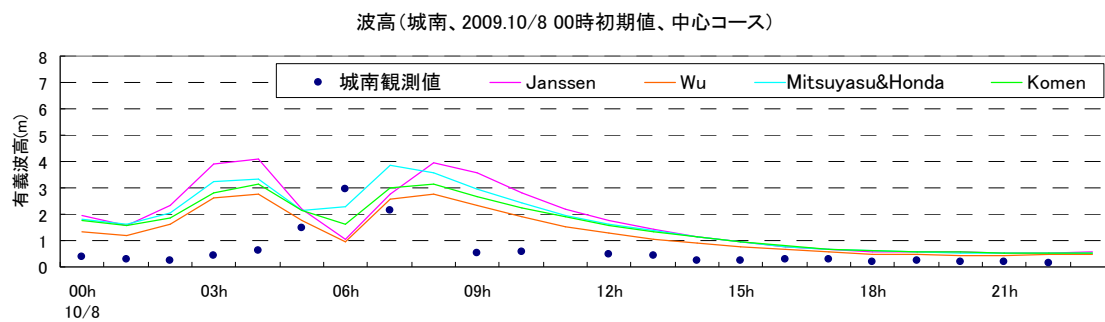


図-5.1.21 観測値と予測値の比較(城南、10月8日0時初期値、中心コース)

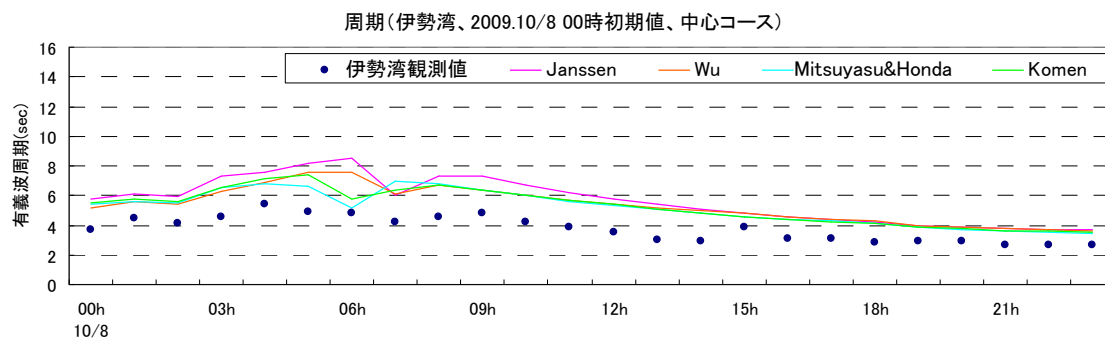
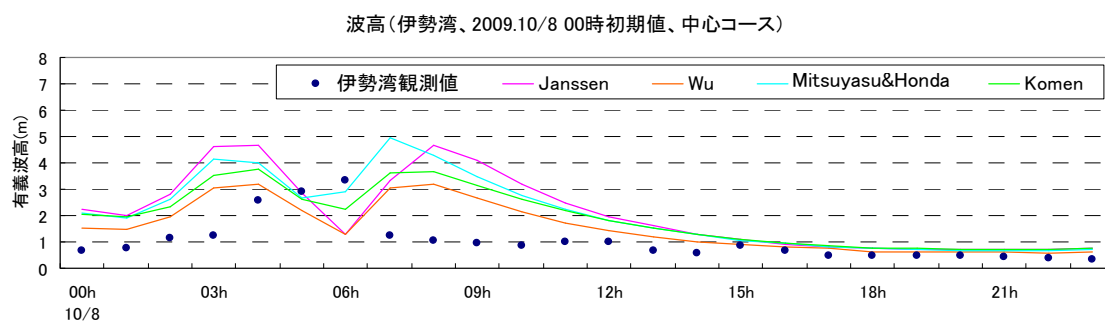


図-5.1.22 観測値と予測値の比較(伊勢湾、10月8日0時初期値、中心コース)

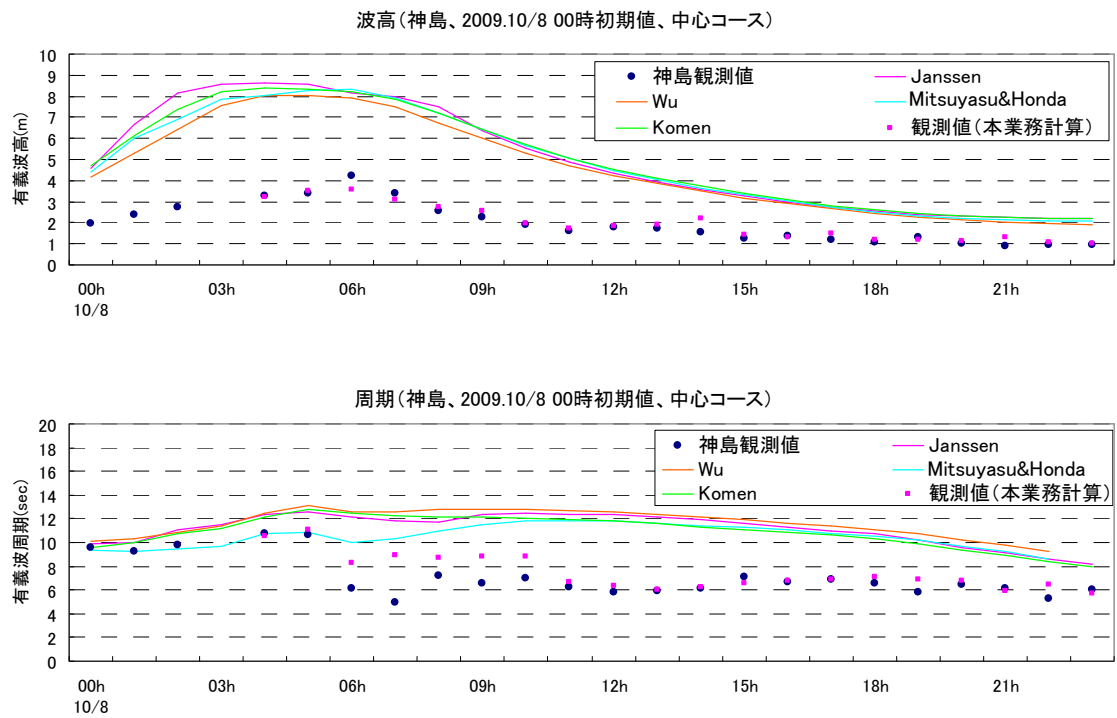


図-5.1.23 観測値と予測値の比較(神島、10月8日0時初期値、中心コース)

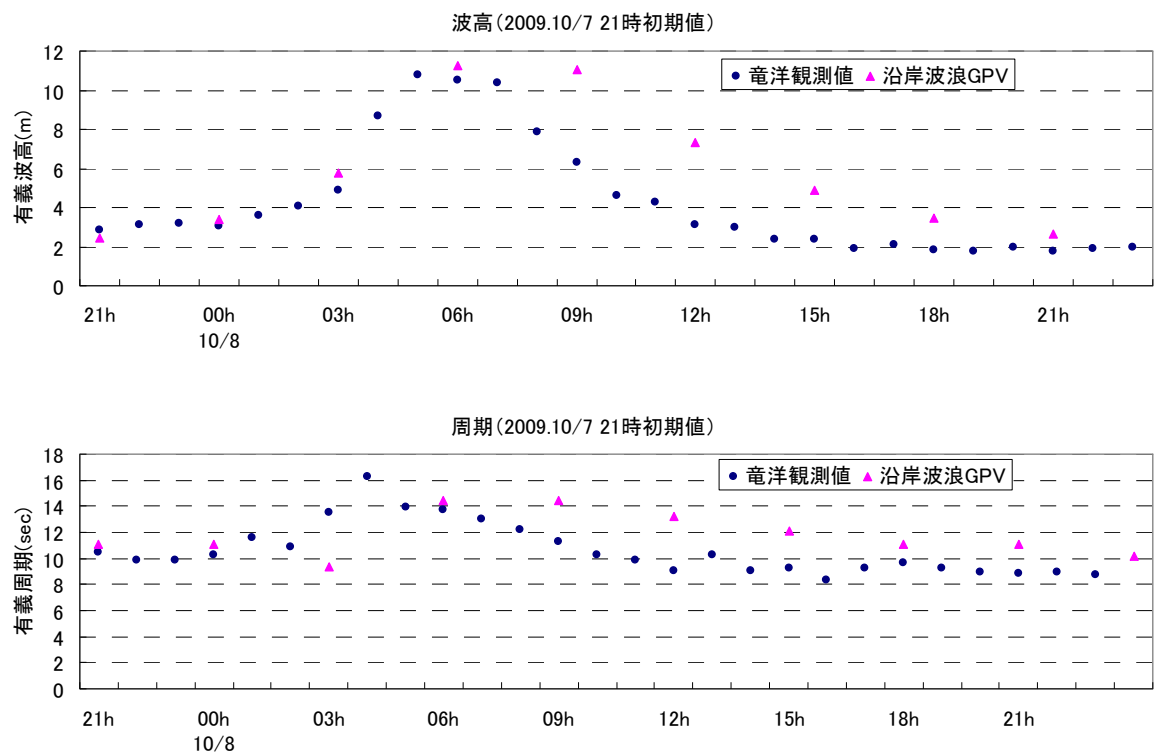


図-5.1.24 観測値と予測値の比較(竜洋、10月7日21時初期値)

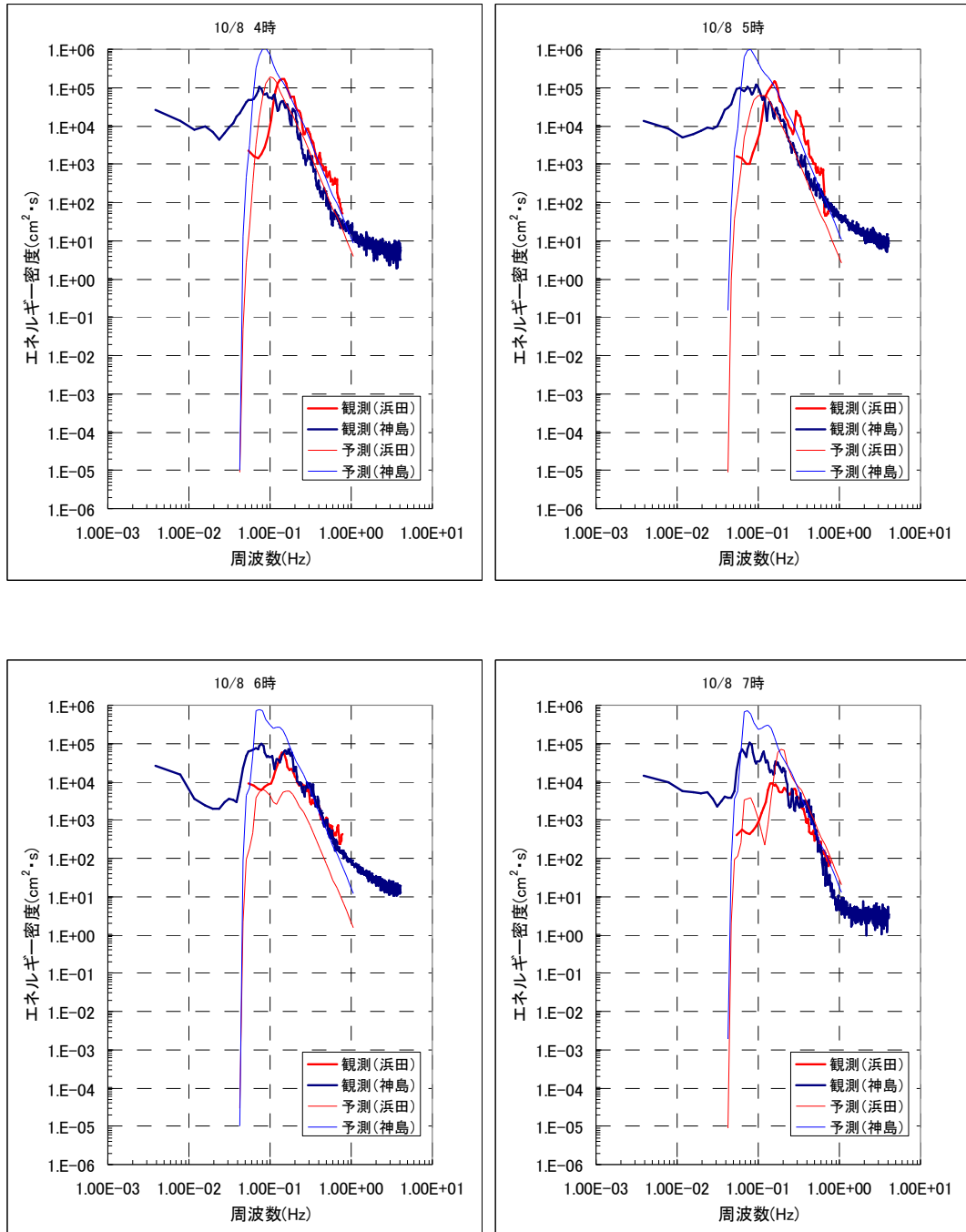


図-5.1.25 観測値と予測値(Janssen)の周波数スペクトル
(10月8日0時初期値、中心コース)

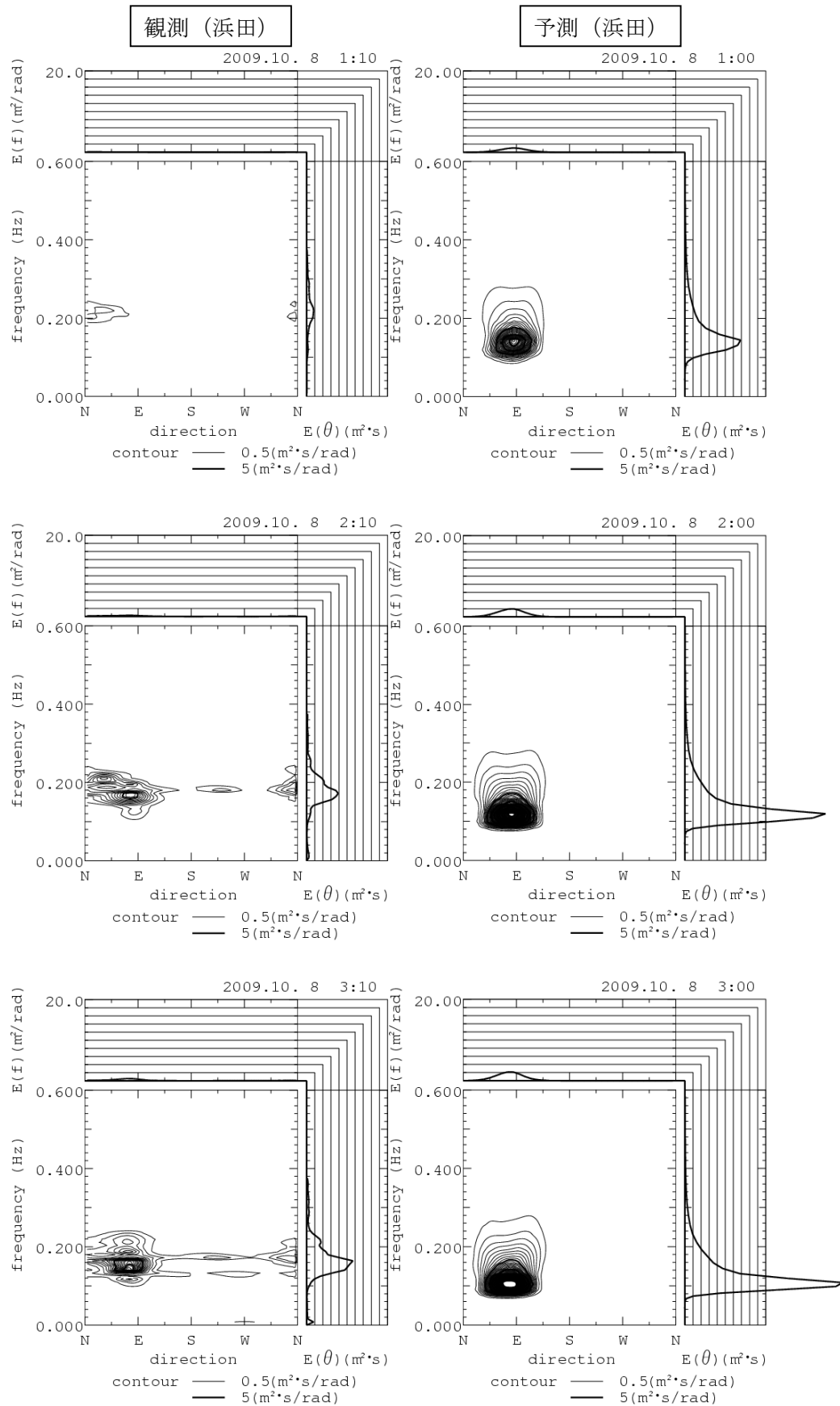


図-5.1.26 観測値と予測値(Janssen)の周波数スペクトル (10月8日0時初期値、中心)

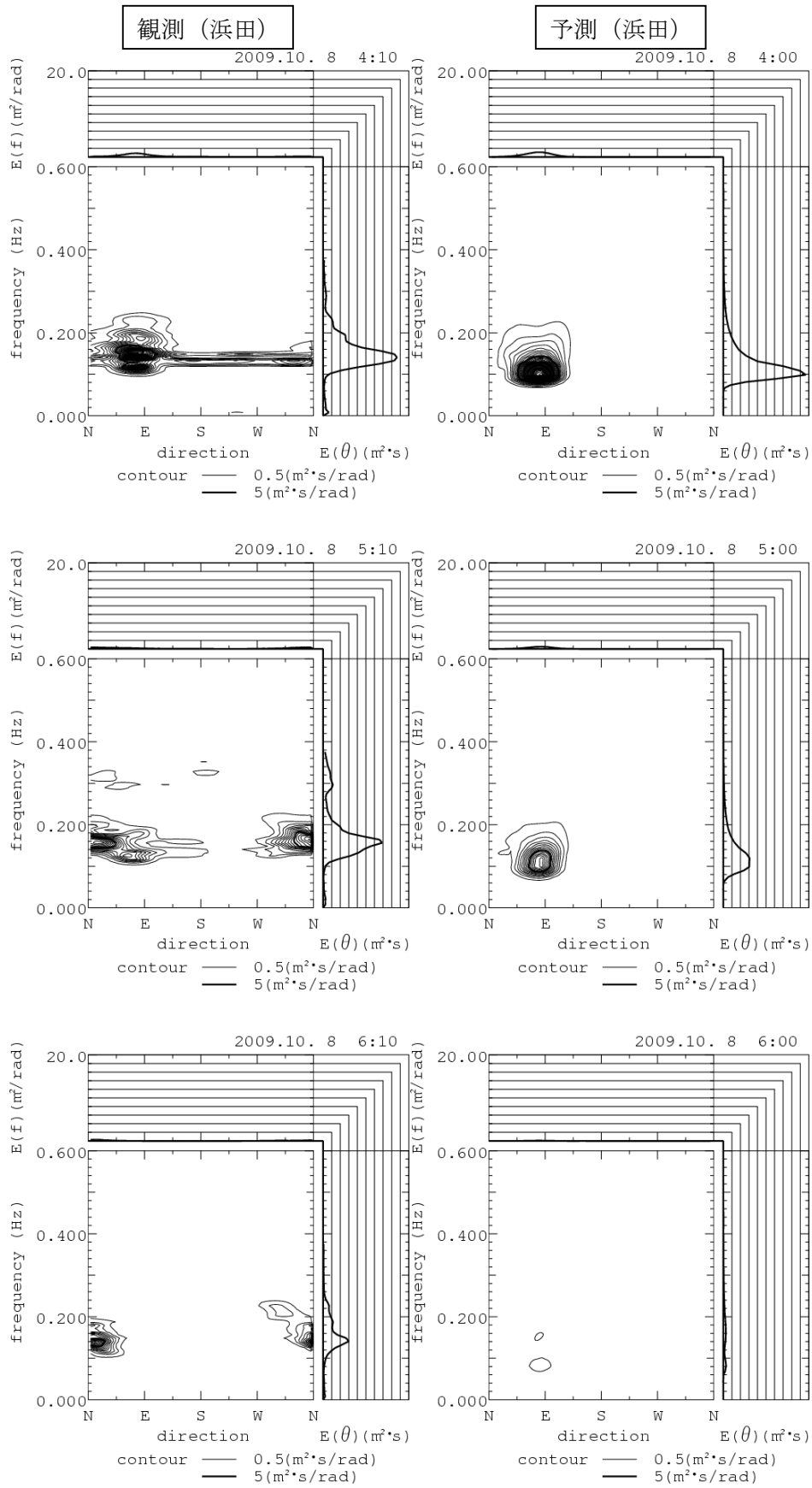


図-5.1.27 観測値と予測値(Janssen)の周波数スペクトル (10月8日0時初期値、中心)

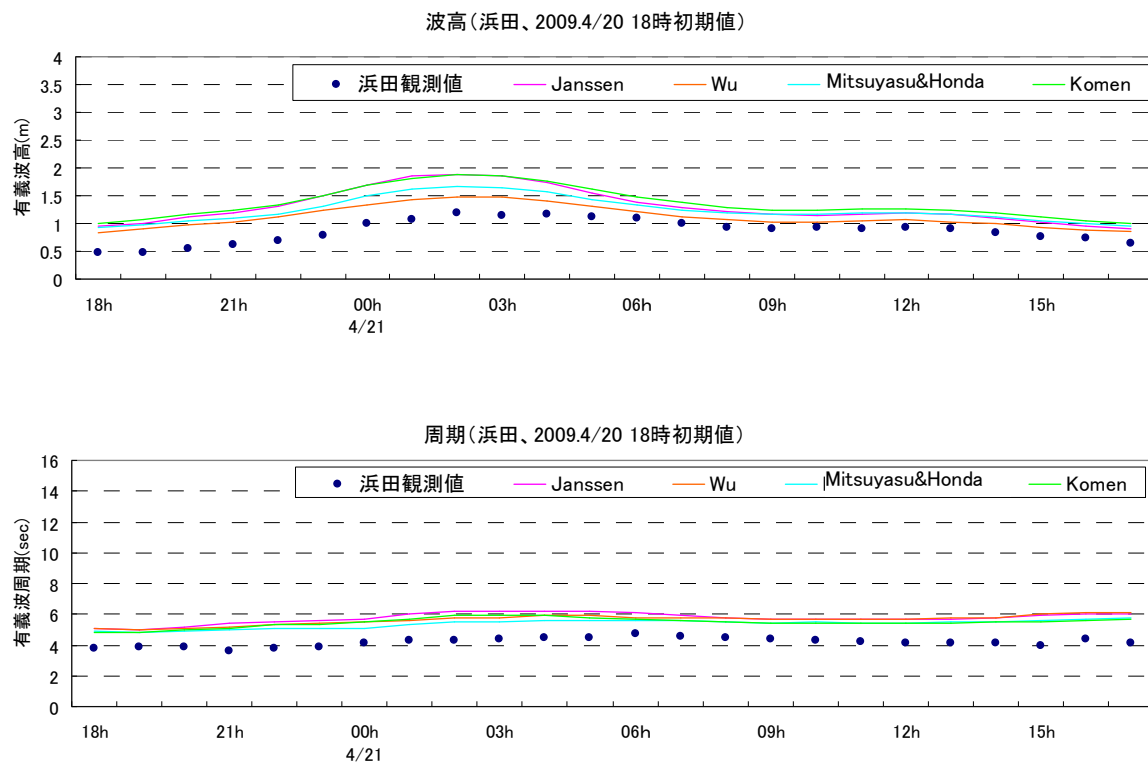


図-5.1.28 観測値と予測値の比較 (浜田、4月20日18時初期値)

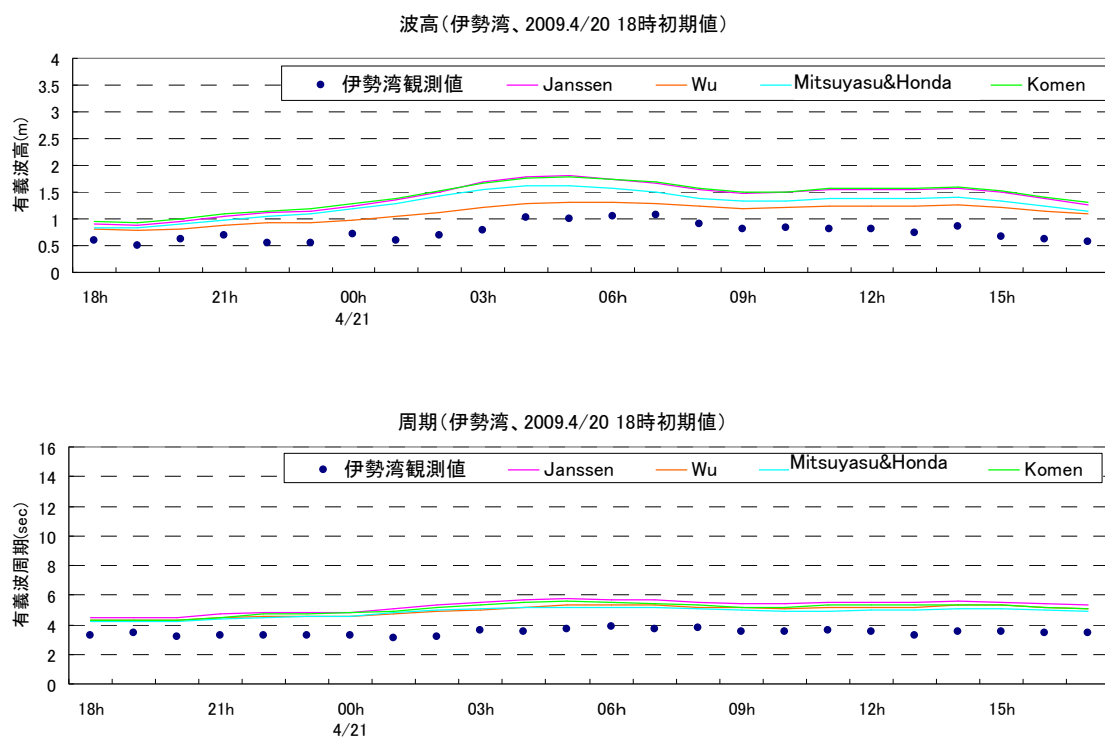


図-5.1.29 観測値と予測値の比較 (伊勢湾、4月20日18時初期値)

