

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.60 No.1 June 2021

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME,
PORT AND AVIATION TECHNOLOGY

総目次

1. 波の遡上域における海浜地形変化に及ぼす潮汐変動の影響に関する検討
伴野 雅之・栗山 善昭
2. 2019年台風15号による横浜港に襲来したうねり性の波浪
田村 仁・川口 浩二・岩本 匠夢・藤木 峻
3. 富山湾・寄り回り波の力学機構
田村 仁・川口 浩二・藤木 峻
4. 仮設被覆工の耐波安定性について
鈴木 高二朗・久保田 博貴・田中 敦
5. パラペット後退型護岸に働く波圧に関する検討
鈴木 高二朗・久保田 博貴・鶴田 修己
6. プレート境界断層デコルマ帯におけるスロースリップ発生メカニズムに関する研究
杉山 友理・橋 伸也・森川 嘉之
7. MPM-剛体シミュレーションのための最小二乗法を用いた摩擦接触アルゴリズムの開発と開端杭の地盤への貫入挙動への適用
中村 圭太・松村 聡・水谷 崇亮

2019年台風15号による横浜港に襲来したうねり性の波浪

田村 仁*・川口浩二**・岩本匠夢・藤木 峻***

要 旨

2019年9月に発生した台風15号(アジア名Faxai)の直撃は、首都圏の陸上および沿岸部に甚大な被害をもたらした。台風による猛烈な海上風は高波をもたらし、東京湾内のNOWPHAS第二海堡では1991年からの観測開始以降で最大の有義波高が記録された。この高波により数多くの港湾施設や防波堤が損壊しその背後地で浸水被害が発生した。事後調査からは非常に特徴的な被災状況が2点報告されている。1つ目は顕著な沿岸被害を受けた海域が局在化されていたことである。東京湾全域に最大で30m/sに及ぶ強風が吹き荒れていたにもかかわらず、沿岸被害は東京湾西岸の横浜港周辺にのみ集中していた。2つ目は高波の襲来方向である。倒壊したフェンスや植生の痕跡から推定される越波方向は北東および南東の範囲(2方向波)で分布していた。本研究では台