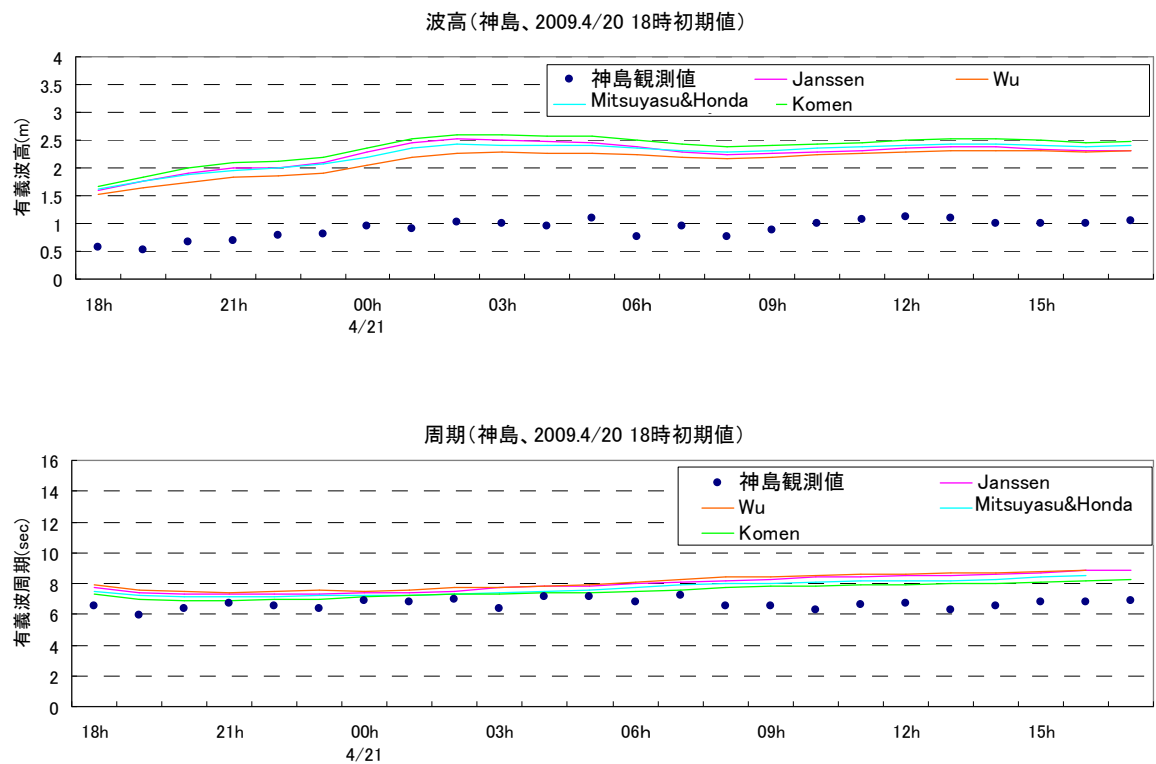


図-5.1.30 観測値と予測値の比較 (神島、4月20日18時初期値)

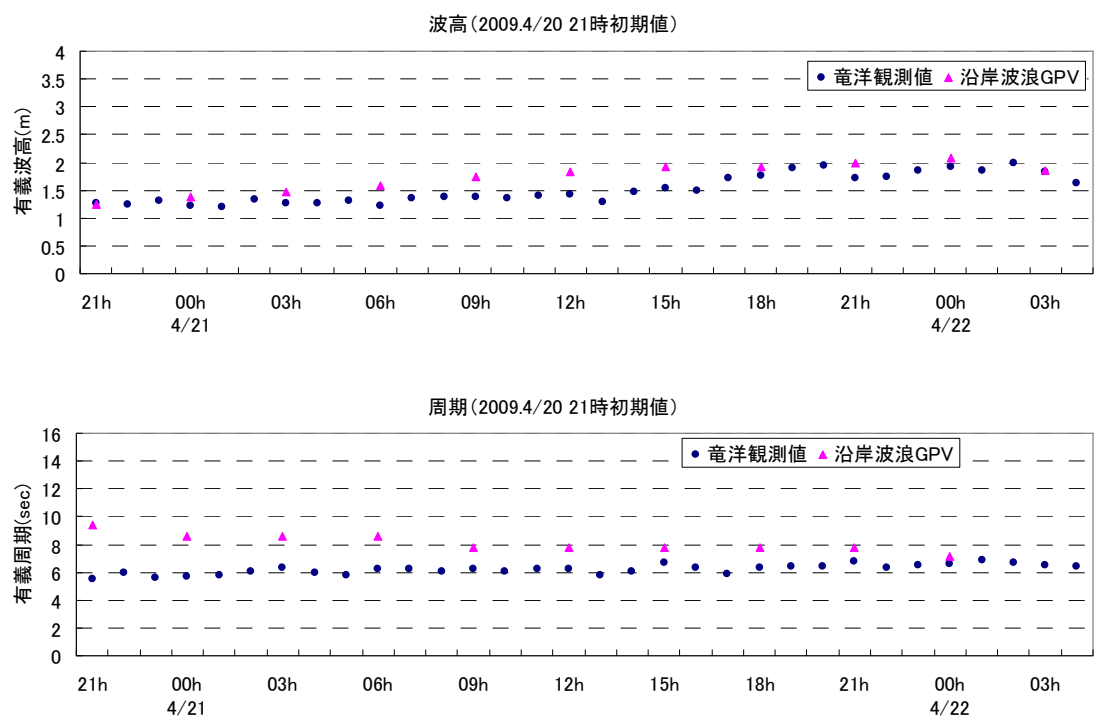


図-5.1.31 観測値と予測値の比較 (竜洋、4月20日21時初期値)

(2) 東京湾 (Case3、Case4)

検討に用いた波浪観測地点の位置図を図-5.1.32に示す。浅海波浪モデルの境界値である沿岸波浪 GPV の精度を確認するため、浅海波浪モデルの計算対象領域外の観測地点である波浮についても検討する。

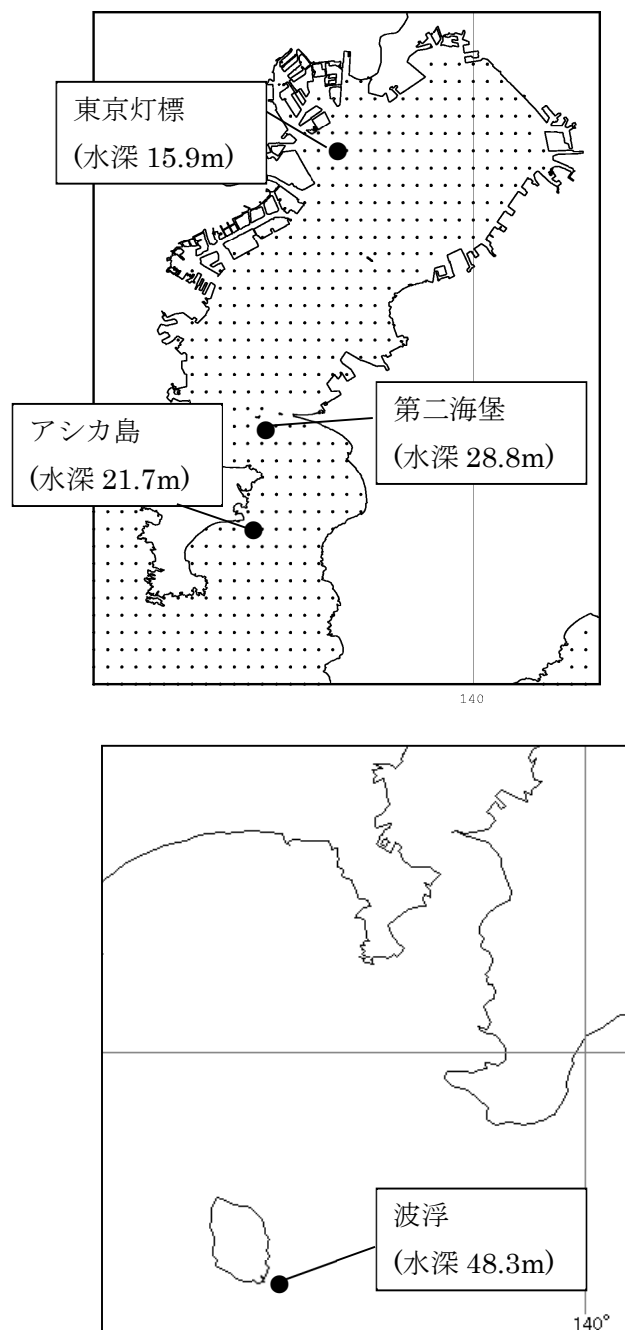


図-5.1.32 観測地点位置図

*上図は浅海波浪モデルの計算領域

① Case3 (2009 年台風第 18 号)

東京灯標における風の観測値(観測高度約 24m)と予測値を比較した図を図-5.1.33 に示す。観測風が 6 時頃から急に強くなり北寄りの風から南寄りの風が変わったのに対して、予測値は中心コース、右寄りコースともに 0 時頃から徐々に風が強くなり、風向は南東から南西に変化している。実際の台風は右寄りのコースに近い経路をとったため、ここでは右寄りのコースの予測値について検討する。

図 5.1.34～図-5.1.37 に、各観測地点について観測値と予測値の有義波を比較した図を示す。全観測地点において、波高、周期ともに過大予測となっている。これは、予測風速が過大であること、南寄りの強風の継続時間が実際よりも長かったことなどが原因として考えられる。風の予測が過大であること、全観測地点で過大予測であったことから、本事例による要因検討は難しい。

② Case4 (日本海低気圧)

東京灯標における風の観測値(観測高度約 24m)と予測値を比較した図を図-5.1.38 に示す。東京灯標の観測高度と予測高度(10m)が異なることを考慮すると、予測風は観測風と良く一致しているといえる。

図-5.1.39～図-5.1.42 に、各観測地点について観測値と予測値の有義波を比較した結果を示す。湾外の波浮は、波高は 1m 程度、周期は 2 秒程度の過小予測であり、湾口に位置するアシカ島においては、波高は過大予測の傾向があるが周期は良く一致している。第二海堡では、波高は過大評価の傾向があるが、波高ピーク付近の周期はよく一致している。湾内の東京灯標では、波高は Wu の方法では良く一致しているが他の方法では 1～2m の過大予測であった。周期は Janssen の方法は 2 秒程度、その他の方法では 1 秒程度の過大予測であった。

また、この事例は、低気圧が通過して波高が低くなった時に異常に長い周期が計算された事例である(図-5.1.9 参照)。その異常周期を含む予測について、各方法の周期の計算結果を図-5.1.43 に示す。浅海波浪モデルの周期は、他の方法と比較して特に長い。これは、リミターが修正されていないためであると考えられる。修正リミターを用いた 4 方法の中では、Mitsuyasu& Honda と Komen の方法が最も観測値に近い結果を得ている。

以上の結果から、周期予測について以下のことがいえる。

- ・物理理論の組み合わせの選択により、観測値に近い予測値を得ることができる。
- ・浅海波浪モデルの低波浪時に異常に周期が長くなる現象は、修正リミターに変更すること、および、Mitsuyasu& Honda もしくは Komen の方法を用いることで改善できると考えられる。

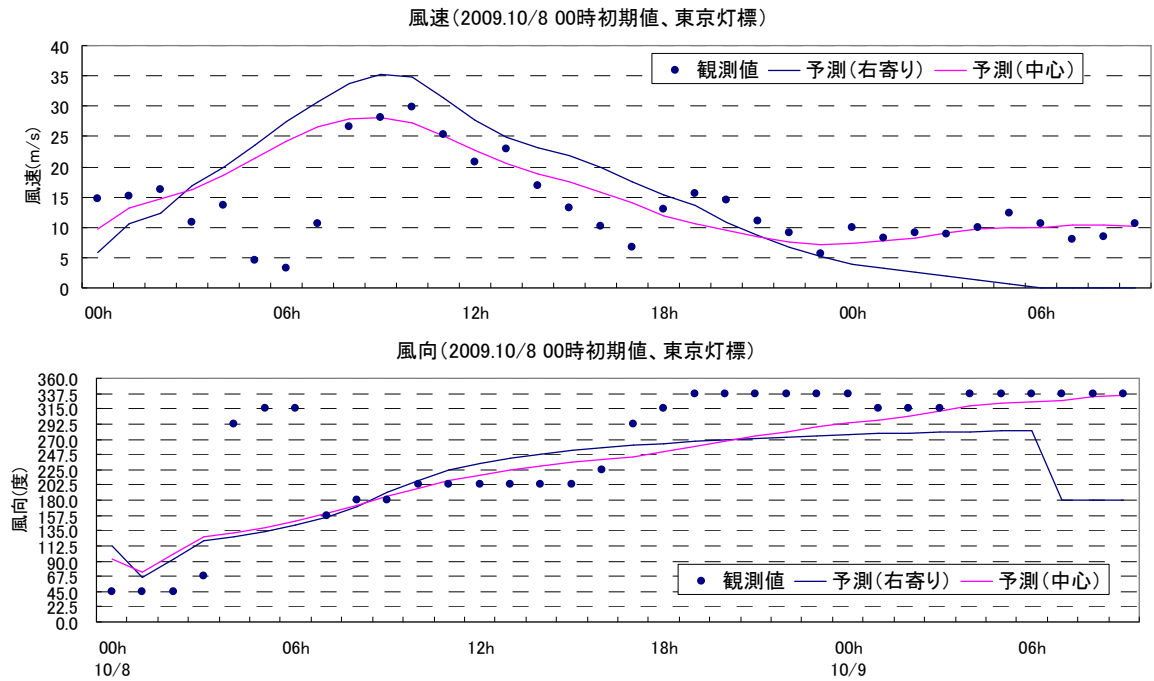


図-5.1.33 東京灯標における予測風と観測風の比較 (10月8日0時初期値)

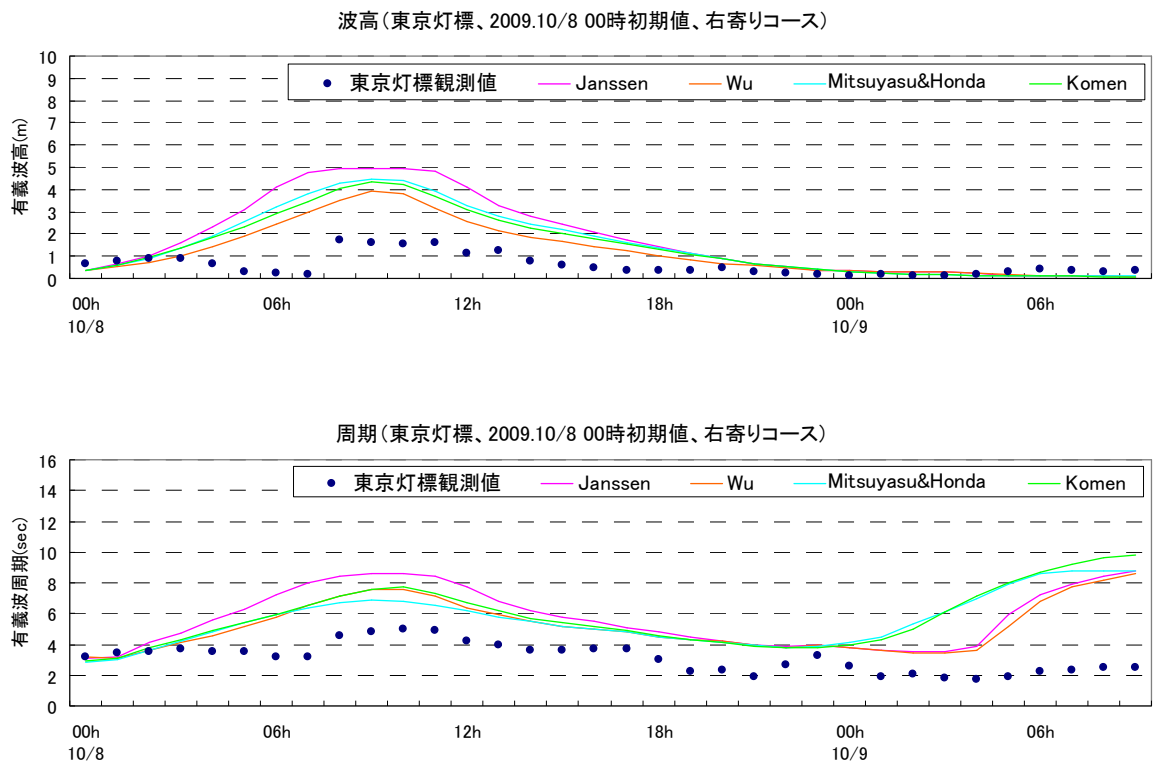


図-5.1.34 観測値と予測値の比較 (東京灯標、10月8日0時初期値、右寄りコース)

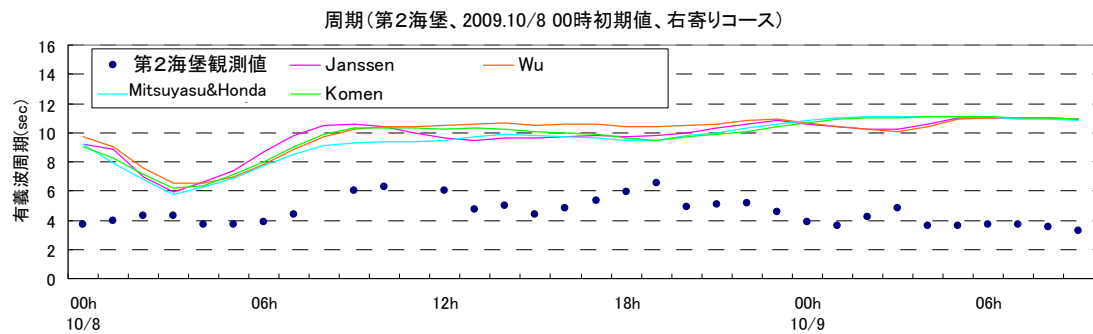
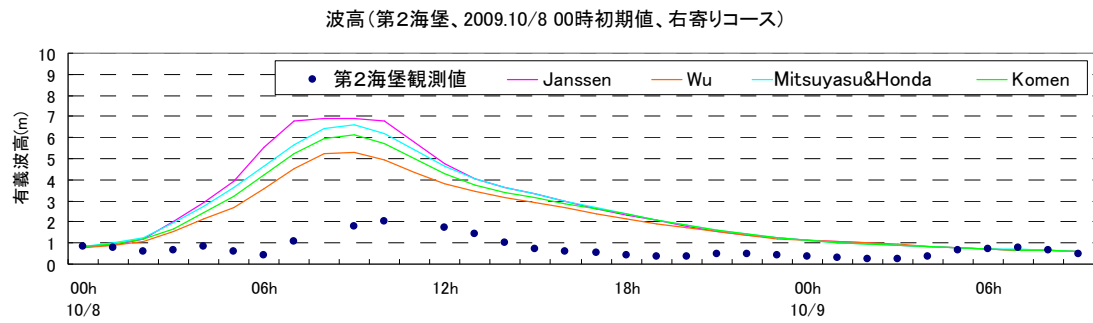


図-5.1.35 観測値と予測値の比較 (第二海堡、10月8日0時初期値、右寄りコース)

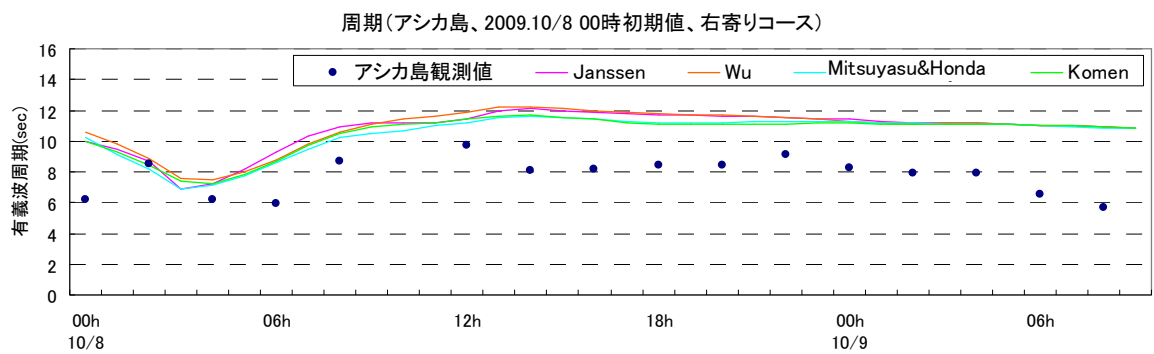
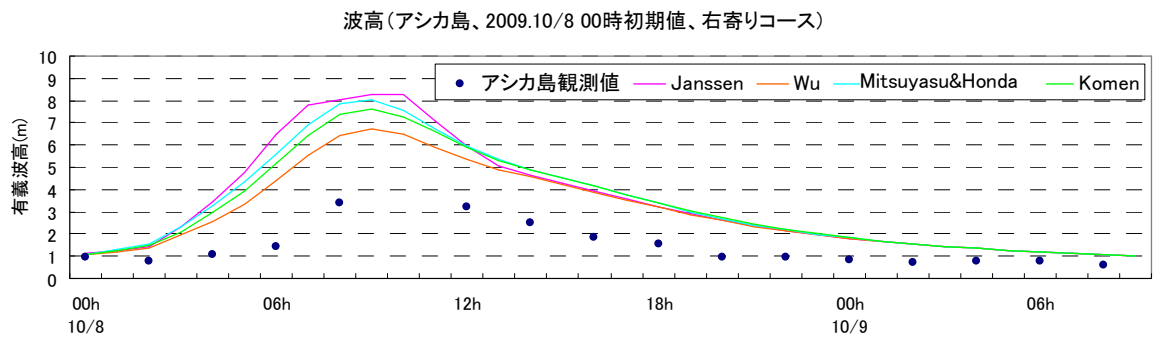


図-5.1.36 観測値と予測値の比較 (アシカ島、10月8日0時初期値、右寄りコース)

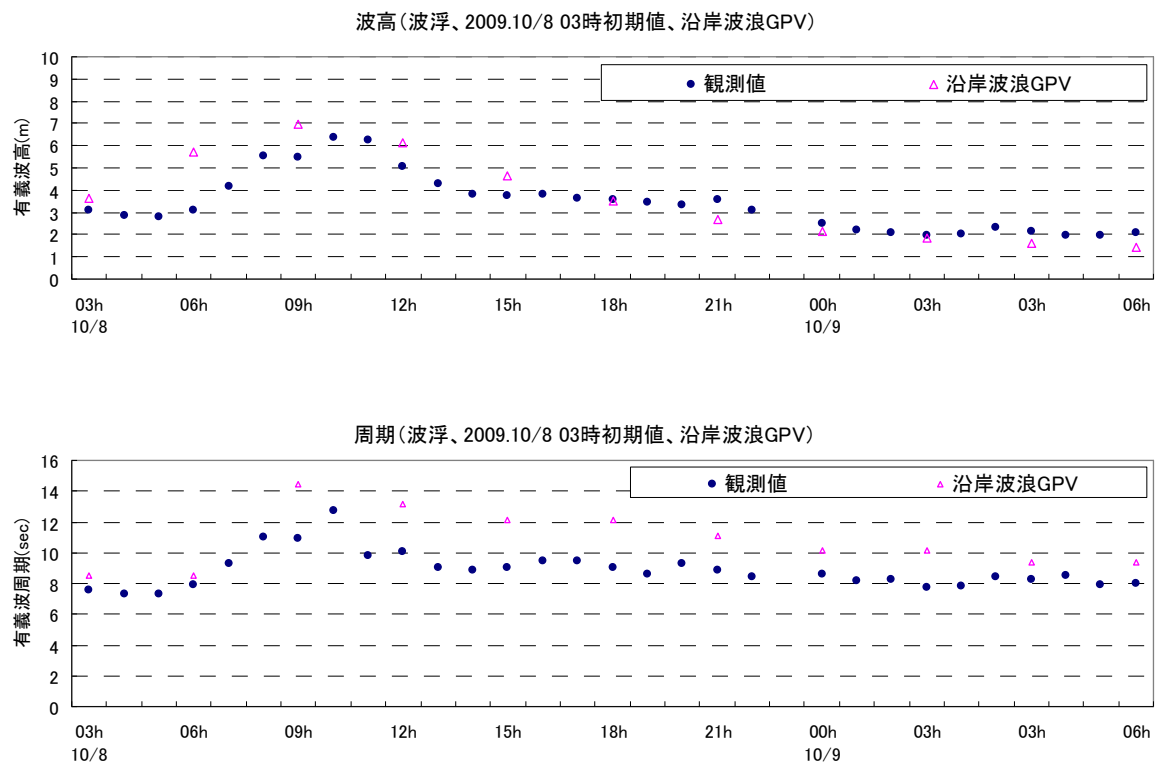


図-5.1.37 観測値と予測値の比較 (波浮、10月8日3時初期値)

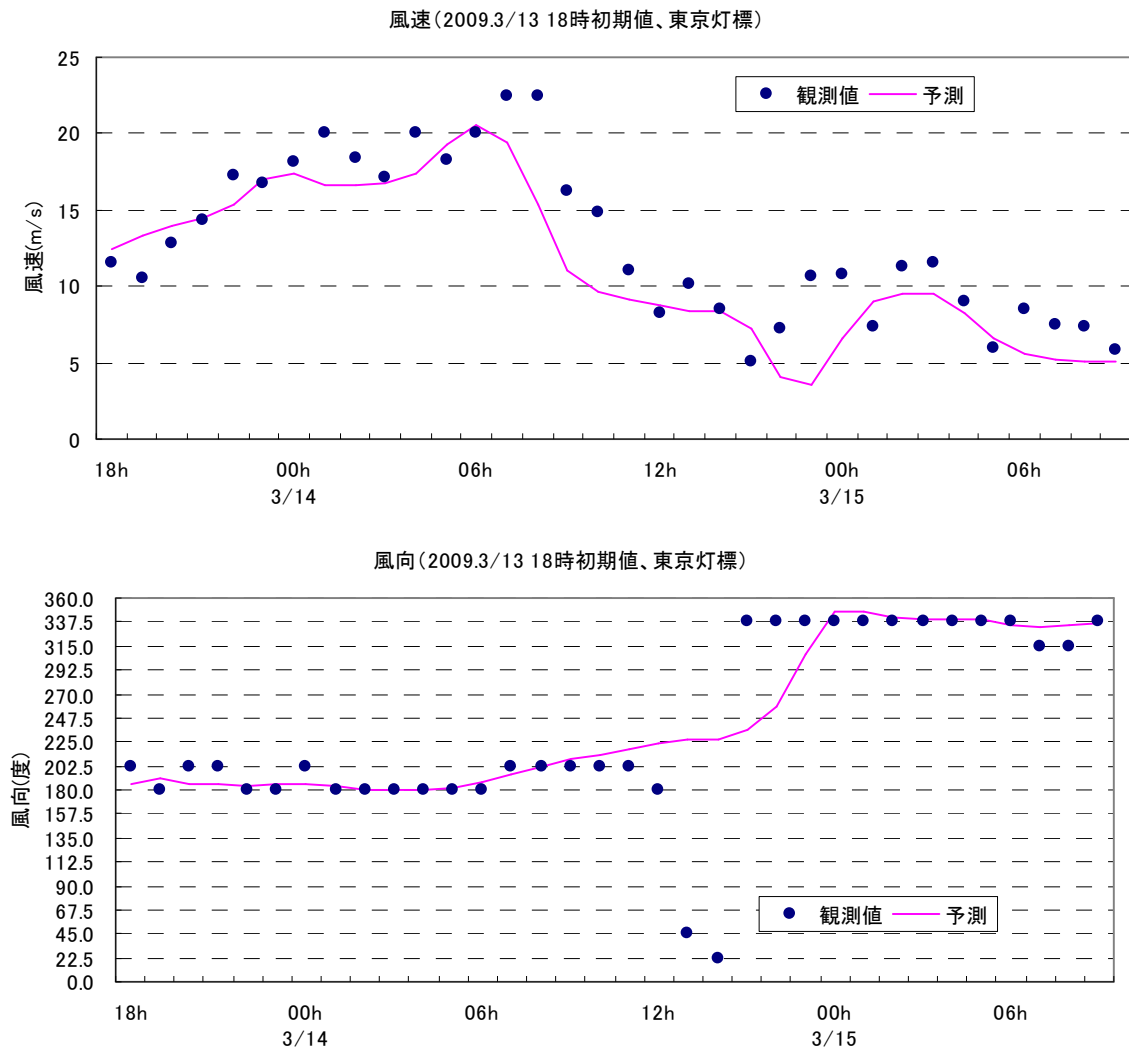


図-5.1.38 東京灯標における予測風と観測風の比較 (3月13日18時初期値)

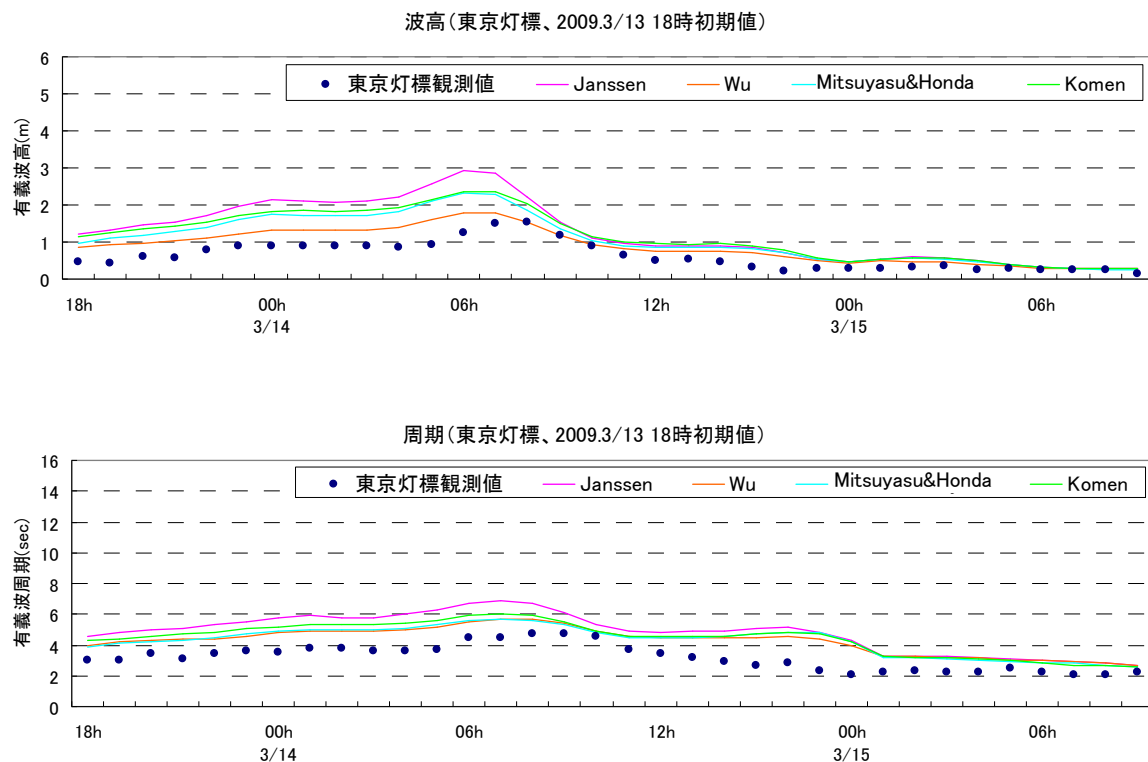


図-5.1.39 観測値と予測値の比較 (東京灯標、3月13日18時初期値)

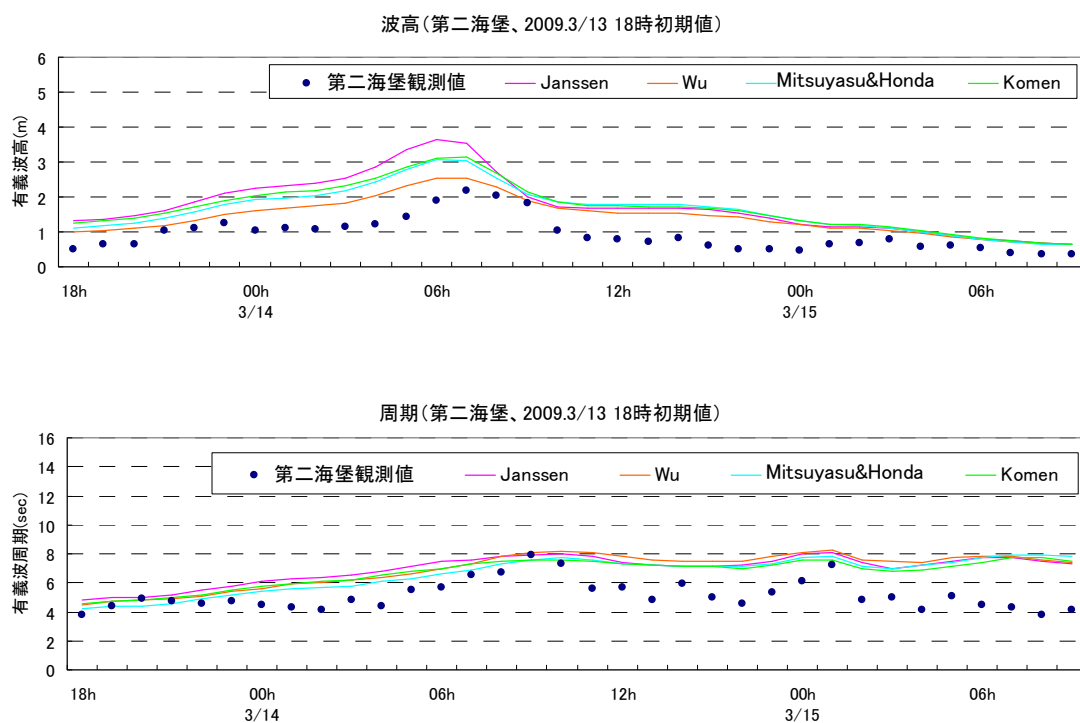


図-5.1.40 観測値と予測値の比較 (第二海堡、3月13日18時初期値)

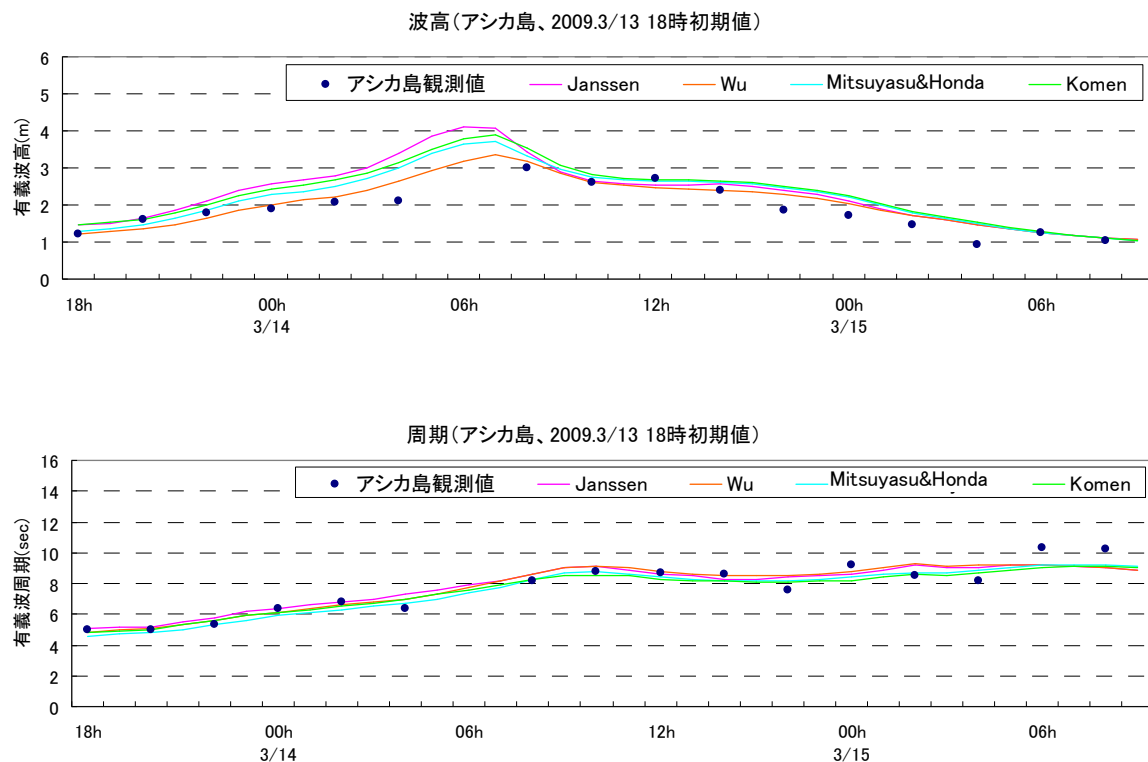


図-5.1.41 観測値と予測値の比較 (アシカ島、3月13日18時初期値)

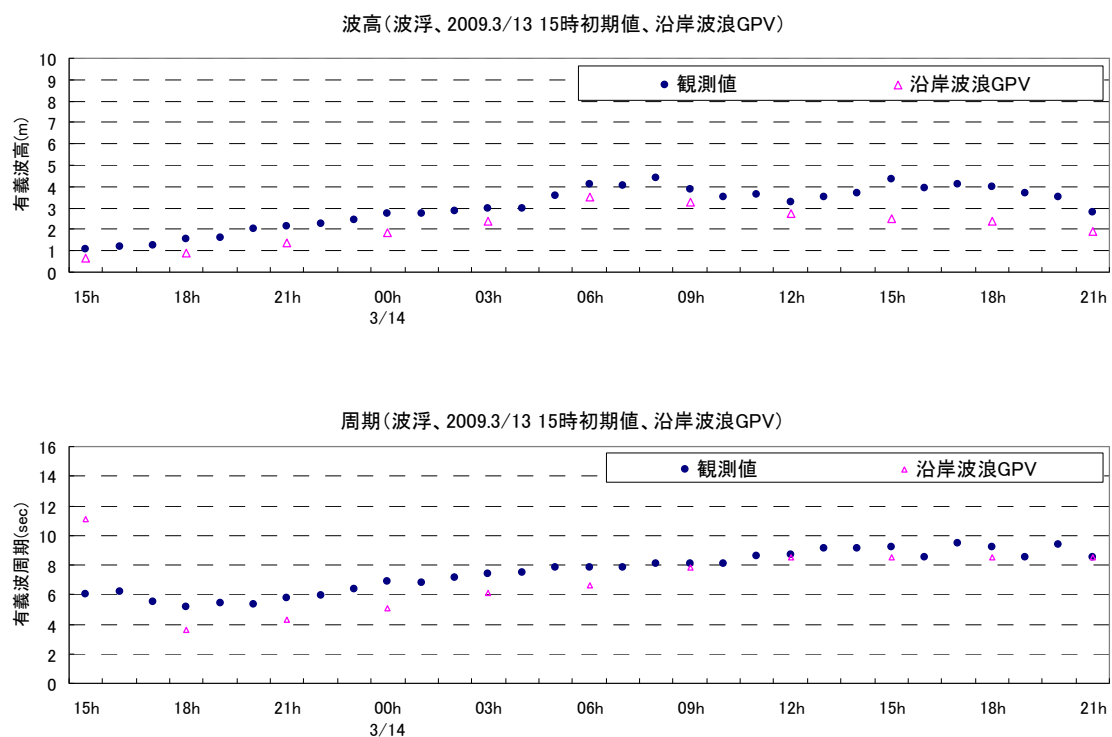


図-5.1.42 観測値と予測値の比較 (波浮、3月13日15時初期値)

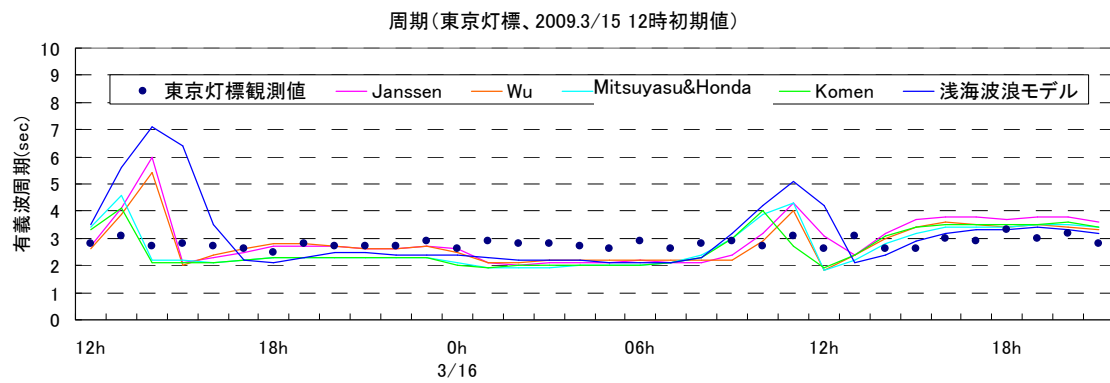


図-5.1.43 低波浪時予測周期のモデルによる差異（東京灯標、3月15日12時初期値）

4. 浅海波浪モデルの改良

1) 湾口地形の検討

ここまでの検討により、伊勢湾においては、観測値と比較して予測値にはうねり性の波が多く含まれていることがわかった。現在用いている地形では、湾口部の小さな島が海格子として扱われていることが原因と考えられるため、**図-5.1.44**に示すように島（大築海島、小大築海島、神島）や伊良湖岬を海格子から陸格子に変更した。

Case1、Case2 について、湾口部分を修正した地形を入力として行った予測計算結果と観測値の比較を**図-5.1.45**～**図-5.1.50**に、湾口地形変更前後の予測結果を**図-5.1.51**～**図-5.1.55**に示す。また、**図-5.1.56**に神島と浜田の周波数スペクトル図を示す。有義波周期、スペクトル形状ともに、修正後の方が観測値に近い結果となっている。

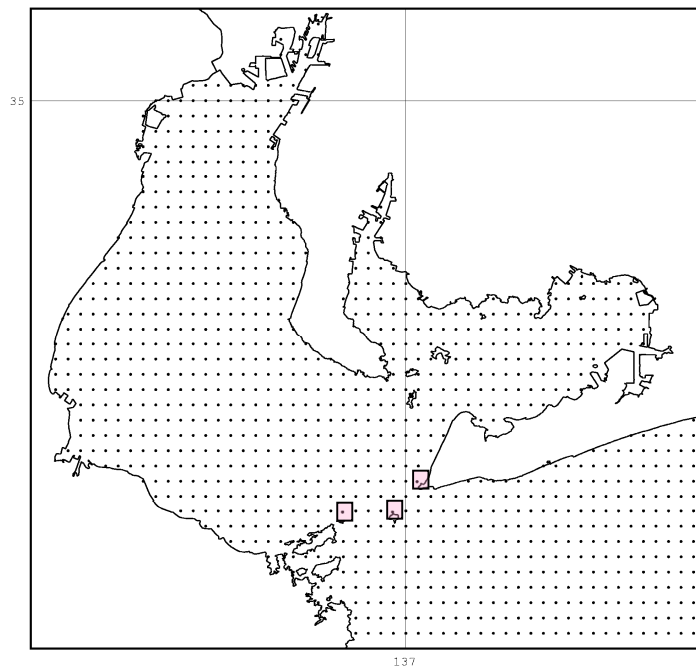


図-5.1.44 湾口地形修正（**■**部分を陸に変更）

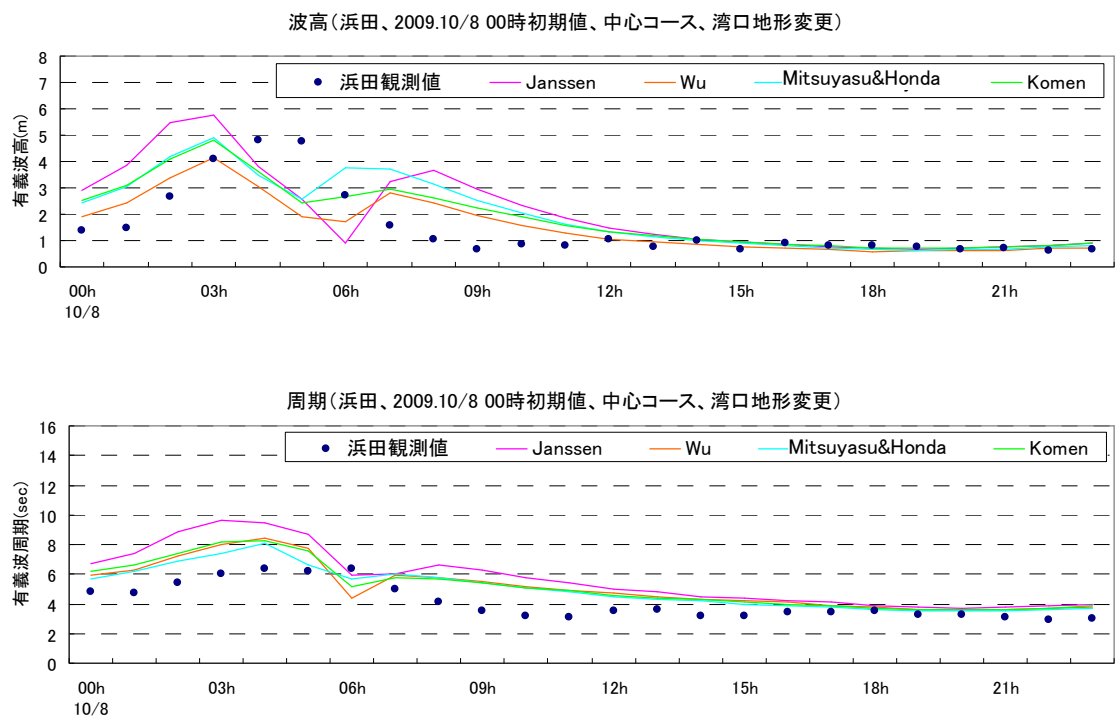


図-5.1.45 観測値と予測値の比較 (浜田、10月8日0時初期値、中心コース)

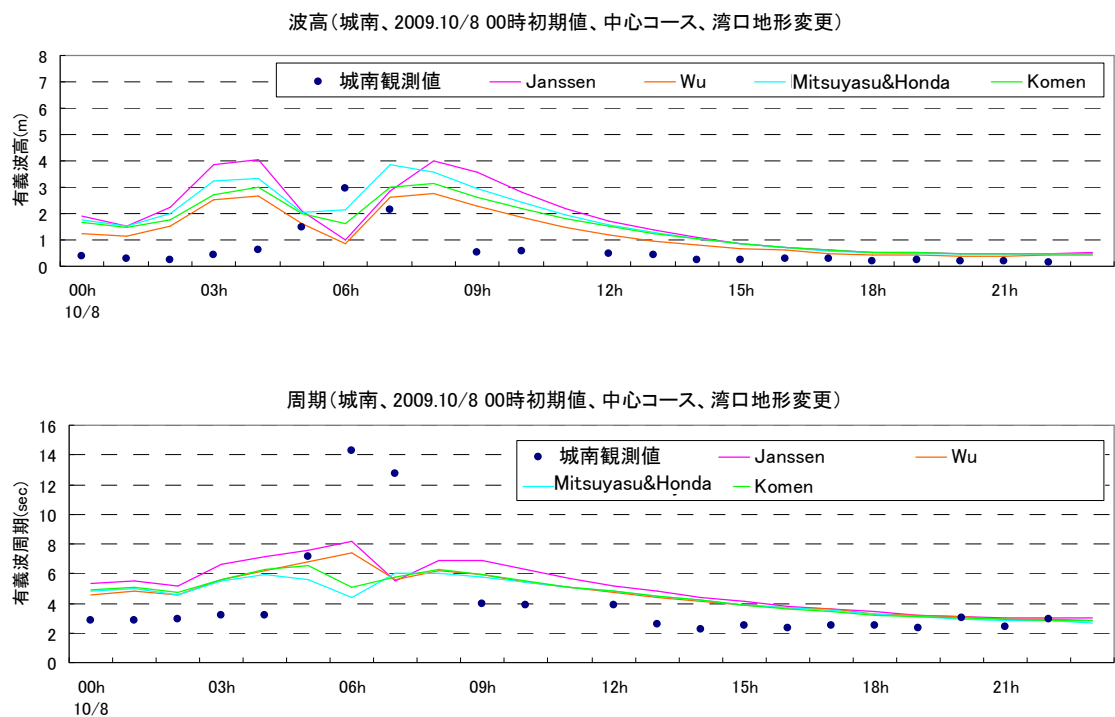


図-5.1.46 観測値と予測値の比較 (城南、10月8日0時初期値、中心コース)

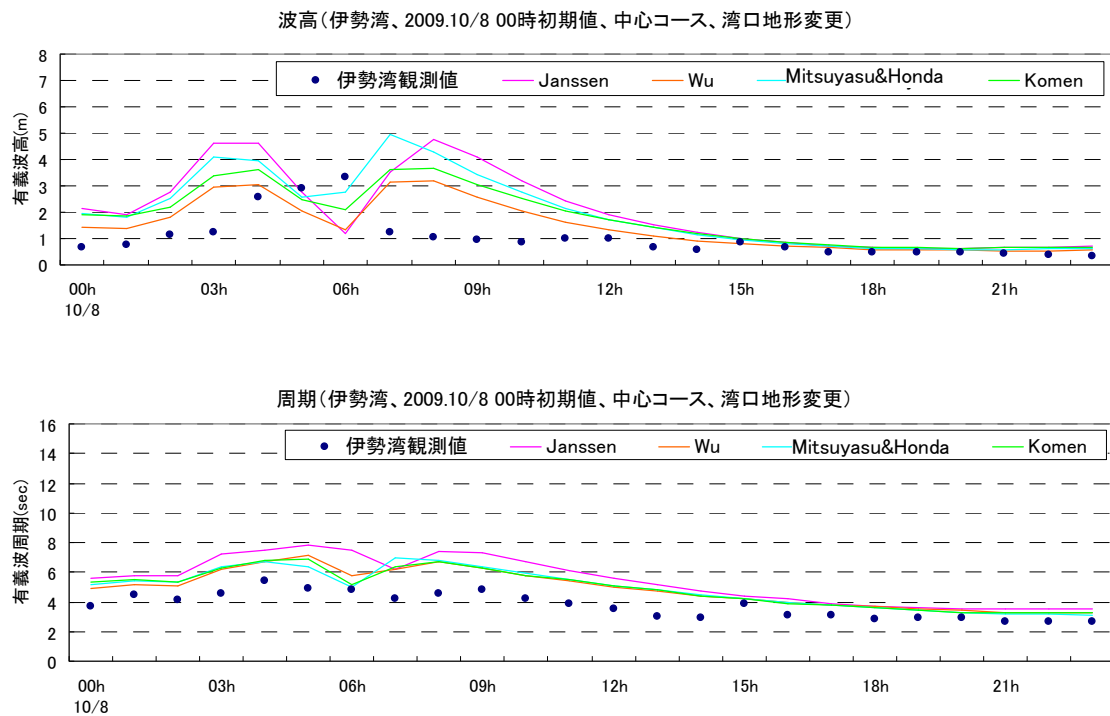


図-5.1.47 観測値と予測値の比較(伊勢湾、10月8日0時初期値、中心コース)

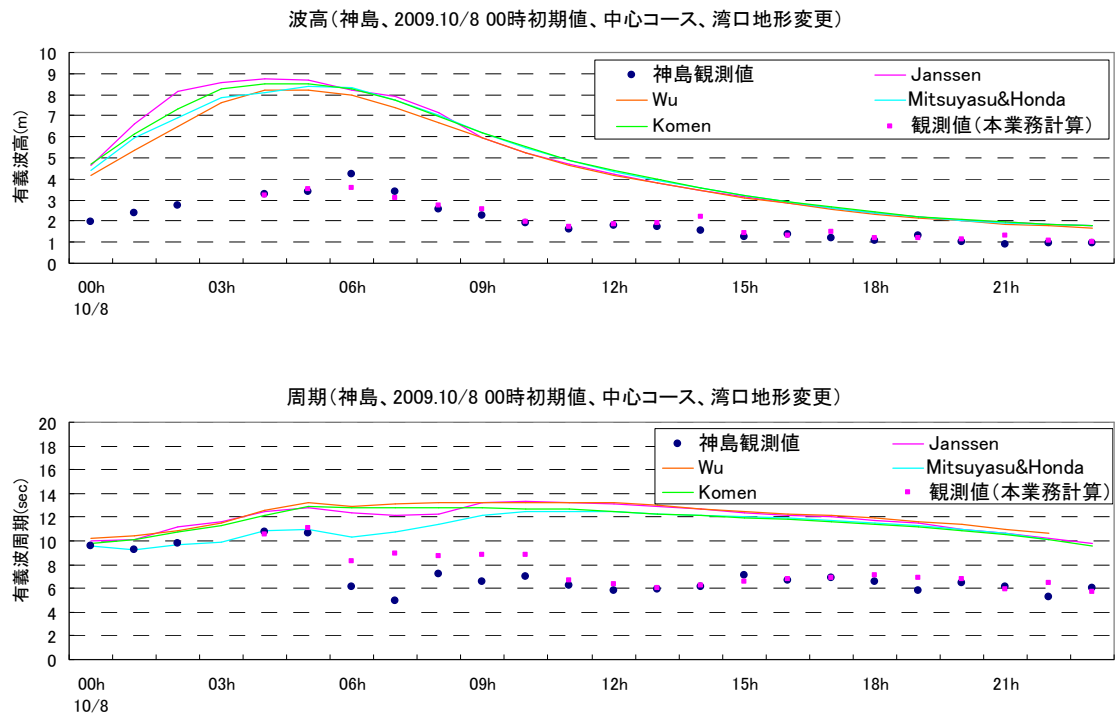


図-5.1.48 観測値と予測値の比較(神島、10月8日0時初期値、中心コース)

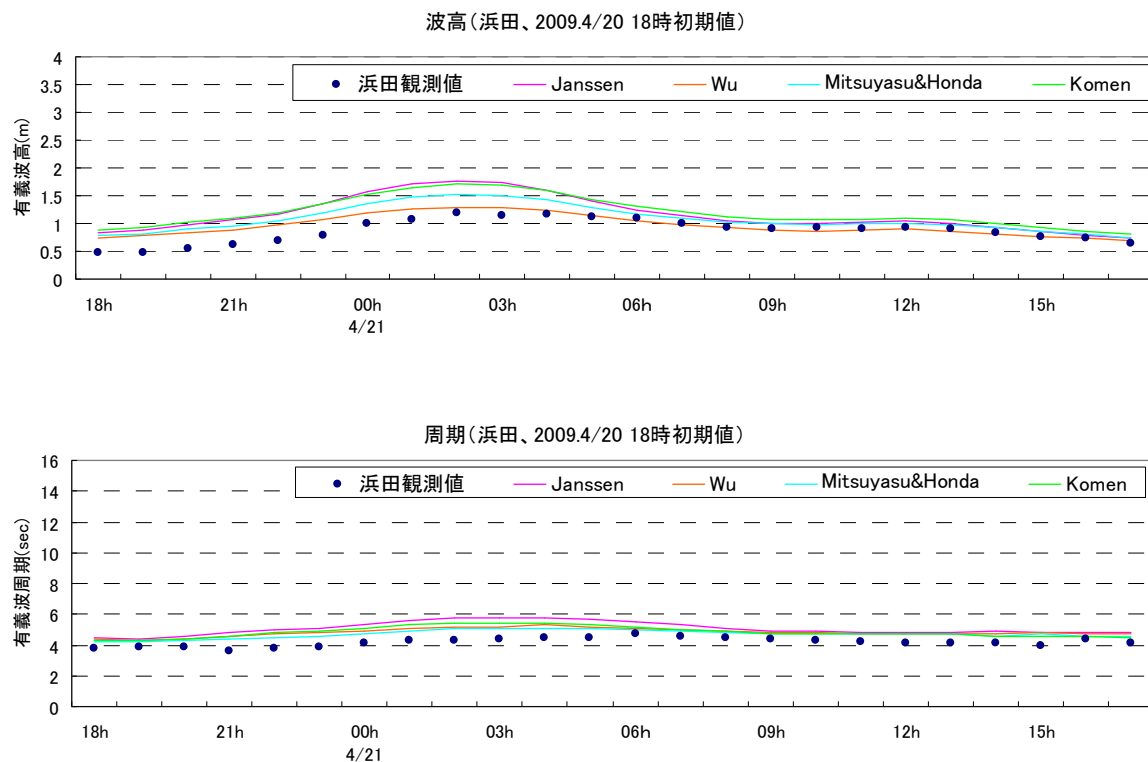


図-5.1.49 観測値と予測値の比較 (浜田、4月20日18時初期値、湾口地形変更後)

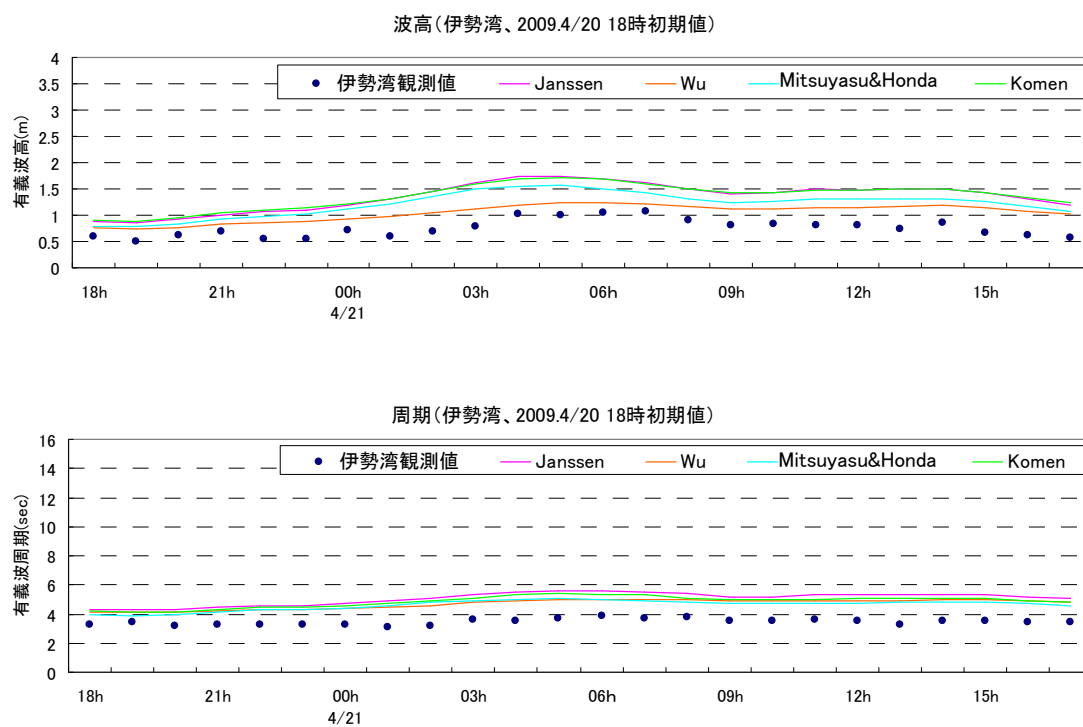


図-5.1.50 観測値と予測値の比較 (伊勢湾、4月20日18時初期値、湾口地形変更後)

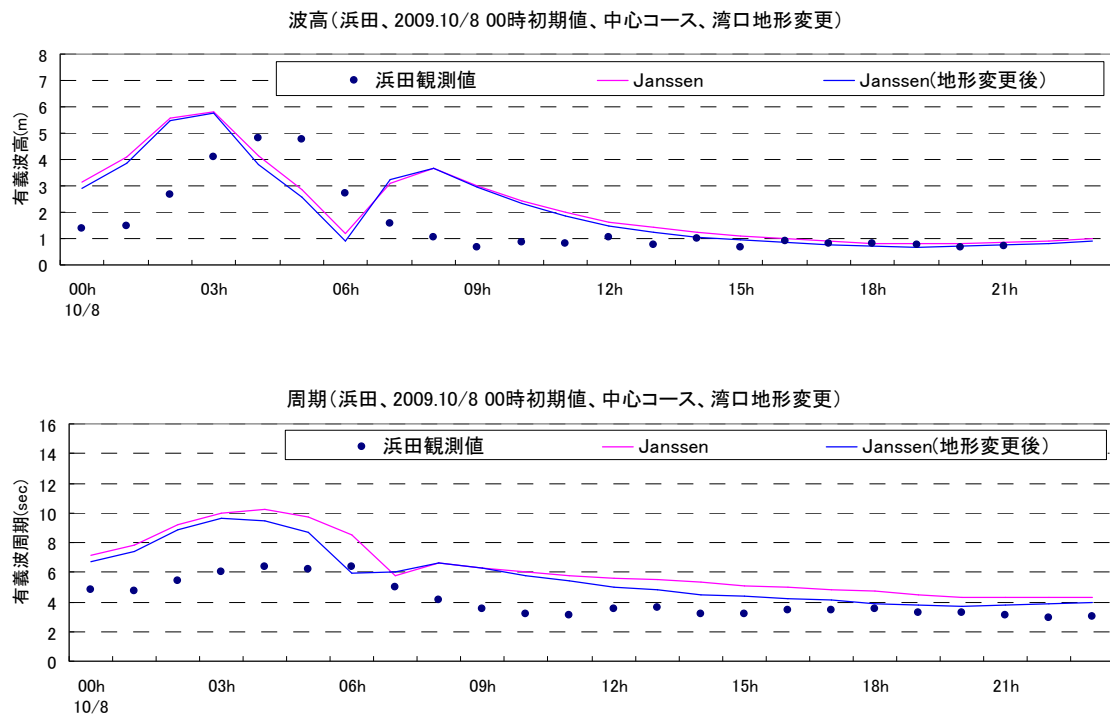


図-5.1.51 湾口地形変更前後の予測結果比較(浜田、10月8日0時初期値、中心コース)

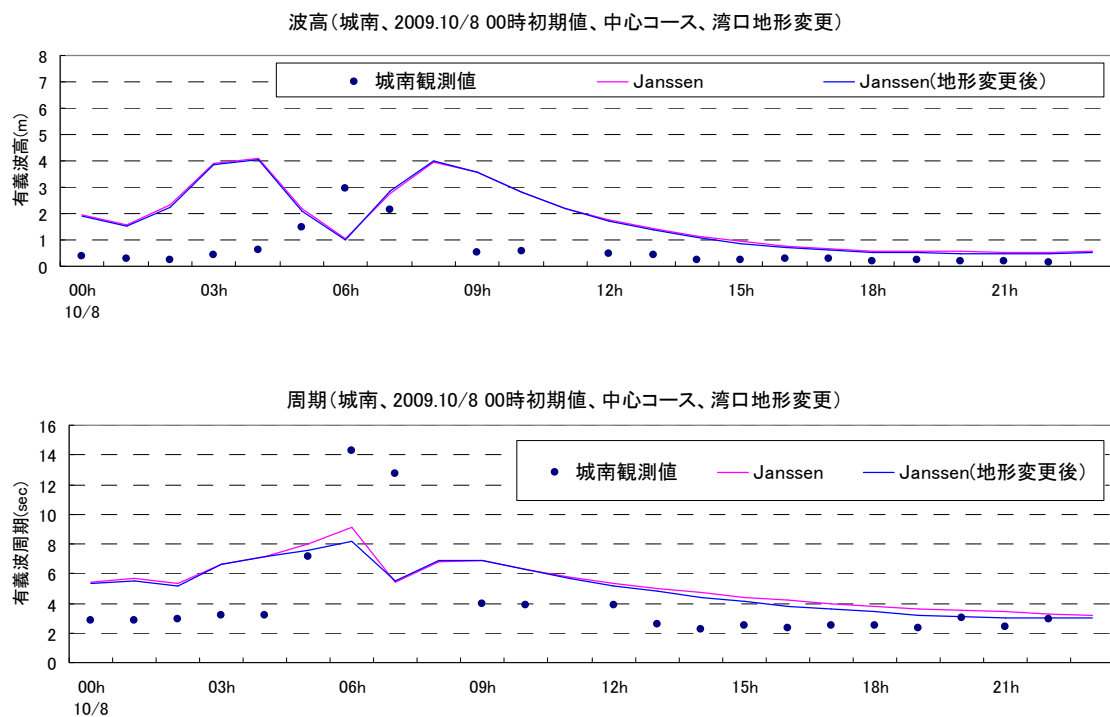


図-5.1.52 湾口地形変更前後の予測結果比較(城南、10月8日0時初期値、中心コース)

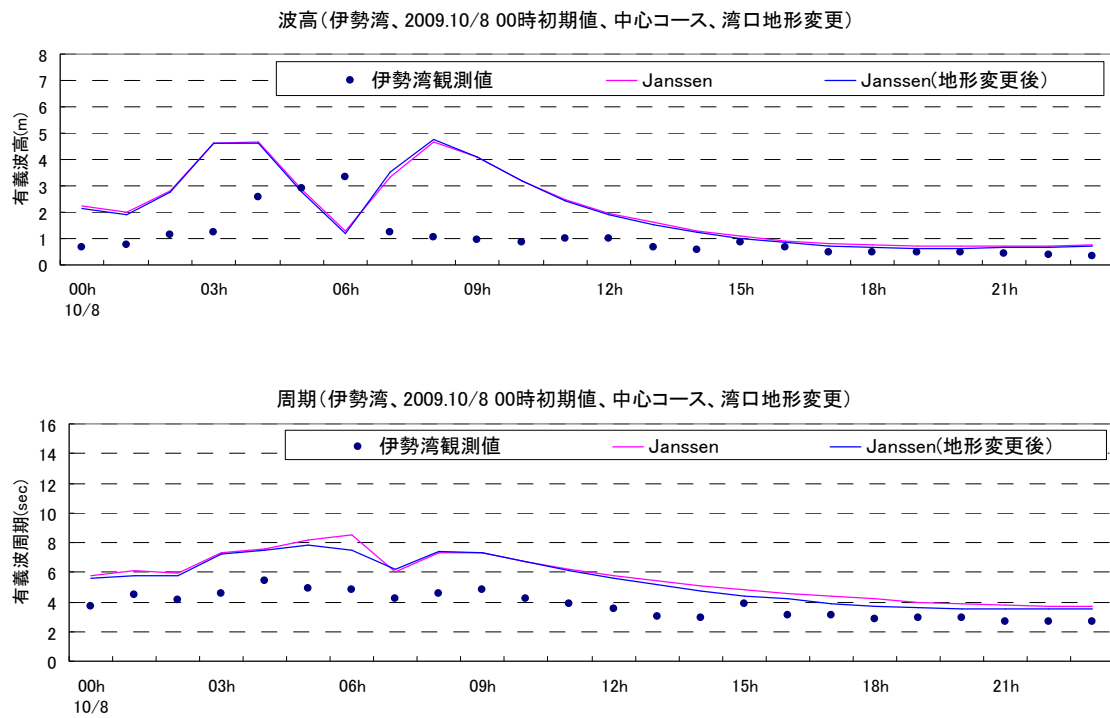


図-5.1.53 湾口地形変更前後の予測結果比較
(伊勢湾、10月8日0時初期値、中心コース)

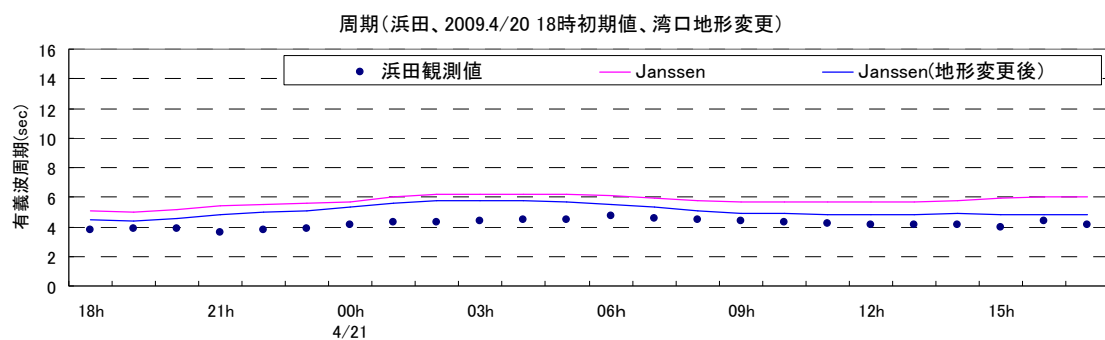
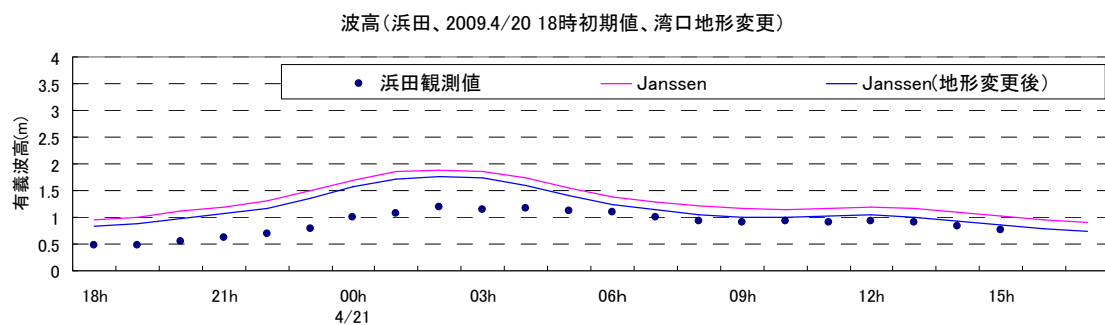


図-5.1.54 湾口地形変更前後の予測結果比較
(浜田、4月20日18時初期値)

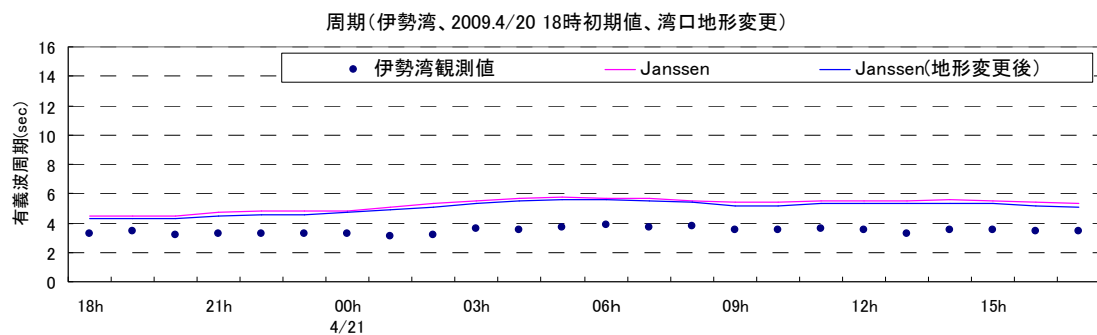
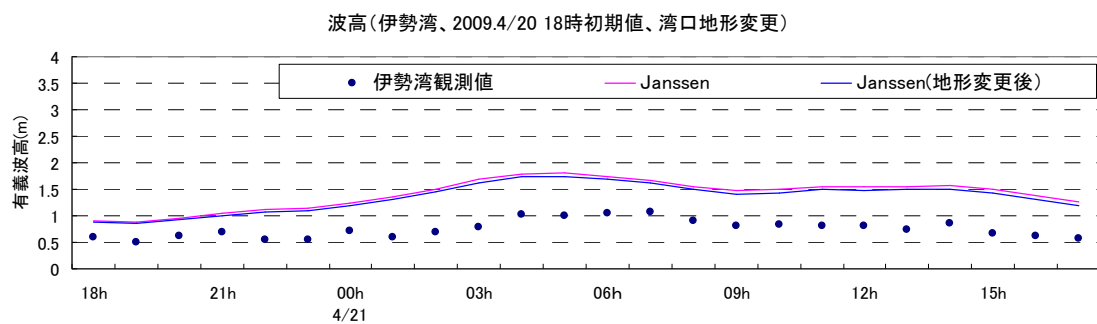


図-5.1.55 湾口地形変更前後の予測結果比較
(伊勢湾、4月20日18時初期値)

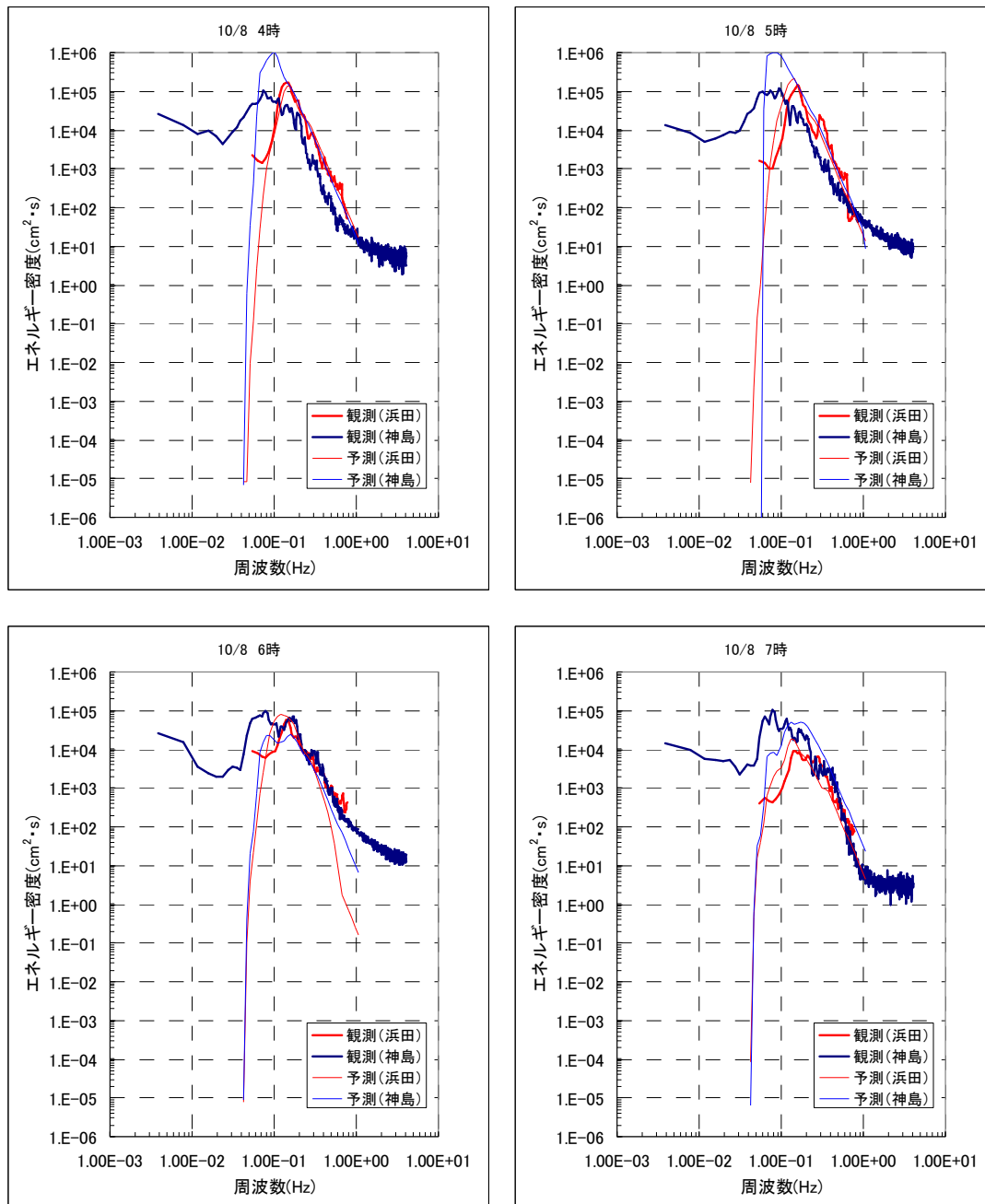


図-5.1.56 観測値と予測値 (Janssen) の周波数スペクトル
(10月8日0時初期値、中心コース、湾口地形変更後)

2) 物理過程モデルの検討

ここでは、表-5.1.10 に示した物理過程のモデルについて、各モデルで計算した結果と観測値の相関解析を行い、波浪うちあげ高予測システムに最も適した方法を検討する。

周期過大予測要因検討の対象事例（表-5.1.8 の 4 ケース）について、相関解析結果を表-5.1.11～表-5.1.16 に示す。Wu の方法は、2009 年台風第 18 号の事例で伊勢湾の地点において（表-5.1.11～表-5.1.13 の上段の表）、波高の最大値の差がマイナスであり、台風時の波高を過小予測している。また、Janssen および Wu の方法は、低波浪時に異常に周期が長くなることがわかっている（図-5.1.43）。そこで、ここでは Janssen および Wu の方法を除き、Mitsuyasu & Honda と Komen の方法について比較検討する。

表-5.1.11～表-5.1.16 によると、伊勢湾、東京湾とも、2009 年台風第 18 号の場合は Komen の方法、低気圧の場合は Mitsuyasu & Honda の方法が良い結果が得られる傾向があることがわかる。台風事例等の高波浪時の精度確保を重視するのであれば、Komen の方法が本システムに最も適すると考えられる。

表-5.1.11 各方法の相関解析結果（伊勢湾：浜田）

浜田(Case01:T0918)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	1.11	0.83	1.07	1.01
	相関係数	0.60	0.71	0.70	0.74
	最大値の差(m)	0.92	-0.68	0.07	-0.01
周期	回帰係数	1.39	1.23	1.20	1.25
	相関係数	0.85	0.68	0.78	0.71
	最大値の差(s)	3.20	2.00	1.70	1.90

浜田(Case02:低気圧)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	1.32	1.09	1.22	1.35
	相関係数	0.88	0.90	0.92	0.90
	最大値の差(m)	0.59	0.11	0.34	0.54
周期	回帰係数	1.15	1.11	1.11	1.11
	相関係数	0.24	-0.22	-0.13	-0.30
	最大値の差(s)	0.20	-0.30	0.70	0.40

*Mitsuyasu&Honda と Komen を比較し精度が高い方を黄色のセルとしている。

表-5.1.12 各方法の相関解析結果（伊勢湾：城南）

城南(Case01:T0918)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	1.36	1.05	1.59	1.34
	相関係数	0.21	0.33	0.53	0.45
	最大値の差(m)	1.10	-0.18	0.92	0.16
周期	回帰係数	1.49	1.35	1.30	1.34
	相関係数	0.69	0.72	0.56	0.66
	最大値の差(s)	8.20	7.40	6.00	6.50

*Mitsuyasu&Honda と Komen を比較し精度が高い方を黄色のセルとしている。

表-5.1.13 各方法の相関解析結果（伊勢湾：伊勢湾）

伊勢湾(Case01:T0918)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	1.54	1.12	1.58	1.39
	相関係数	0.41	0.49	0.56	0.55
	最大値の差(m)	1.40	-0.16	1.60	0.30
周期	回帰係数	1.46	1.31	1.32	1.32
	相関係数	0.94	0.93	0.88	0.91
	最大値の差(s)	7.80	7.10	7.00	6.90

伊勢湾(Case02:低気圧)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	1.76	1.38	1.58	1.76
	相関係数	0.92	0.90	0.90	0.90
	最大値の差(m)	0.69	0.19	0.50	0.65
周期	回帰係数	1.37	1.30	1.30	1.34
	相関係数	0.08	0.22	0.10	-0.04
	最大値の差(s)	0.60	0.00	0.50	0.40

*Mitsuyasu&Honda と Komen を比較し精度が高い方を黄色のセルとしている。

表-5.1.14 各方法の相関解析結果（東京湾：東京灯標）

東京灯標(Case03:T0918)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	2.87	2.02	2.48	2.36
	相関係数	0.71	0.76	0.74	0.76
	最大値の差(m)	3.24	2.18	2.76	2.60
周期	回帰係数	1.77	1.59	1.64	1.71
	相関係数	0.50	0.39	-0.05	0.04
	最大値の差(s)	3.80	3.60	3.80	4.80

東京灯標(Case04:低気圧)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	2.00	1.35	1.68	1.79
	相関係数	0.90	0.93	0.90	0.91
	最大値の差(m)	1.37	0.23	0.78	0.81
周期	回帰係数	1.51	1.33	1.33	1.39
	相関係数	0.88	0.89	0.84	0.86
	最大値の差(s)	2.20	1.00	1.00	1.30

*Mitsuyasu&Honda と Komen を比較し精度が高い方を黄色のセルとしている。

表-5.1.15 各方法の相関解析結果（東京湾：第二海堡）

第二海堡 (Case03:T0918)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	3.29	2.62	3.13	2.92
	相関係数	0.72	0.74	0.75	0.74
	最大値の差(m)	4.86	3.27	4.58	4.08
周期	回帰係数	2.07	2.13	2.03	2.08
	相関係数	0.08	0.22	-0.03	0.06
	最大値の差(s)	4.50	4.50	4.60	4.60

第二海堡 (Case04:低気圧)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	1.82	1.43	1.65	1.71
	相関係数	0.87	0.88	0.87	0.88
	最大値の差	1.46	0.35	0.87	0.94
周期	回帰係数	1.32	1.32	1.26	1.27
	相関係数	0.54	0.52	0.41	0.47
	最大値の差	0.20	0.40	0.00	-0.20

* Mitsuyasu&Honda と Komen を比較し精度が高い方を黄色のセルとしている。

表-5.1.16 各方法の相関解析結果（東京湾：アシカ島）

アシカ島 (Case03:T0918)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	3.29	2.62	3.13	2.92
	相関係数	0.87	0.94	0.91	0.93
	最大値の差(m)	4.88	3.33	4.65	4.25
周期	回帰係数	2.07	2.13	2.03	2.08
	相関係数	0.50	0.53	0.44	0.46
	最大値の差(s)	2.40	2.50	1.90	2.00

アシカ島 (Case04:低気圧)

		Janssen	Wu	Mitsuyasu &Honda	Komen
波高	回帰係数	1.82	1.43	1.65	1.71
	相関係数	0.87	0.93	0.91	0.91
	最大値の差(m)	1.11	0.36	0.69	0.89
周期	回帰係数	1.32	1.32	1.26	1.27
	相関係数	0.93	0.93	0.95	0.95
	最大値の差(s)	-1.10	-1.00	-1.10	-1.20

* Mitsuyasu&Honda と Komen を比較し精度が高い方を黄色のセルとしている。

資料2 潮位・波浪予測の補正方法

うちあげ高予測に用いる潮位予測は、台風接近時には台風予報円の中心を通るコースだけでなく、予報円の周囲4点を通るコースについても対象になっているが、高潮モデルでは考慮されていない異常潮位が発生している間に台風等が接近すると、予測を上回る潮位になる可能性がある。また、沿岸波浪モデルや浅海波浪モデルの解像度では考慮できない沿岸地形の影響により、波向等の条件によっては、うちあげ高予測に用いる波浪予測に誤差が生じる恐れがある。

上記のような潮位・波浪予測の誤差はうちあげ高予測の精度に影響することから、潮位・波浪の観測値を用いて高潮モデルで得られた潮位予測、沿岸波浪モデルや浅海波浪モデルで得られた波浪予測を補正する方法を検討した。

なお、潮位補正については、高潮ガイダンスの活用により、異常潮位等の補正がなされていることから、現在のうちあげ高予測システムでは、補正を実施していない。

1. 潮位・波浪予測の補正方法の検討

潮位・波浪予測の補正方法として、カルマンフィルタ、回帰分析、最適内挿法の3つの方法を検討した。対象海岸と使用する観測地点を表-5.2.1、図-5.2.1に示す。

表-5.2.1 対象海岸と観測所

対象海岸	波浪観測所	潮位観測所
下新川海岸	<u>田中</u> 、 <u>石田</u> 、 関屋、弾崎	<u>生地</u>
富士海岸	<u>富士田子の浦</u> 、竜洋	<u>田子の浦港</u>
駿河海岸	久能、 <u>駿河海洋（沖）</u>	<u>焼津</u> (国土地理院)
伊勢湾西南海岸	<u>浜田</u>	<u>津松阪港</u>

*検証対象地点は、下線ありの観測地点。

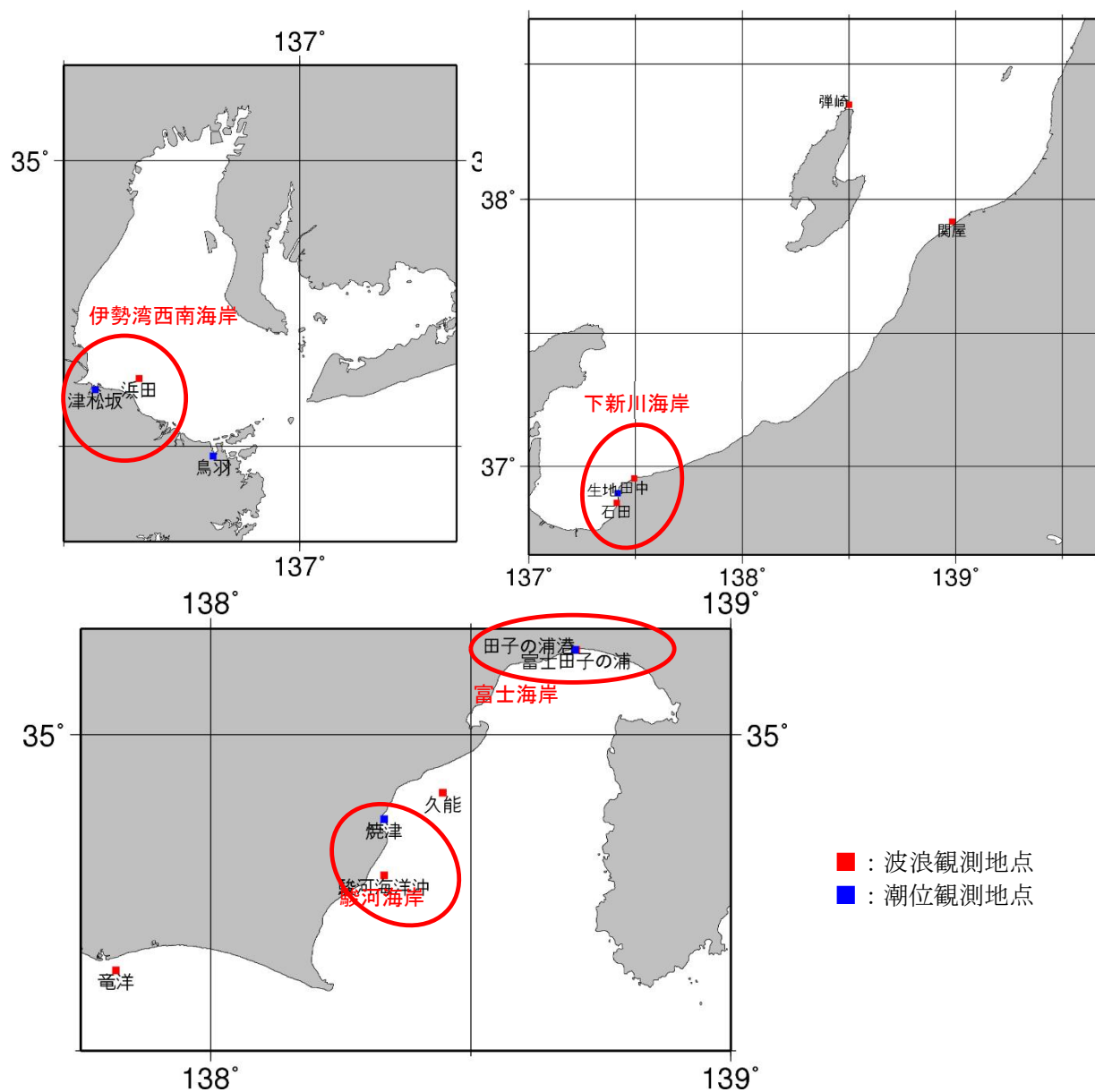


図-5.2.1 対象海岸と観測地点

以下では、各方法の概要を示す。

(1) カルマンフィルタ

1) 概要

時刻 t での目的変数を $Y(t)$, 説明変数を $X_i(t)$ として、以下の線形方程式を考える。

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) X_i(t) + C_0(t) \quad (5.2.1)$$

$C_i(t)$: 時刻 t の係数

$Y(t)$: 目的変数 (補正後の予測値)

$X_i(t)$: 説明変数 (補正前の予測値)

本業務では、例えば波高予測値は波高観測値のみを用いて補正するなど、多要素の説明変数を用いた解析は行わないことから $i=1$ である。

時刻 t の係数 $C_i(t)$ を、 $t-1$ 時刻の係数である $C_i(t-1)$ を用いてカルマン方程式により推定し予測値を補正する。係数は観測値を取得するたびに逐次更新する。
カルマン方程式は、以下の式で表される。

$$C_i(t) = C_i(t-1) + \delta_t (O_i(t) - X_i(t)) \quad (5.2.2)$$

ここで、 $O_i(t)$ は観測値、 δ_t はカルマンゲインと呼ばれるパラメータである。カルマンゲインは $C_i(t)$ の修正量を決めるものであり、以下の式で表される。

$$\delta_t = \frac{X_i(t)(U_{t-1} + Q_{t-1})}{X_i(t)^2(U_{t-1} + Q_{t-1}) + D_t} \quad (5.2.3)$$

Q_t : 係数の誤差の分散

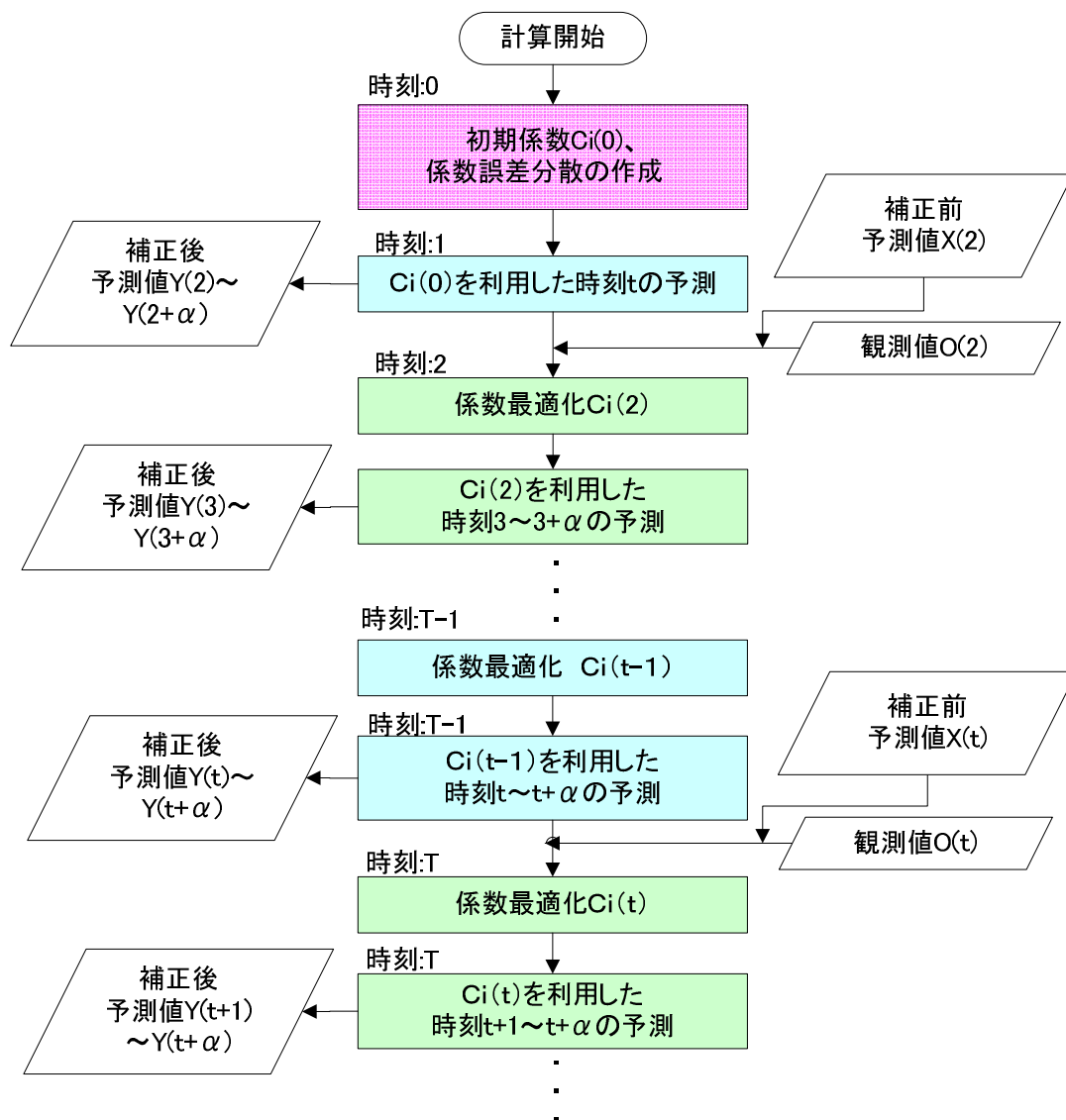
D_t : 観測誤差の分散

U_t : システム誤差の分散

2) 処理の流れ

図-5.2.2 にカルマンフィルタの逐次更新の概略を示す。

初期係数や初期係数誤差分散は、計算開始時に 0 を与える。このため、計算開始時は計算が不安定となるが計算を繰り返していくうちに適切な係数に近づいていく。



(2) 回帰分析

1) 概要

回帰分析により得られた回帰係数を補正係数として予測値を補正する方法である。

補正係数 a 、 b は、2年分の予測値と観測値を用いて以下の一次回帰式を作成することにより求める。

【波浪】

$$Y = aX \quad (5.2.4)$$

【潮位】

$$Y = aX + b \quad (5.2.5)$$

ここで、 X は観測値、 Y は予測値である。

波浪の予測特性は、波向や波高階級により異なることが想定されるため、波高、周期については波向別、波高階級別の補正式を作成する。

2) 処理の流れ

処理の流れを図-5.2.3に示す。

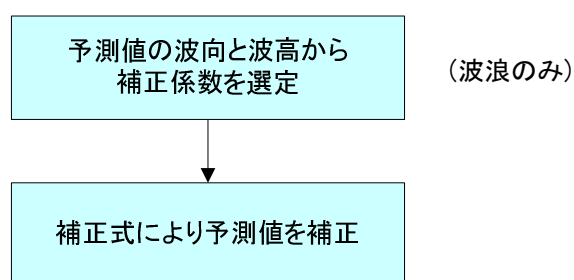


図-5.2.3 回帰分析の処理の流れ

3) 補正係数

作成した回帰式のうち有意と判断された回帰式の係数のみを補正係数として使用した。有意性の判断には有意確率 p 値¹を用いた（有意水準5%）。作成した補正係数を表-5.2.2、表-5.2.3に、および図-5.2.4～6に示す。

¹ p 値（有意確率）

t 分布を用いた無相関検定により算出される値であり、無相関（相関係数が0）である確率を示す。 p 値が有意水準より小さい場合に有意とみなす。

表-5.2.2 波高・周期の補正係数 a

波向	田中				石田			久能			駿河海洋(沖)			富士田子の浦			浜田		
	全波高	1m未満	1m以上 2m未満	2m以上	全波高	1m未満	1m以上	全波高	2m未満	2m以上	全波高	2m未満	2m以上	全波高	2m未満	2m以上	全波高	1m未満	1m以上
0	0.82	0.74	0.86	—	0.61	0.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.97	0.97	—
10	0.82	0.78	0.89	0.66	0.61	0.61	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00	1.11	0.82
20	0.78	0.73	0.89	0.75	0.45	0.43	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.26	1.26	—
30	0.78	0.75	0.85	—	0.45	0.45	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.26	1.25	—
40	0.76	0.75	—	—	0.51	0.51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.33	1.31	—
50	0.80	0.78	—	—	0.53	0.53	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.30	1.27	—
60	0.62	0.62	—	—	0.51	0.51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.43	1.39	—
70	0.60	0.60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.35	1.31	1.73
80	0.59	0.59	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.17	0.17	—	1.35	1.33	1.57
90	0.44	0.44	—	—	0.59	0.59	—	—	—	—	—	—	—	0.20	0.20	—	1.36	1.44	1.31
100	0.44	0.44	—	—	0.40	0.40	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.25	—	1.64	1.57	1.70
110	0.40	0.40	—	—	—	—	—	0.36	0.36	—	0.59	0.59	—	0.30	0.30	—	1.38	1.39	—
120	—	—	—	—	0.44	0.44	—	0.32	0.32	—	0.72	0.72	—	0.32	0.32	—	1.14	1.14	—
130	—	—	—	—	0.43	0.43	—	—	—	—	0.84	0.84	—	0.42	0.42	—	1.14	1.14	—
140	0.63	0.63	—	—	0.90	0.90	—	0.66	0.66	—	0.94	0.94	1.01	0.45	0.45	—	—	—	—
150	0.40	0.40	—	—	—	—	—	0.75	0.75	—	0.92	0.92	0.97	—	—	—	—	—	—
160	0.42	0.42	—	—	0.91	0.91	—	0.83	0.83	—	0.93	0.92	0.97	0.48	0.48	—	—	—	—
170	0.55	0.55	—	—	1.01	1.01	—	0.88	0.88	—	0.94	0.94	—	—	—	—	—	—	—
180	0.79	0.79	—	—	0.61	0.61	—	0.92	0.85	1.34	0.99	0.95	1.25	0.54	0.54	—	—	—	—
190	0.72	0.72	—	—	0.52	0.52	—	0.88	0.85	0.97	0.95	0.94	0.99	0.71	0.71	—	—	—	—
200	0.63	0.63	—	—	0.62	0.62	—	0.94	0.89	1.04	0.95	0.83	1.19	0.75	0.75	—	—	—	—
210	0.72	0.72	—	—	0.66	0.66	—	0.76	0.76	—	0.72	0.72	—	0.71	0.69	0.90	—	—	—
220	0.70	0.70	—	—	0.79	0.79	—	0.54	0.54	—	0.76	0.76	—	0.63	0.59	0.99	—	—	—
230	0.73	0.73	—	—	0.73	0.72	—	—	—	—	0.61	0.61	—	0.32	0.32	—	1.06	1.06	—
240	0.74	0.74	—	—	0.81	0.77	—	—	—	—	—	—	—	0.25	0.25	—	—	—	—
250	0.73	0.71	—	—	0.85	0.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260	0.78	0.76	—	—	0.84	0.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
270	0.81	0.79	—	—	0.80	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	0.90	0.82	1.05	—	0.87	0.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
290	0.89	0.85	0.92	—	0.88	0.86	0.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.64	0.64	—
300	0.86	0.78	0.93	—	0.88	0.89	0.88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.53	0.53	—
310	0.80	0.84	0.78	—	0.85	0.80	0.90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.60	0.60	—
320	0.84	0.82	0.86	—	0.81	0.78	0.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.69	0.69	—
330	0.78	0.81	0.78	—	0.80	0.77	0.89	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.76	0.76	—
340	0.75	0.73	0.79	—	0.75	0.73	0.78	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.74	0.74	—
350	0.74	0.74	0.73	—	0.72	0.69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.82	0.82	—
全波向	0.80	0.75	0.86	0.74	0.65	0.62	0.85	0.86	0.82	1.08	0.90	0.88	1.06	0.68	0.66	0.96	1.07	1.00	1.47

波向	田中				石田			久能			駿河海洋(沖)			富士田子の浦			浜田		
	全波高	1m未満	1m以上 2m未満	2m以上	全波高	1m未満	1m以上	全波高	2m未満	2m以上	全波高	2m未満	2m以上	全波高	2m未満	2m以上	全波高	1m未満	1m以上
0	0.96	0.86	1.09	1.07	1.07	1.07	1.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	1.01	0.97	1.10	1.01	1.19	1.19	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.19
20	0.99	0.94	1.17	1.04	1.14	1.14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
30	0.91	0.88	1.11	—	0.99	0.99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40	0.86	0.85	1.04	—	0.86	0.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	0.92	0.91	1.06	—	0.80	0.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	0.81	0.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.77
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.80	1.85	1.35
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.40	1.43	1.29
110	—	—	—	—	0.72	0.72	—	—	—	—	1.42	1.42	—	—	—	—	1.34	1.35	—
120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.27	1.27	—
130	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.49	1.49	1.36	—	—	—	—	—	—
140	0.80	0.80	—	—	—	—	—	0.98	0.98	—	1.44	1.44	1.37	—	—	—	—	—	—
150	0.70	0.70	—	—	0.84	0.84	—	1.28	1.28	—	1.31	1.31	—	—	—	—	—	—	—
160	—	—	—	—	—	—	—	1.32	1.32	—	1.27	1.28	—	—	—	—	—	—	—
170	—	—	—	—	—	—	—	1.24	1.24	—	1.25	1.25	1.19	—	—	—	—	—	—
180	0.72	0.72	—	—	—	—	—	1.19	1.18	1.20	1.16	1.15	1.21	—	—	—	—	—	—
190	0.64	0.64	—	—	0.82	0.82	—	1.18	1.18	1.11	1.12	1.12	1.10	0.50	0.50	—	—	—	—
200	0.69	0.69	—	—	0.85	0.85	—	1.14	1.14	1.13	1.05	1.03	1.20	0.84	0.84	—	—	—	—
210	0.77	0.77	—	—	—	—	—	1.09	1.09	—	1.00	1.00	—	0.94	0.94	1.12	—	—	—
220	0.73	0.73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.87	0.87	1.32	—	—	—
230	0.71	0.71	—	—	0.79	0.79	—	—	—	—	0.73	0.73	—	0.44	0.44	—	—	—	—
240	0.71	0.71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250	0.78	0.77	—	—	0.86	0.85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
260	0.76	0.76	—	—	0.85	0.84	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
270	0.76	0.75	—	—	0.87	0.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
280	0.72	0.71	—	—	0.89	0.88	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.64	0.64	—
290	0.70	0.68	—	—	0.83	0.82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.71	0.71	—
300	0.67	0.66	0.70	—	0.83	0.82	0.94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.78	0.78	—
310	0.62	0.64	—	—	0.84	0.85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.85	0.85	—
320	0.63	0.63	—	—	0.81	0.80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.92	0.92	—
330	0.70	0.67	0.80	—	0.83	0.81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.97	0.97	—
340	0.79	0.72	—	—	0.86	0.84	1.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00	—	—
350	0.86	0.77	1.04	—	0.94	0.91	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.10	—	—
全波向	0.92	0.86	1.07	1.03	1.07	1.07	1.10	1.19	1.19	1.15	1.32	1.32	1.19	0.81	0.80	1.19	1.43	1.44	1.33

* 上段：波高、下段：周期。波向は北を0度として時計回り。

表-5.2.3 潮位の補正係数 a、b

	傾き(a)	切片(b)	相関係数
津松坂	0.97	-6.00	0.97
生地	0.79	-16.77	0.87
焼津	0.92	-15.00	0.91
田子の浦港	0.91	-13.57	0.94

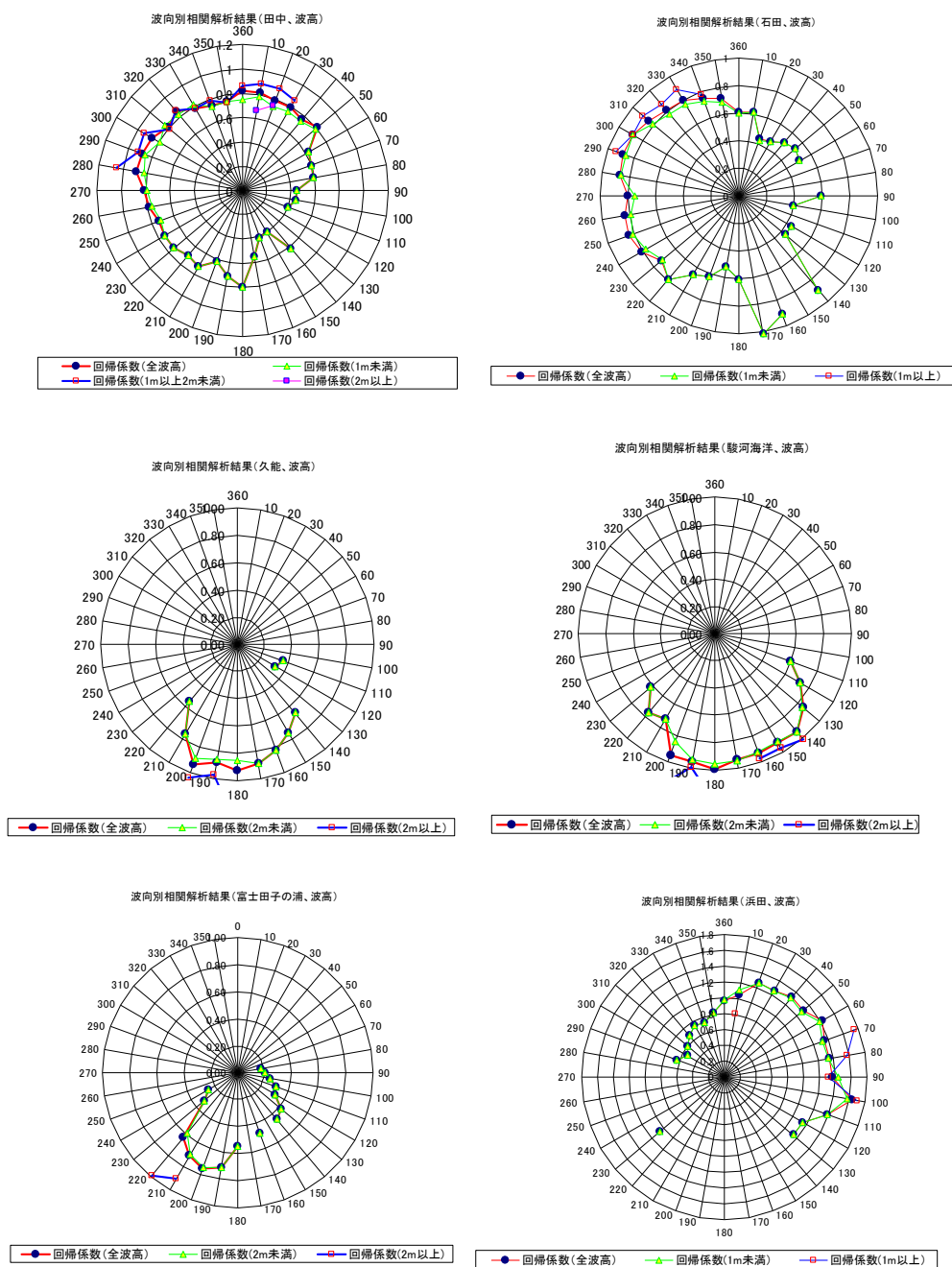


図-5.2.4 補正係数 a (波高)

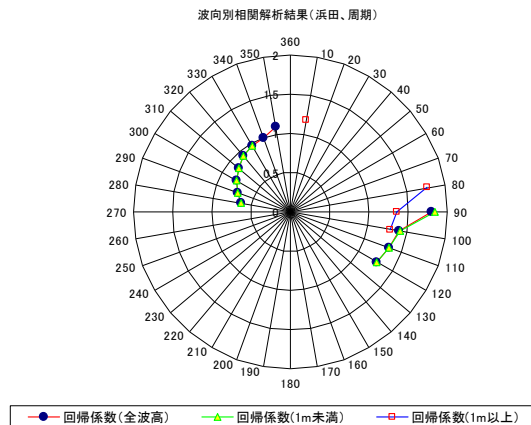
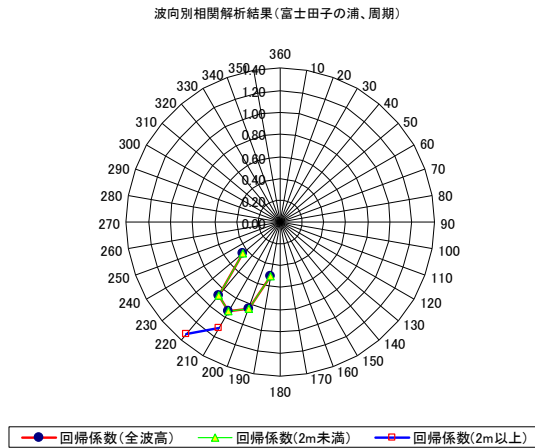
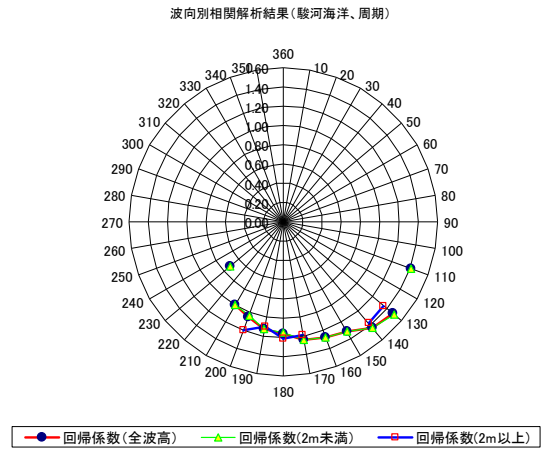
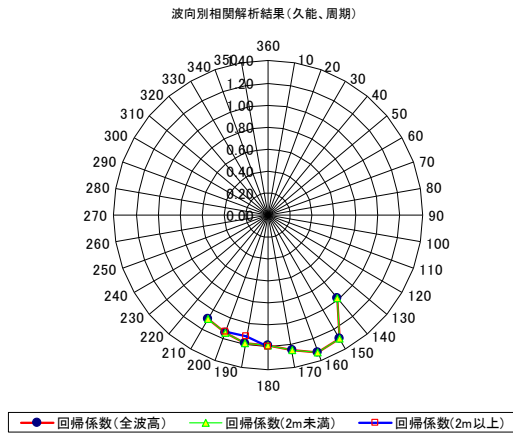
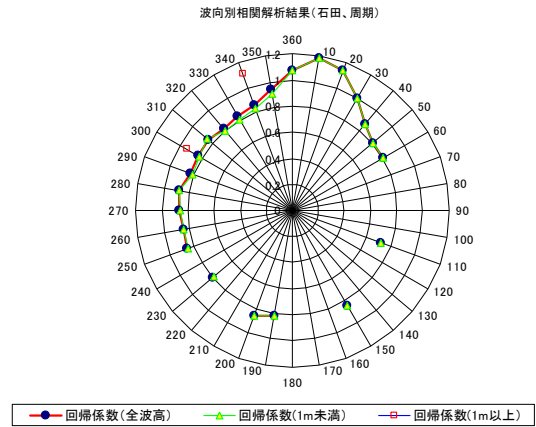
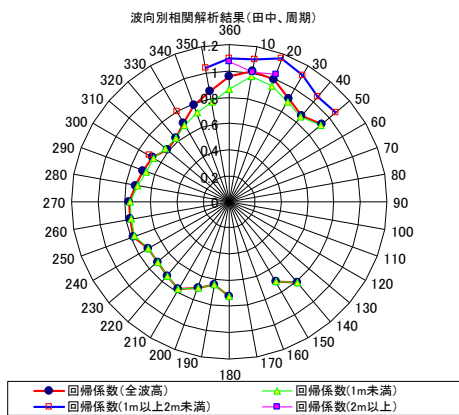


図-5.2.5 補正係数 b (周期)

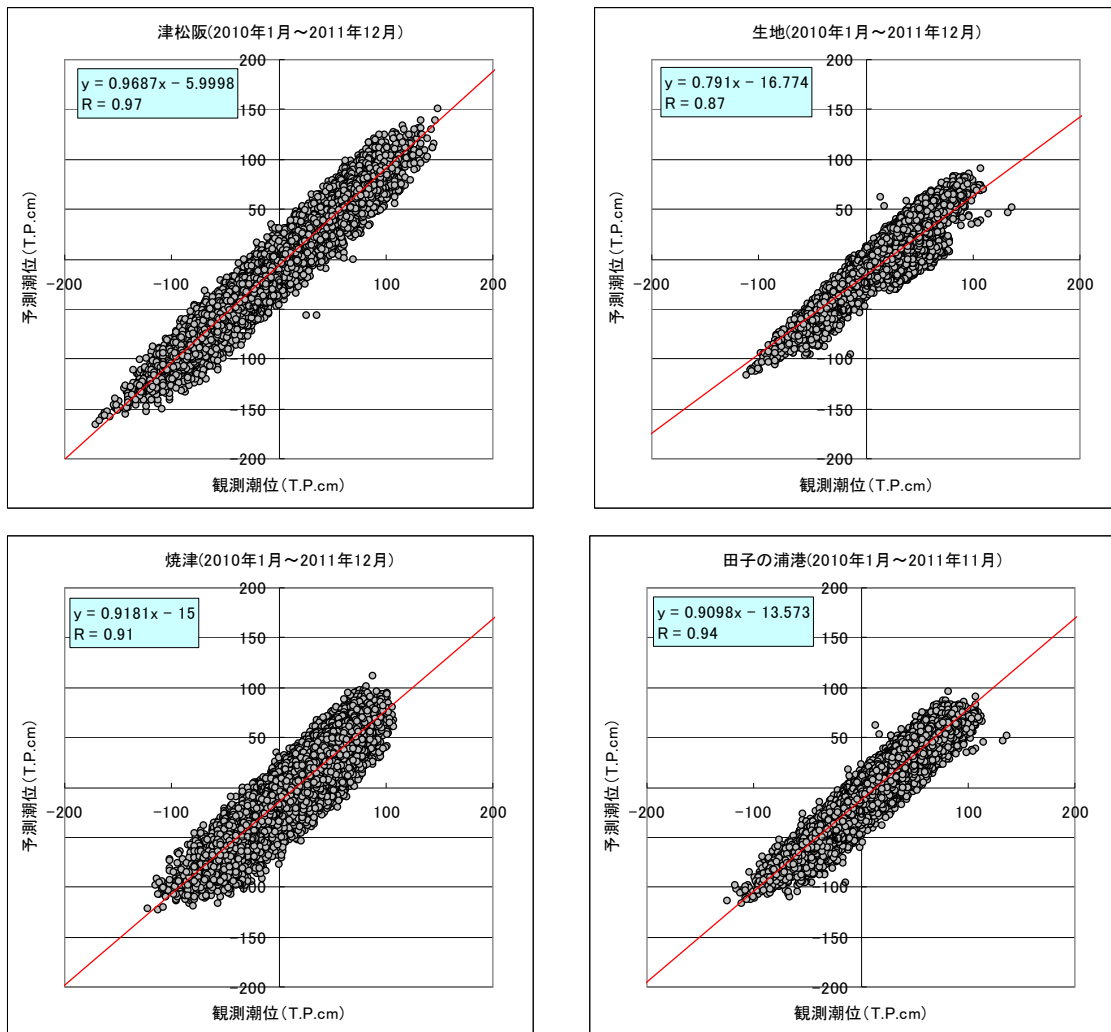


図-5.2.6 予測値と観測値の散布図（潮位）

(3) 最適内挿法

1) 概要

最適内挿法は、事前に統計的に求めた予報誤差の空間構造を用いて重み付き平均を行い、最適な予測値を求める方法である。以下の式により補正後予測値を求める。

$$F_g^I = F_g^P + \sum_{i=1}^N w_i (F_i^O - F_i^P) \frac{\sigma_g^P}{\sigma_i^P} \quad (5.2.6)$$

F_g^I は格子点における実況推定値（補正後予測値）、 F_g^P は格子点における初期推定値（予測値）、 F_i^O は観測地点 i における波浪実況値、 F_i^P は観測地点 i における波浪予測値、 w_i は各観測データの内挿の重みである。 $F_g^I - F_g^P$ を解析インクリメント、 $F_i^O - F_i^P$ (=D 値) を観測インクリメントという。なお、計算の安定上、インクリメントを予測誤差標準偏差 σ^P で規格化する。

w_i は次式により求めることができる。

$$\sum_{j=1}^N (\mu_{ij}^P + \mu_{ij}^O \lambda_i \lambda_j) w_j = \mu_{ig}^P \quad (5.2.7)$$

式(5.2.7)は、 N 個（観測値点数）のデータから N 個の内挿の重み w_j を求める N 次元連立方程式である。ここで、 μ_{ij}^P 、 μ_{ij}^O は予測誤差相関係数、観測誤差相関係数で、 λ は誤差比 (=観測誤差標準偏差/予測誤差標準偏差) で、これらは既知である。一方、 μ_{ig}^P は未知であるため、以下に示すローレンツモデルを拡張したモデルにより近似する。

$$\mu_{ig}^P = \frac{a}{1 + br_{ig}^2} \times c^{\Delta T_{ig}} \quad (5.2.8)$$

r_{ig} は 2 点 i 、 g 間の距離(km)である。また、 b は誤差相関の及ぶ距離(相関距離)を決定する量で、 $r_{ig} = \sqrt{1/b}$ で共分散が半分になる。 a は予測誤差分散、 c は時間差 ΔT_{ig} に関する予測誤差共分散を表すパラメータである。図-5.2.7 に最適内挿法のイメージ図を示す。

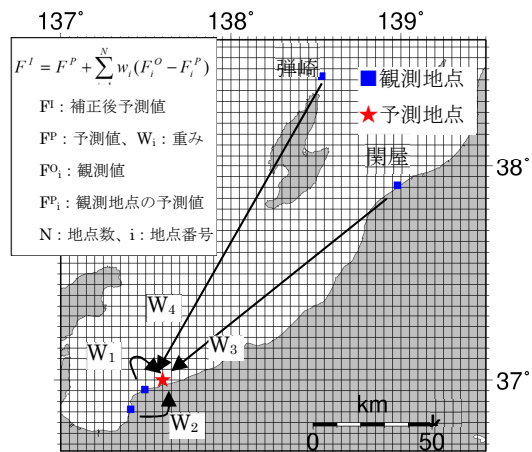
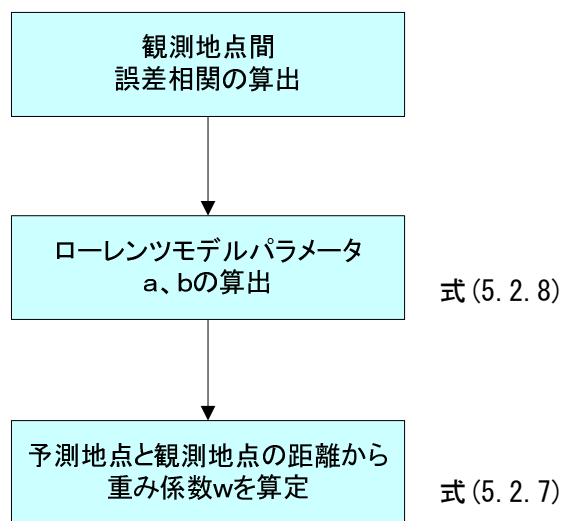


図-5.2.7 最適内挿法のイメージ図

2) 処理の流れ

処理の流れを図-5.2.8 に示す。

【事前準備】



【予測時】

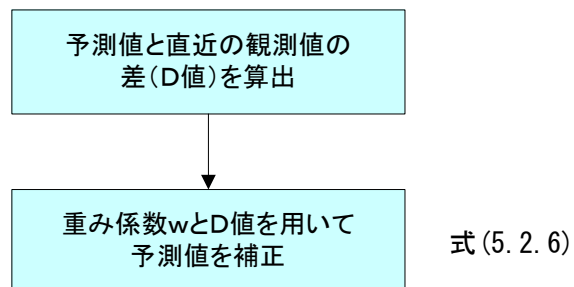


図-5.2.8 最適内挿法の処理の流れ

3) 誤差相関解析結果

下新川海岸は 2010 年、駿河・富士海岸は 2009 年のデータを用いて、誤差相関解析を行った。その結果を表-5.2.4、表-5.2.5、図-5.2.9～12 に示す。下新川海岸の波高、周期、駿河・富士海岸の波高については相関が認められるが、駿河・富士海岸の周期については、ほとんど相関がみられない。

表-5.2.4 下新川海岸の誤差相関解析結果

	関 屋	弾 崎	田 中	石 田
関 屋		●H01 N = 7507 R = 0.32 A = 0.43 BIAS=-0.58 RMSE= 3.88	●H02 N = 8038 R = 0.28 A = 0.40 BIAS=-0.35 RMSE= 5.24	●H03 N = 7969 R = 0.13 A = 0.24 BIAS= 0.02 RMSE= 6.73
弾 崎	●T01 N = 7496 R = 0.54 A = 0.49 BIAS=-0.33 RMSE= 5.25		●H04 N = 7732 R = 0.15 A = 0.10 BIAS=-0.68 RMSE= 8.52	●H05 N = 7669 R = 0.06 A = 0.04 BIAS=-0.33 RMSE= 9.67
田 中	●T02 N = 8239 R = 0.52 A = 0.59 BIAS=-0.14 RMSE= 3.11	●T04 N = 7759 R = 0.28 A = 0.45 BIAS=-0.43 RMSE= 2.68		●H06 N = 8202 R = 0.59 A = 0.56 BIAS= 0.15 RMSE= 4.60
石 田	●T03 N = 8289 R = 0.51 A = 0.52 BIAS= 0.04 RMSE= 2.81	●T05 N = 7801 R = 0.33 A = 0.43 BIAS=-0.50 RMSE= 2.46	●T06 N = 8562 R = 0.77 A = 0.80 BIAS= 0.12 RMSE= 2.12	

* 右上部分が波高の相関、左下部分が周期の相関である。

表-5.2.5 駿河・富士海岸の誤差相関解析結果

	久 能	駿河海洋	富士田子の浦	竜 洋
久 能		●H01 N = 6843 R = 0.82 A = 0.69 BIAS=-0.17 RMSE= 3.93	●H02 N = 4780 R = 0.58 A = 0.55 BIAS=-0.41 RMSE= 5.51	●H03 N = 6447 R = 0.65 A = 0.71 BIAS=-0.51 RMSE= 4.20
駿河海洋	●T01 N = 6970 R = 0.50 A = 0.68 BIAS=-0.28 RMSE= 2.06		●H04 N = 4301 R = 0.43 A = 0.35 BIAS=-0.78 RMSE= 6.30	●H05 N = 6423 R = 0.67 A = 0.92 BIAS=-0.42 RMSE= 3.35
富士田子の浦	●T02 N = 4952 R = 0.02 A = -0.15 BIAS=-0.99 RMSE= 4.52	●T04 N = 4478 R = -0.14 A = -0.30 BIAS=-1.45 RMSE= 5.93		●H06 N = 4813 R = 0.42 A = 0.28 BIAS=-0.82 RMSE= 4.06
竜 洋	●T03 N = 6565 R = 0.05 A = 0.48 BIAS=-0.23 RMSE= 2.90	●T05 N = 6536 R = 0.52 A = 0.78 BIAS=-0.01 RMSE= 3.49	●T06 N = 4960 R = -0.29 A = -0.51 BIAS=-1.08 RMSE= 3.67	

* 右上部分が波高の相関、左下部分が周期の相関である。

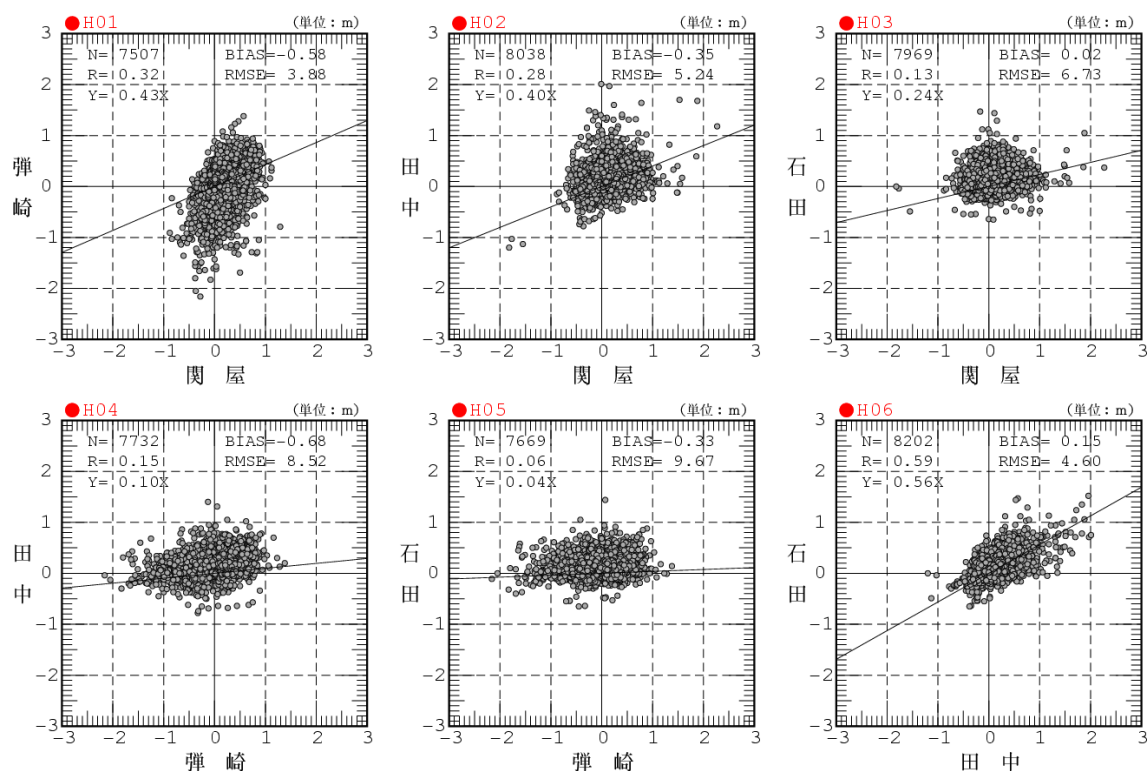


図-5.2.9 下新川海岸の誤差相関解析結果 (2010 年、波高)

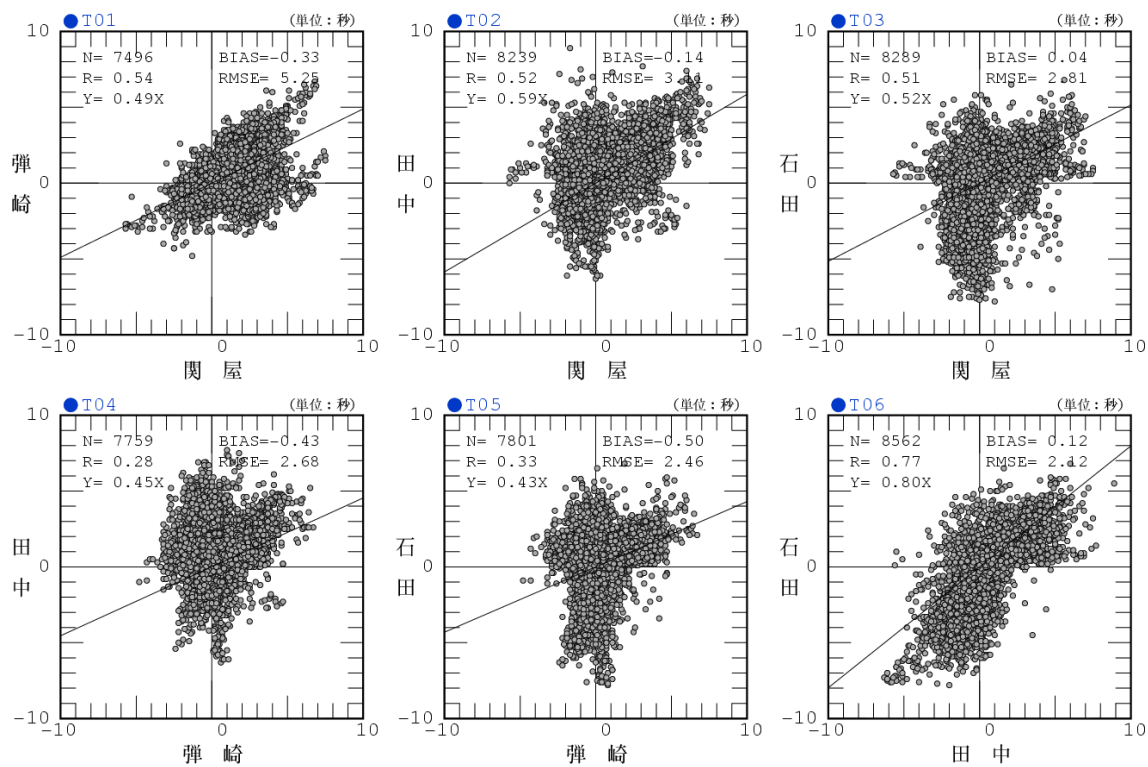


図-5.2.10 下新川海岸の誤差相関解析結果 (2010 年、周期)

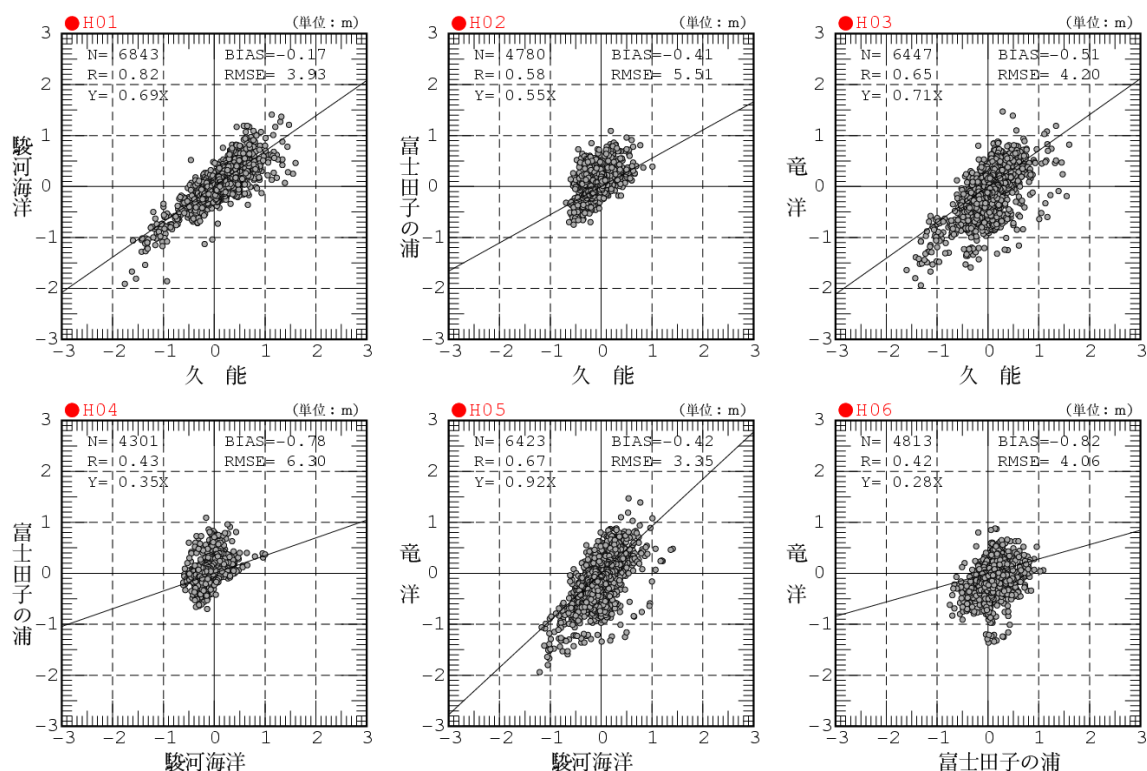


図-5.2.11 駿河・富士海岸の誤差相関解析結果 (2009 年、波高)

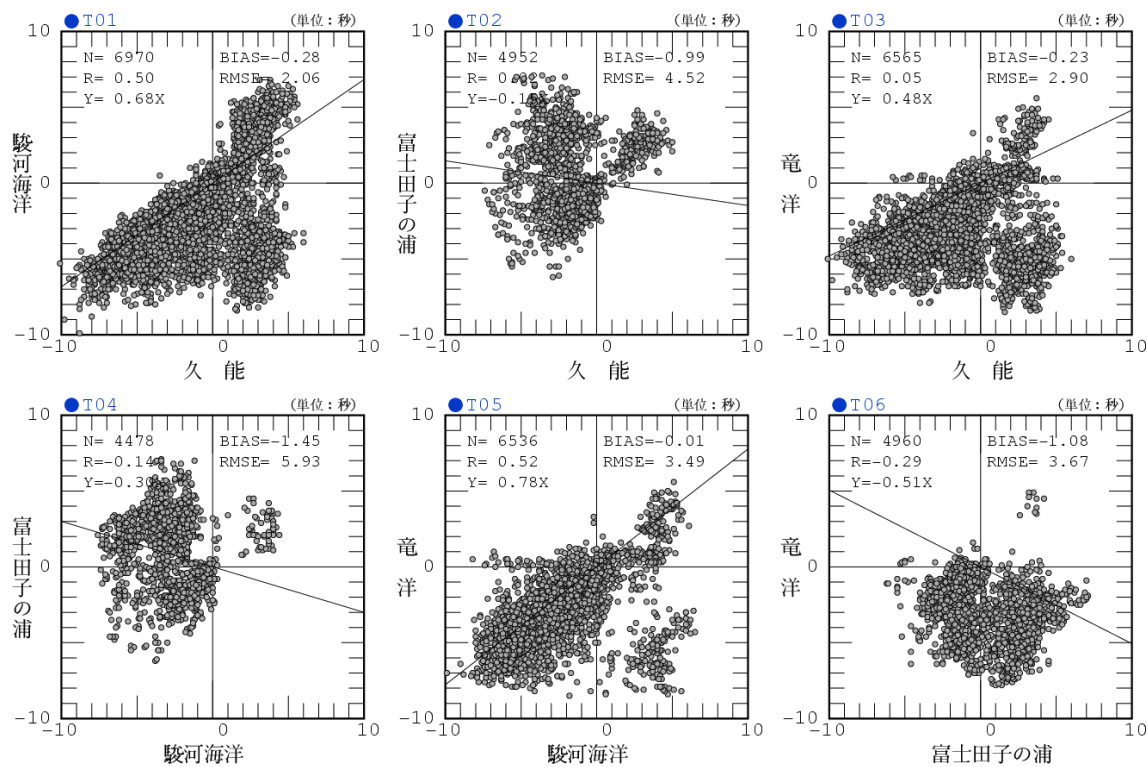


図-5.2.12 駿河・富士海岸の誤差相関解析結果 (2009 年、周期)

4) ローレンツモデルパラメータの算出

「3) 誤差相関解析結果」で求めた誤差相関係数と距離の関係からローレンツモデルパラメータ a 、 b を求めた。誤差相関係数と距離の関係を図-5.2.13 と図-5.2.14 に示す。ローレンツパラメータのうち、係数 c は時間に対する補正率を決めるパラメータである。ここでは、他の補正方法と同様に全予測時間に同じ補正効果を与え、 $c=1.0$ とする。

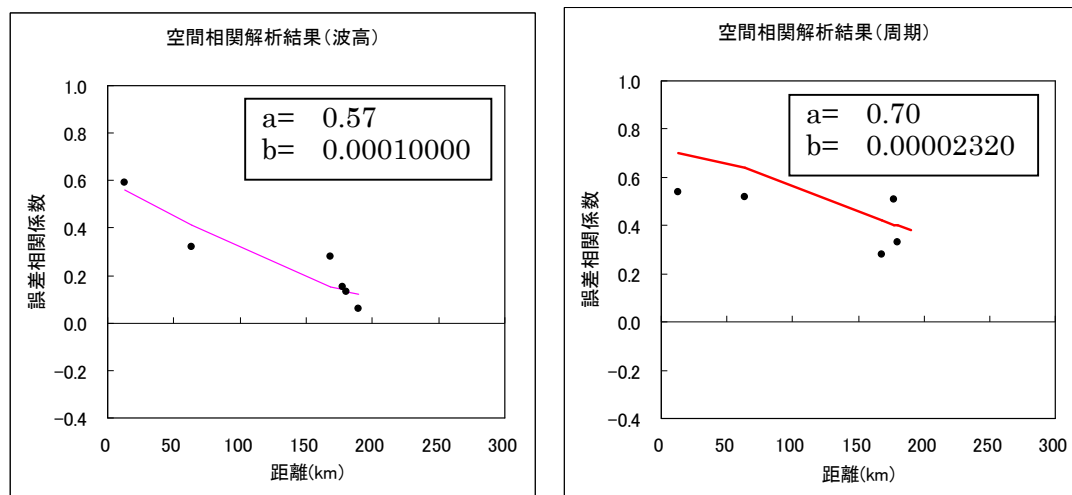


図-5.2.13 下新川海岸の空間相関解析結果 (2010 年)

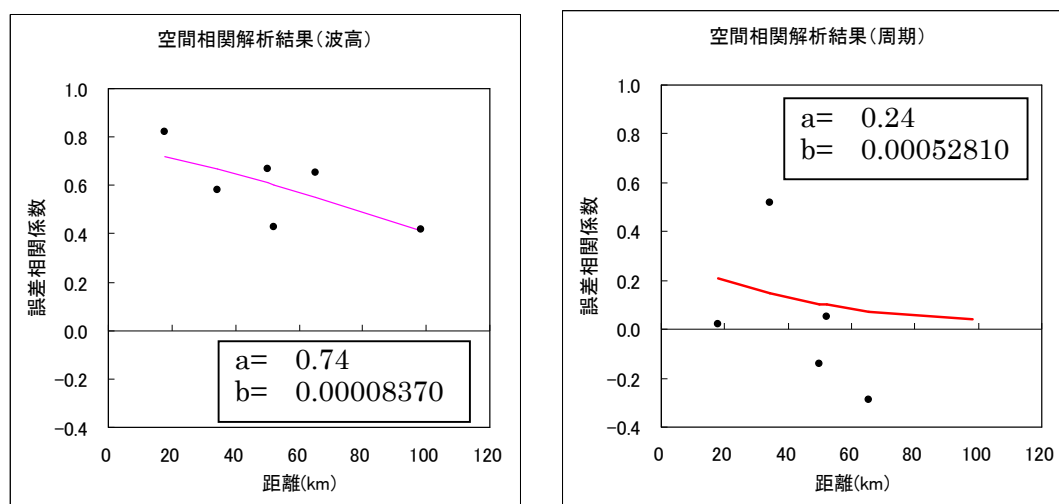


図-5.2.14 駿河・富士海岸の空間相関解析結果 (2009 年)

2. 波浪予測の補正の効果検証

検討対象海岸について、2年間の通年計算を行った。対象期間は、欠測や高波浪出現状況を考慮して、以下の通りとした。

下新川海岸：2008年、2010年

富士海岸、駿河海岸、伊勢湾西南海岸：2009年、2010年

(1) 計算精度

通年計算の各予測結果について、補正前と補正後の統計値（回帰係数、RMSE(二乗平均誤差)、BIAS(平均誤差)、ピーク差)を時系列図にとりまとめた。各海岸の一例を図-5.2.15～18に示す。

1) 下新川海岸（田中）

【波高】

波高が1.0m以上の場合は、いずれの方法も補正効果が認められる。カルマンフィルタでは、0.5m以下の低波高時に過剰補正の傾向がみられる。

【周期】

いずれの手法も同程度の補正効果が認められる。回帰分析では過剰補正、最適内挿法では逆補正が一部にみられる。

2) 駿河海岸（駿河海洋(沖)）

【波高】

カルマンフィルタと最適内挿法は僅かながら補正効果がみられるが、回帰分析は逆に補正後の誤差が大きくなっている。

【周期】

補正前の誤差が大きな期間であるが、カルマンフィルタは補正効果が大きく補正後BIASや補正後RMSEは大幅に小さくなっている。回帰分析でもカルマンフィルタよりは小さいものの補正効果が認められる。最適内挿法については、図-5.2.14に示したように駿河・富士海岸での周期の誤差相関はほとんどないため、補正効果は認められない。

3) 富士海岸（富士田子の浦）

【波高】

いずれの手法も補正効果が認められる。回帰分析では、一部に過剰補正がみられる。

【周期】

いずれの手法も補正効果が認められず、カルマンフィルタや回帰分析では過剰補正や逆補正がみられる。特に回帰分析では、波高2m未満ではすべて補正係数が1.0未満であるため、補正は常に周期を長くする方向に働く。予測がすでに過大である場合でも、さらに過大にする方向に補正している。

4)伊勢湾西南海岸（浜田）

【波高】

回帰分析では、おおむね補正効果が認められる。カルマンフィルタでは、波高が高い時に逆補正となる傾向がみられる。高波浪の前に過大予測が続いた場合、カルマンフィルタの係数は波高を低くする方向に補正が働くように設定されており、高波浪となって急激に過小予測に転じた場合に、係数の変化が追従できていないものと考えられる。

【周期】

カルマンフィルタでは、波高が高いときに過剰に補正する傾向がみられる。回帰分析では、おおむね補正効果が認められるが、一部過剰補正がみられる。

（２）安定性

どの手法においても異常な統計値はみられず、安定性に問題は認められなかった。カルマンフィルタは、計算開始時に誤差が大きい地点もみられるが、数日後には安定した補正効果が得られることが多い。カルマンフィルタの計算開始時の不安定性は、初期値に適正な係数を与えることで軽減すると考えられる。

（３）計算時間

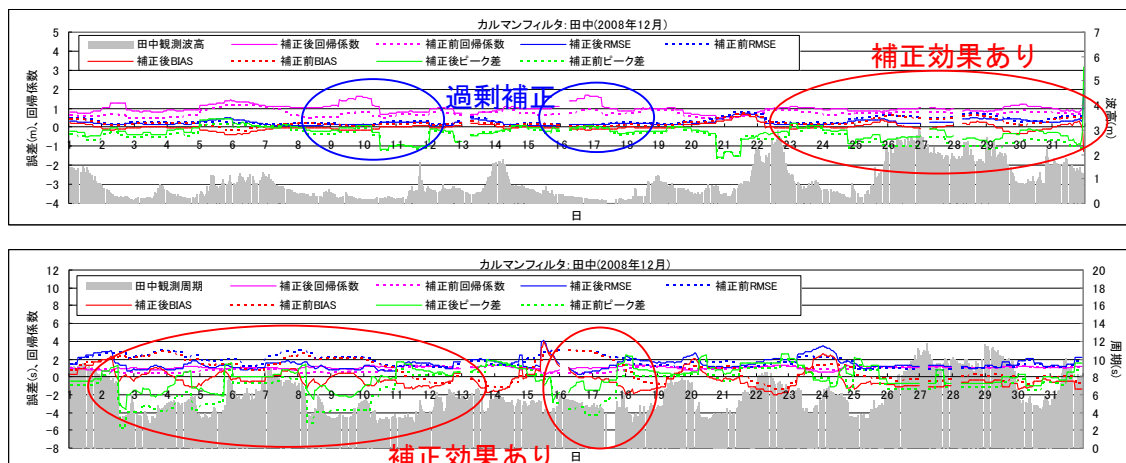
1 予測（33 時間先まで）の補正計算に要する時間は表-5.2.7 の通りである。最適内挿法が最も時間を要するが 1 秒以下であり、いずれの手法も計算負荷は小さい。

表-5.2.7 計算時間

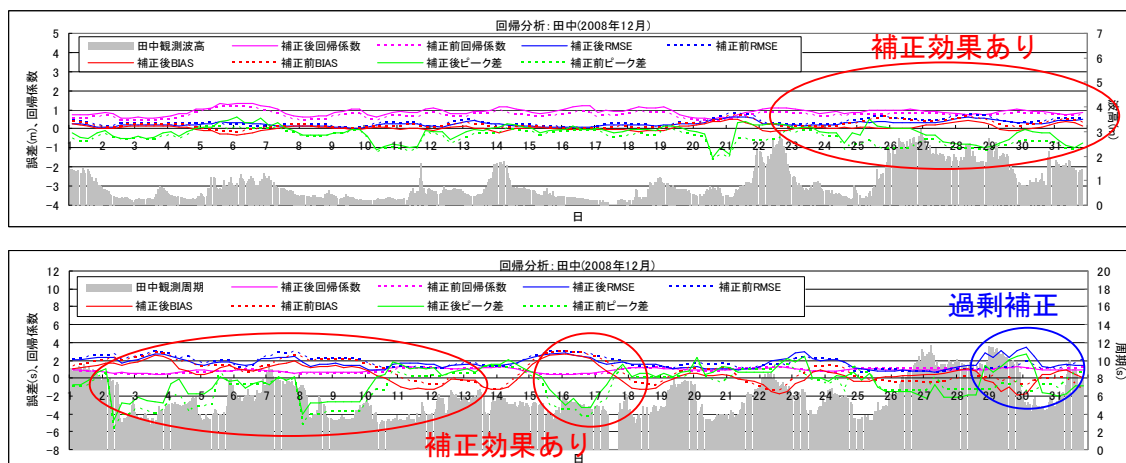
補正方法	計算時間	備考
カルマンフィルタ	0.001 秒	1 地点分
回帰分析	0.001 秒	1 地点分
最適内挿法	0.349 秒	3 地点分

*Intel(R) Xeon(R) CPU E5345 @ 2.33GHz

【カルマンフィルタ】



【回帰分析】



【最適内挿法】

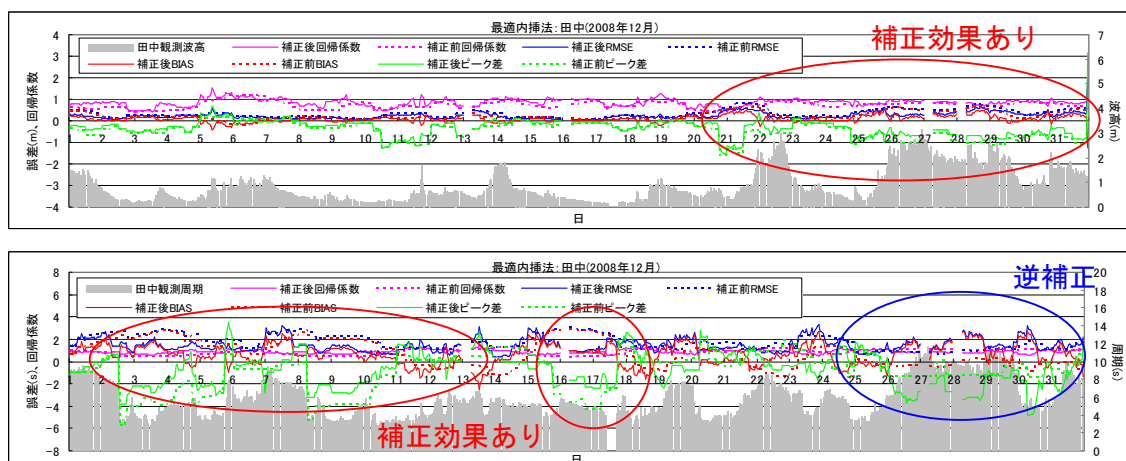
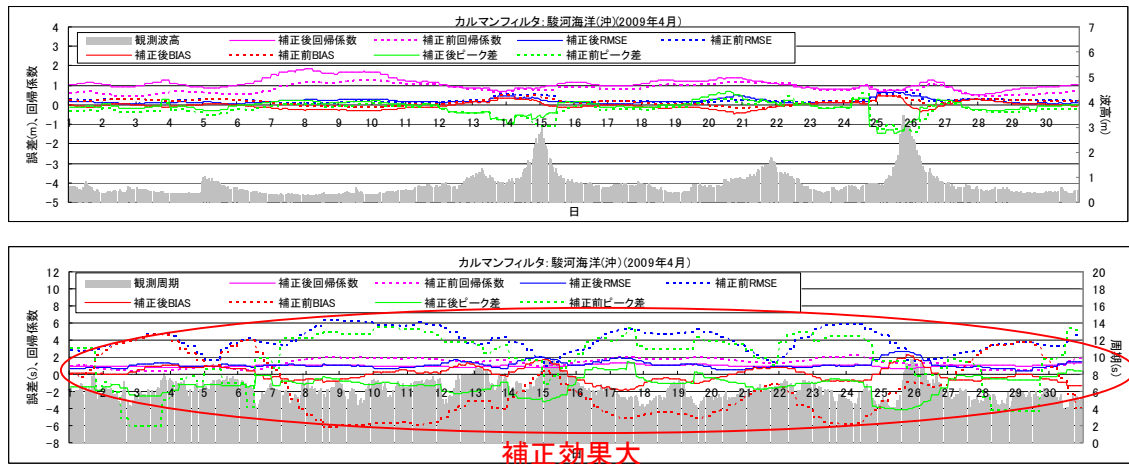


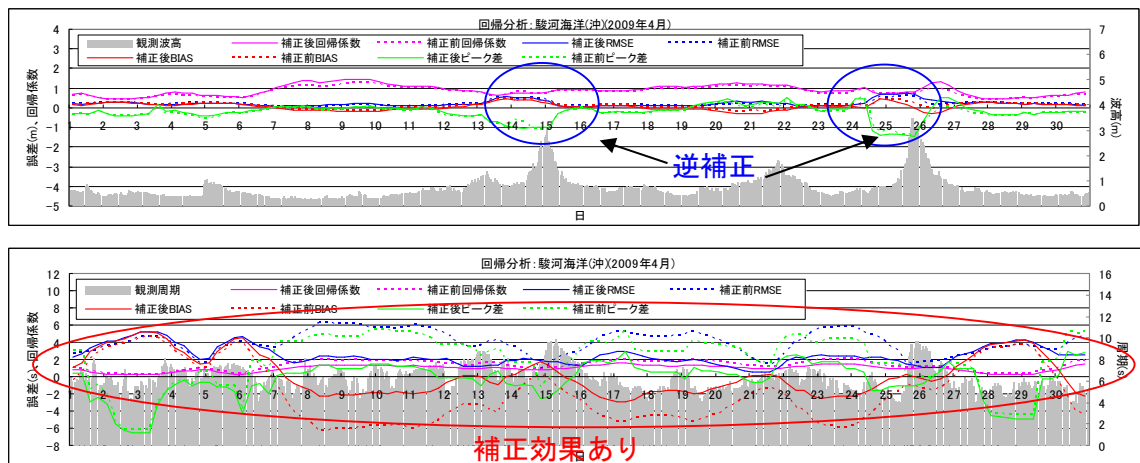
図-5.2.15 補正前後の統計値時系列図（田中、2008年12月）

*RMSE は二乗平均誤差、BIAS は平均誤差

【カルマンフィルタ】



【回帰分析】



【最適内挿法】

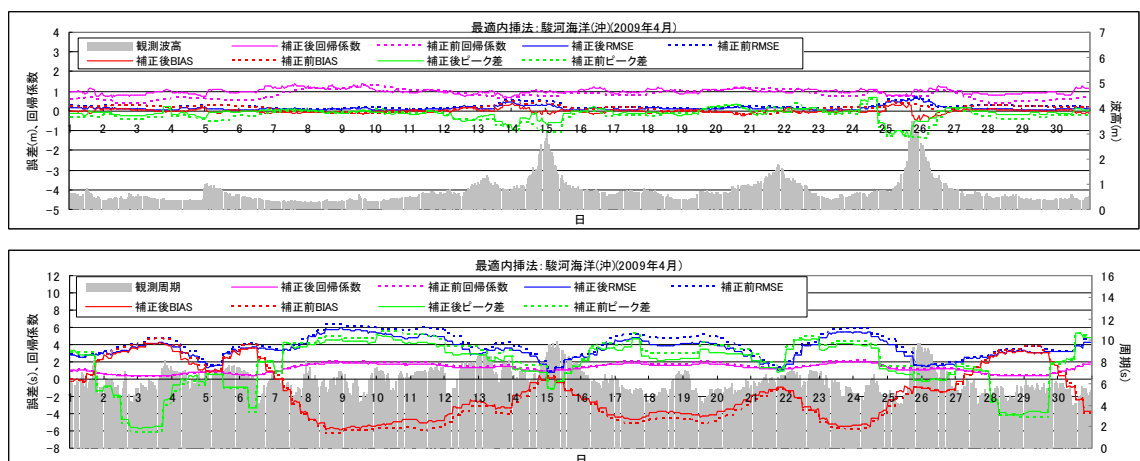
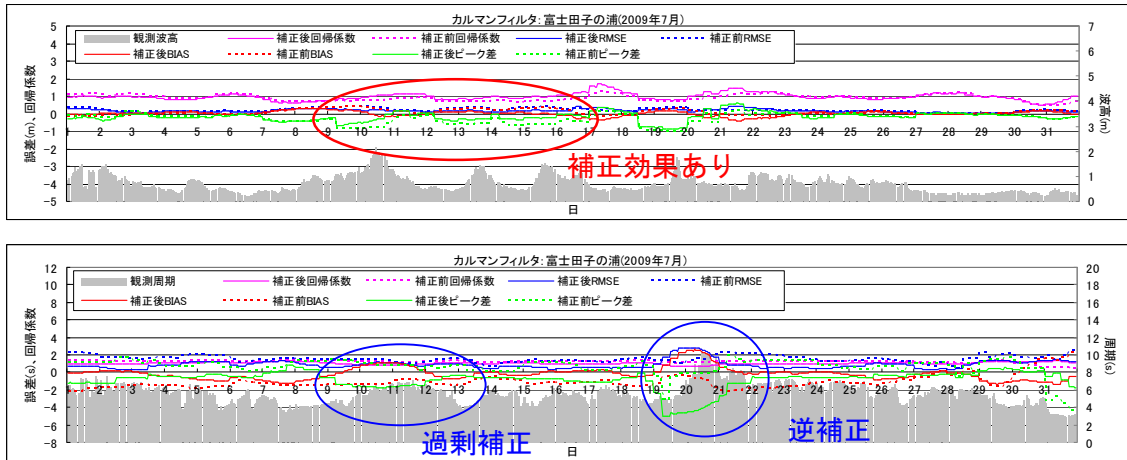


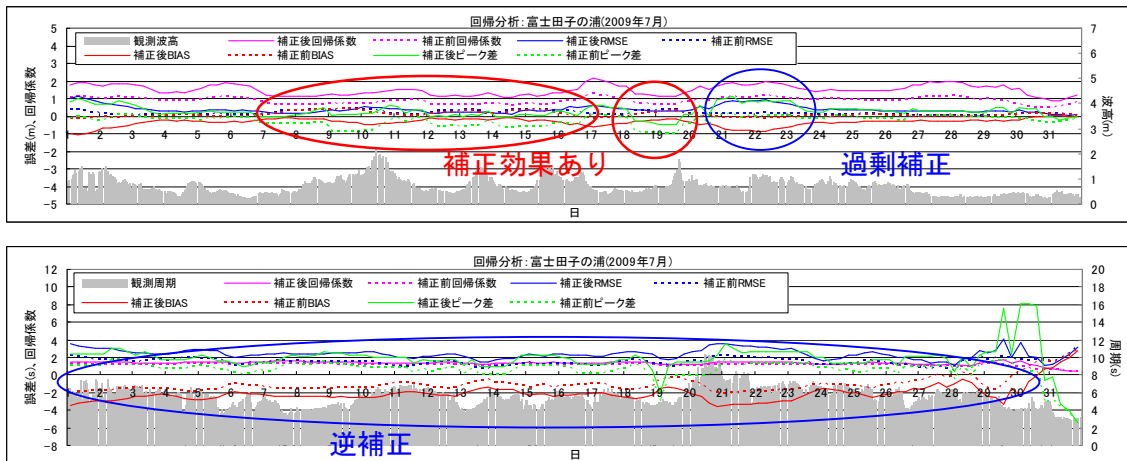
図-5.2.16 補正前後の統計値時系列図 (駿河海洋(沖)、2009年4月)

*RMSE は二乗平均誤差、BIAS は平均誤差

【カルマンフィルタ】



【回帰分析】



【最適内挿法】

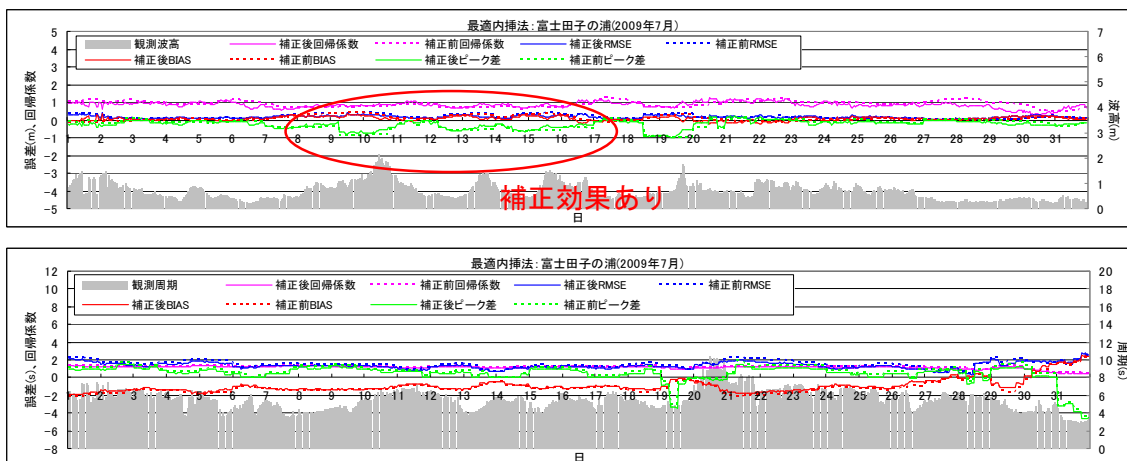
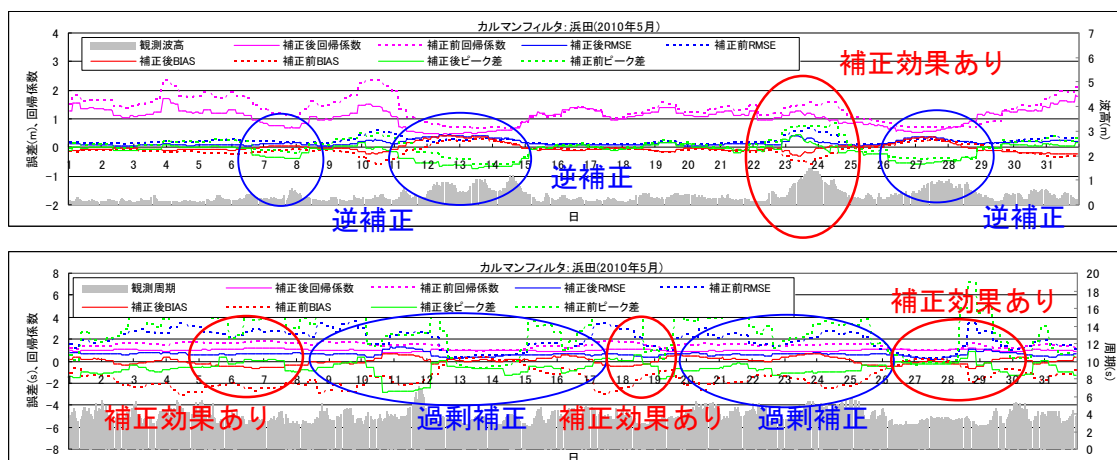


図-5.2.17 補正前後の統計値時系列図（富士田子の浦、2009年7月）

*RMSE は二乗平均誤差、BIAS は平均誤差

【カルマンフィルタ】



【回帰分析】

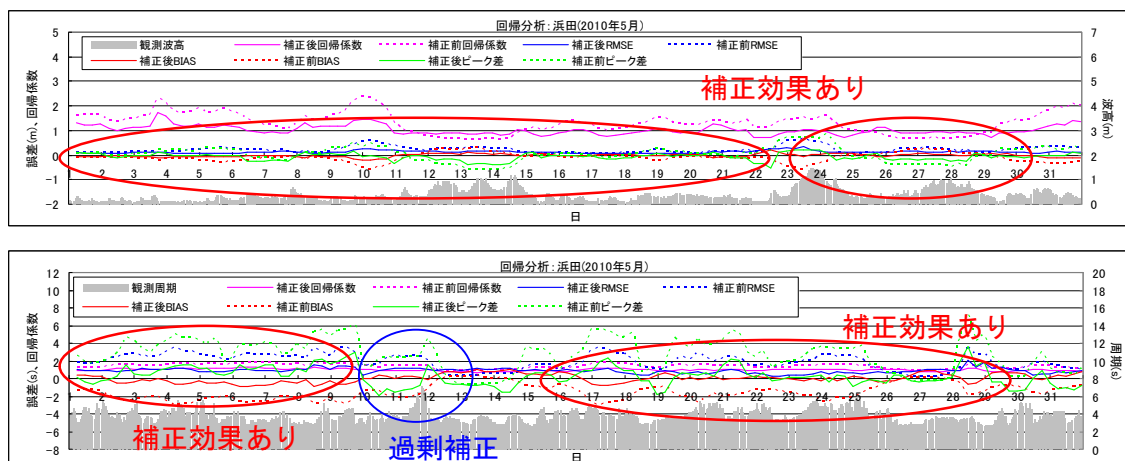


図-5.2.18 補正前後の統計値時系列図（浜田、2010年5月）

*RMSE は二乗平均誤差、BIAS は平均誤差

以上の結果から、各補正手法の特徴は表-5.2.8のように整理される。

表-5.2.8 各補正方法の特徴

項目	カルマンフィルタ	回帰分析	最適内挿法
計算時間	○	○	○
安定性	△ (初期値を適正に設定すれば○)	○	○
補正効果の特徴	予測傾向が急変するときは追従できないことがある。	補正効果が大きい。 一方、補正傾向が固定的であり、一般的な傾向と異なる予測の時は逆に誤差を大きくする。	誤差相関が低い海域、要素では補正効果が小さい（駿河湾の周期など）
モデル更新時の対応	不要	補正係数の再作成 (長期間のデータの蓄積が必要)	重み係数の再作成 (長期間のデータの蓄積が必要)
補正適用範囲	観測地点のみ	観測地点のみ	観測地点以外も可能

資料3 緩勾配海岸を対象としたうちあげ高算定式の開発

1. はじめに

うちあげ高は、海岸堤防の天端高設定など施設設計に用いられているとともに、海岸水防など高潮・高波時の防災対応においても重要な指標である。施設設計ではうちあげ高算定に中村ら(1972)の改良仮想勾配法などが用いられている一方、波の不規則性を考慮したうちあげ高算定式が間瀬ら(2006)、玉田ら(2009)などによって提案されているが、現地海岸でのうちあげ高の観測事例は少なく、各算定方法の現地適用性は十分に検証されているとはいえない。また、改良仮想勾配法などの算定図・算定式は、海底勾配が 1/30 程度より急な断面での実験結果から得られたものであり、それより緩やかな断面での適用性は検証されていない。そこで、緩勾配断面でのうちあげ高算定式を検討するとともに、現地でのうちあげ高観測により各算定式の現地適用性を検証した。

2. 緩勾配海岸でのうちあげ高算定式の検討

中村らの実験条件で CADMAS-SURF によりうちあげ高の算定を行い、計算値が実験値とほぼ一致することを確認した上で、1/100 勾配斜面に堤防を設置した断面でのうちあげ高を、多数の波浪条件を設定して CADMAS-SURF により計算し、その結果から 1/30 より緩やかな海岸に適用するうちあげ高算定式（以下「改良仮想勾配法(1/100)」と表記）を作成した。

(1) CADMAS-SURF の適用性検証

中村らの実験のうち、もっとも緩い勾配の断面（図-5.3.1）を 10 倍に拡大した断面について、表-5.3.1 および表-5.3.2 に示す計算条件および入力条件で、うちあげを 25 分間計算（格子間隔：水平方向 0.5m、鉛直方向 0.1m）した。CADMAS-SURF では、規則波を入射してもうちあげ高が時間的に変動するため、計算時間内の上位 1/3 平均うちあげ高を算出した。間瀬ら(2003)が行った模型実験では、計測された上位 1/3 平均うちあげ高が改良仮想勾配法で算定されるうちあげ高の 1.0～1.5 倍程度になっていたことをふまえ、本研究では、CADMAS-SURF で計算されたうちあげ高を 1.25 で除して、中村らの実験結果（波形勾配 0.0075～0.01）と比較した。その結果、図-5.3.2 のように、両者はよく一致することが確認された。

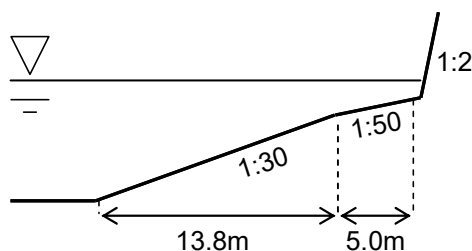


図-5.3.1 検証計算の対象とした中村らの実験断面

表-5.3.1 検証計算の計算条件

計算条件	設定値
境界条件	VOF 関数：フリー，流速圧力：スリップ
造波条件	造波境界，ストークス波またはクノイド波
ポラス値の下限	0.01
差分スキーム	VP-DONOR 0.5
気泡の処理	TimerDoor 法 上昇速度 0.2m/s
水滴の処理	TimerDoor 法 自由落下かつ斜面上処理

表-5.3.2 検証計算の入力条件

ケース	入射波（規則波）	
	波高(m)	周期(sec)
1	1.0	8.4
2	2.0	11.9
3	3.0	14.6

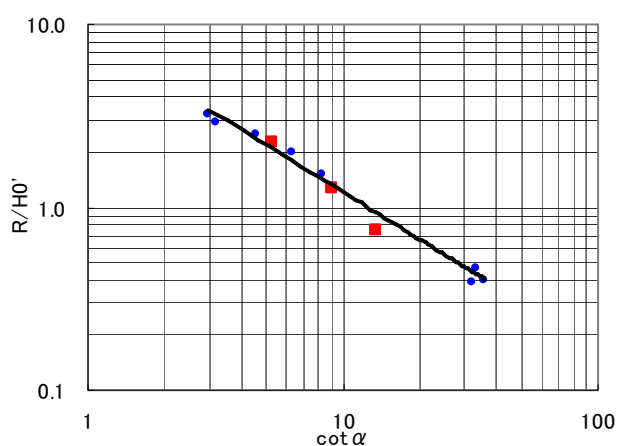


図-5.3.2 中村らの実験結果（●）と CADMAS-SURF による計算結果（■）

(2) うちあげ高算定式の検討

勾配 1/100 の斜面に表法勾配 1/2 の堤防（堤脚水深 1m）を設置した断面でのうちあげを表-5.3.3 に示す条件で CADMAS-SURF により 20 分間計算し，その後半 10 分間の波形から上位 1/3 平均うちあげ高を算定し，改良仮想勾配法と同様に， $\cot \beta$ （碎波点から波の遡上点までの仮想的な勾配，堤防がある場合には海底勾配と一致しない）と相対うちあげ高（うちあげ高 R と沖波波高 H_0' との比）との関係を表-5.3.4 のように整理した。

また，表-5.3.4 に示された改良仮想勾配法 1/100 で対象とした各波形勾配について，改良仮想勾配法，玉田らのうちあげ高算定式($R_{1/3}$)，Mase(1989)の遡上高算定式($R_{1/3}$)で得られる相対うちあげ高と比較した（図-5.3.3）。全ての波形勾配について，改良仮想勾配法 1/100 は他の式と比べて相対うちあげ高が大きくなっている。

表-5.3.3 入力条件

波形 勾配	波高 (m)	周期 (sec)	境界水深 (m)	水路長 (m)	格子間隔(m)	
					水平方向	鉛直方向
0.006	1.0	10.3	6	520	0.50	0.10
	2.0	14.6	6	520	0.50	0.10
	3.0	17.9	11	1020	1.00	0.20
0.008	1.0	9.0	6	520	0.50	0.10
	2.0	12.7	6	520	0.50	0.10
	3.0	15.5	11	1020	1.00	0.20
	4.0	17.9	11	1020	1.00	0.20
0.010	1.0	8.0	6	520	0.50	0.10
	2.0	11.3	6	520	0.50	0.10
	3.0	13.9	11	1030	1.00	0.20
	4.0	16.0	11	1020	1.00	0.20
	5.0	17.9	16	1520	1.00	0.20
0.020	1.0	5.7	6	520	0.50	0.10
	2.0	8.0	6	520	0.50	0.10
	3.0	9.8	11	1020	0.50	0.10
	4.0	11.3	11	1020	0.50	0.10
	5.0	12.7	16	1520	1.00	0.20
	6.0	13.9	16	1520	1.00	0.20
	7.0	15.0	16	1520	1.00	0.20
0.040	1.0	4.0	6	520	0.25	0.10
	2.0	5.7	6	520	0.25	0.10
	3.0	6.9	11	1020	0.50	0.10
	4.0	8.0	11	1020	1.00	0.10
	5.0	9.0	16	1520	1.00	0.10
	6.0	9.8	16	1520	1.00	0.20
	7.0	10.6	16	1520	1.00	0.20

表-5.3.4 改良仮想勾配法 1/100 の算定式

波形勾配	近似式
0.006	$R/H_0' = 10.056(\cot \beta)^{-0.6788}$
0.008	$R/H_0' = 6.8281(\cot \beta)^{-0.5935}$
0.010	$R/H_0' = 8.2797(\cot \beta)^{-0.6839}$
0.020	$R/H_0' = 12.061(\cot \beta)^{-0.8908}$
0.040	$R/H_0' = 16.151(\cot \beta)^{-1.0146}$

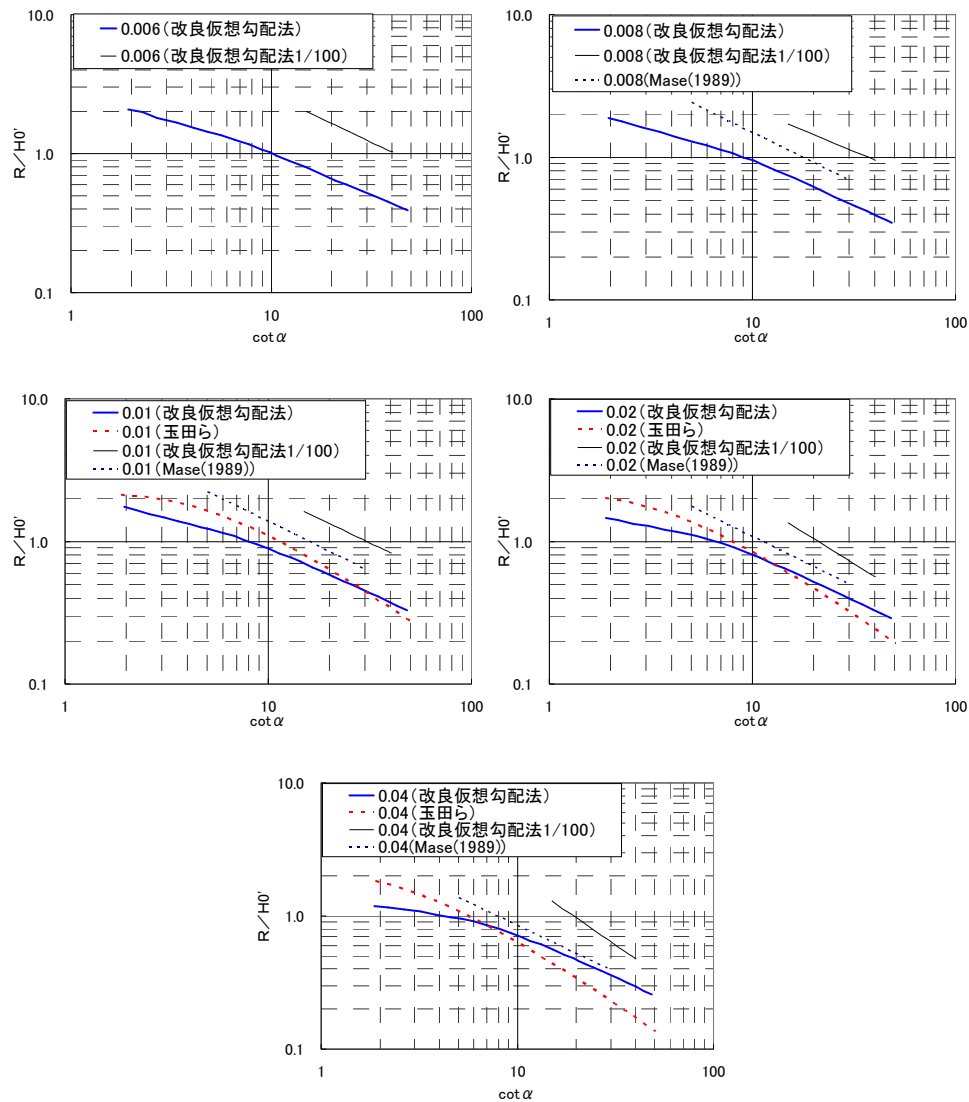


図-5.3.3 相対うちあげ高の比較

謝辞

浅海波浪モデルの開発は、国土交通省河川局（現水管理・国土保全局）、港湾局及び気象庁の連携のもと、国土技術政策総合研究所、独立行政法人港湾空港技術研究所（現国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所）、気象庁、気象研究所により構成される「高潮情報システム技術検討ワーキンググループ」での議論を通じて進められた。本研究では、港湾空港技術研究所で改良された WAM のプログラムを使用させていただき、九州大学大学院工学研究院の橋本典明教授（現名誉教授）にご指導いただいた。

うちあげ高予測の検証では、京都大学防災研究所の間瀬肇教授（現名誉教授）と安田誠宏助教（現関西大学環境都市工学部都市システム工学科教授）にご指導いただくとともに、いであ株式会社に在籍していた玉田崇氏から有益な情報をいただいた。

精度検証では、越波事例の痕跡調査の結果や潮位・波浪観測のデータは国土交通省北海道開発局、関東地方整備局、中部地方整備局、四国地方整備局、神奈川県、静岡県、三重県、兵庫県、沖縄県から提供いただいた。また、再現計算に必要となる潮位・波浪の出力値を気象庁大気海洋部より提供いただいた。

駿河海岸での現地観測では中部地方整備局静岡河川事務所の協力を得た。西湘海岸周辺での痕跡高データは東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻の田島芳満教授から、波浪観測データは関東地方整備局京浜河川事務所から提供を受けた。

予測地点の設定にあたり必要となる堤防や深淺測量、海底の地形のデータ（汀線から水深 20 m 程度までの水深データ）は、それぞれ全国の海岸管理者及び海上保安庁海洋情報部より提供を受けた。

ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 青木伸一，加藤茂：台風 0918 号による三河湾の高潮について，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. 66, No.1, pp.296-300, 2010.
- 大阪湾港湾等における高潮対策検討委員会（第 1 回尼崎西宮芦屋港部会）：資料 3-2 台風第 21 号における浸水被害の状況について，2018.
- <https://web.pref.hyogo.lg.jp/ks17/takashio/documents/07shiryo3-2.pdf>
- 岡田弘三，林 健次，磯崎一郎：内海における海上風推算手法の開発，海の研究，Vol.4, No.2, pp.91-99, 1995.
- 加藤史訓，福濱方哉，橋本典明，三嶋宣明，松藤絵理子，宇都宮好博：内湾を対象としたリアルタイム波浪予測システムの開発，海洋開発論文集，Vol. 23, pp.225-230, 2007.
- 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.
- 加藤史訓，笹岡信吾，諏訪義雄，松藤絵理子，上原謙太郎，富田雄一郎，北村康司，田向順光：うちあげ高観測システムの開発，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 67, No.2, pp. I_738-I_743, 2011.
- 加藤史訓，福原直樹：現地観測による 2019 年台風第 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），第 76 巻，pp.I_841-846，2020.
- 川口浩二，杉本 彰，橋本典明：第三世代波浪推算モデルの内湾波浪推算への適用性－メソスケール気象モデルの導入，港湾空港技術研究所資料，No.1061, 53p., 2003.
- 気象庁：台風経路図，https://www.data.jma.go.jp/typhoon/route_map/index.html
- 気象庁：保存用天気図，<https://www.data.jma.go.jp/yoho/wxchart/archive/index.html>
- 気象庁：高潮予測の概要と高潮事例の検証，令和 7 年度予報技術研修テキスト，pp.25-76, 2026a.https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/expert/pdf/r7_text/r7_takashioyosoku-jirei.pdf
- 気象庁：波浪予測の概要と高波事例の検証，令和 7 年度予報技術研修テキスト，pp.14-24, 2026b.https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/expert/pdf/r7_text/r7_harouyosoku-jirei.pdf
- 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，14 巻，3 号，pp.59-106, 1975a.
- 合田良実，岸良安治，神山豊：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，港湾技術研究所報告，第 14 号，第 4 号，pp.3-44, 1975b.
- 国土交通省水管理・国土保全局編：海岸統計
- 全国農地海岸保全協会，公益社団法人全国漁港漁場協会，一般社団法人全国海岸協会，公益社団法人日本港湾協会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，2018.

- 高橋敏彦, 沼田淳: 緩傾斜堤への波の打ち上げ高さ及び遡上特性に関する現地観測値の基礎的検討, 海洋開発論文集, 第 15 巻, pp.701-706, 1999.
- 高橋裕輔, 諏訪義雄, 漆原和也, 渡辺昌彦, 桶川勝功, 菊池秀之, 鎌田卓, 工藤雄一: 高波災害対策に関する研究, 平成 21 年度国土交通省国土技術研究会論文集, 2009.
<http://www.mlit.go.jp/chosahokoku/h21giken/program/kadai/pdf/shitei/shi1-04.pdf>
- 高山知司, 永井紀彦, 西田一彦: 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, 第 21 巻, 第 2 号, pp.151-206, 1982.
- 田中陽二, 鈴山勝之, 樋口直人, 柴木秀之: 堤前波高を用いた越波モデルの改良と越波越流統合モデルの作成, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_1015-1020, 2018.
- 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.
- 玉田崇, 間瀬肇, 安田誠宏: CLASH データセットに基づく打上げ・越波統合算定モデルの直立護岸への拡張, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 71, No.2, pp.I_847-I_852, 2015.
- 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.
- 橋本典明, 川口浩二: 波浪推算モデルとその利用, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp.53-58, 2003.
- 橋本典明, 松本秀雄, 川口浩二, 松藤絵理子, 松浦邦明: 局地気象モデルと第三世代波浪推算法による瀬戸内海を対象とした海象情報数値データベースの構築, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp.839-844, 2004a.
- 橋本典明, 川口浩二, 池上正春, 鈴山勝之: 東京湾における WAM の波浪推算特性に関する検討, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp.845-850, 2004b.
- 姫野一樹, 福原直樹, 加藤史訓, 安田誠宏: 消波工によるうちあげ高低減効果の評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 80, No. 17, 24-17175, 2024.
- 姫野一樹, 福原直樹, 柴田亮, 加藤史訓, 窪田和彦, 西内勇貴: 緩勾配海岸におけるうちあげ高算定方法の評価, 土木学会論文集, Vol. 81, No.17, 25-17157, 2025.
- 福原直樹, 竹下哲也, 加藤史訓, 寺西琢矢, 秋田雄大, 橋本孝治: 画像処理技術を用いたうちあげ高計測手法に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 75, No.2, pp. I_1267-I_1272, 2019.
- 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.
- 間瀬肇, 高山知司, 国富將嗣, 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/II48, pp.177-187, 1999.
- 間瀬肇, 平尾博樹, 國富將嗣, 高山知司: SWAN を用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の検証, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.236-240, 2001.

- 間瀬肇, 宮平彰, 桜井秀忠, 井上雅夫: 汀線近傍の護岸への不規則波の打上げに関する研究-算定打上げ高と不規則波の代表打上げ高の関係-, 土木学会論文集, No.726 /II-62, pp.99-107, 2003.
- 間瀬肇, 所良晃, 目見田哲, 桜井秀忠, 今林敏明: 汀線近傍の一様勾配斜面への不規則波の打上げ高, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.1, pp.163-168, 2006.
- 間瀬肇, 玉田崇, 安田誠宏, 川崎浩司: 打上げ・越波統合算定モデルの精度検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.72, No.1, pp.83-89, 2016.
- 間瀬肇, 由比政年, 金洙列, 榎田真也, 松下紘資, 安田誠宏, 平山克也: 越波流量算定式の再考察と IFORM の精度向上, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.77, No.1, pp.I_18-I_27, 2021.
- 間瀬肇, 由比政年, 松下紘資, 武田将英, 水谷英朗: 改良仮想勾配法による規則波の打上げ高を天端高とした不規則波の越波流量評価, 土木学会論文集, Vol.82, No.2, 25-00233, 2026.
- 松下紘資, 山本拓, 安田誠宏, 大熊康平: 被覆形式を考慮した消波護岸の越波流量算定図の作成, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.77, No.2, pp.I_55-I_60, 2021.
- 村上啓介, 関谷海里, 真木大介: 強風が不規則波の打ち上げ高に及ぼす影響に関する水理模型実験による考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.78, No.2, pp.I_379-I_384, 2022.
- 山本吉道, Vu Thanh Ca, 浅野剛, 有村盾一: 現地海岸堤防に対する越波評価法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 761-765, 1999.
- 由比政年, 大谷直也, 間瀬肇, 金洙列, 榎田真也, Corrado Altomare: 打上げ・越波統合算定モデルの越波量推定精度向上に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 2, pp. I_739-I_744, 2019.
- Battjes, J. A. and Janssen, J. P. F. M.: Energy loss and set-up due to breaking of random waves, Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp.569-587, 1978.
- CLASH project: <http://www.clash.ugent.be/>, presented by De Rouck, J. Verhaeghe, H. and Geeraets, J.: Crest level assessment of coastal structures - General overview, Journal of Coastal Engineering, Vol.56, Issue 2, pp.99-107,2009.
- Hasselmann, K. and 15 authors: Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dt.Hydrogr.Z., A8(12), 95p., 1973.
- Hersbach, H. and P.A.E.M. Janssen: Improvement of the short fetch behavior in the WAM model, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 16, pp.884-892, 1999.
- Himeno, K., Fukuhara N., Kato, F.: Accuracy verification of a real-time prediction system for wave runup heights, Coastal Engineering Proceedings, Vol.38, paper-7,2025.

- Hsiao, S.V. and Shemdim, O.H.: Measurements of wind velocity and pressure with a wave follower during Marsen, *Journal of Geophysical Research Oceans*, Vol. 99, Issue C14, pp.9841-9849, 1983.
- Janssen, P.A.E.M: Wave-Induced Stress and the Drag of Air Flow over Sea Waves, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.19, Issue 6, pp.745-754, 1989.
- Janssen, P.A.E.M: Quasi-linear Theory of Wind-Wave Generation Applied to Wave Forecasting, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.21, Issue 11, pp.1631-1642, 1991.
- Janssen, P. A. E. M.: Experimental evidence of the effect of surface waves on the airflow. *Journal of Physical Oceanography*, Vol.22, Issue 12, pp.1600–1604, 1992.
- Japan Meteorological Agency.: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency, 199-235, 2026.
- Komen, G.J., Hasselmann, S., and Hasselmann, K.: On the existence of a fully developed wind-sea spectrum, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.14, pp.1271-1285, 1984.
- Mase, H.: Random Wave Runup Height on Gentle Slope, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Volume 115, Issue 5, pp.649-661, 1989.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T., and Reis, M.: Wave Runup and Overtopping at Seawalls Built on Land and in Very Shallow Water., *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, Vol.139, No.5, pp.346–357, 2013.
- Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/ POSEIDON altimeter data into hydrodynamical models: a global model and a regional model around Japan, *Journal of Oceanography*, Vol. 56, pp.567-581, 2000.
- Mitsuyasu, H. and Honda, T.: Wind-induced growth of water waves, *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 123, pp.425-442, 1982.
- Mori, N., Yasuda, T., Arikawa, T., Kataoka, T., Nakajo, S., Suzuki, K., Yamanaka, Y., and Webb, A.: 2018 Typhoon Jebi Post-Event Survey of Coastal Damage in the Kansai Region, Japan, *Coastal Engineering Journal*, Vol.61, pp.278-294, 2019.
- Saville, T.: Wave run-up on composite slopes, *Coastal Engineering Proceedings*, No.6, Chapter 41, pp.691-699, 1957
- Shimozono, T., Tajima, Y., Kumagai, K., Arikawa, T., Oda, Y., Shigihara, Y., Mori, N., and Suzuki, T.: Coastal Impacts of Super Typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka Areas, Japan, *Coastal Engineering Journal*, Vol.62, pp.129-145, 2020.
- Suzuki, Y.: Development and application of a global ocean wave prediction model including nonlinear interactions and dissipation, 182p., 1995.

- Yamanaka, Y., and Tajima, Y.: Numerical investigation on characteristics of long wave components amplified under the 2018 Typhoons Jebi and Trami observed along the coast of Wakayama, Japan, Coastal Engineering Journal, Vol.64, No.1, pp. 100-115, 2022.
- Wu, J.: Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, Journal of Geophysical Research Oceans, Vol. 87, Issue C14, pp.9704-9706, 1982.

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

N o . 1355

July 2026

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675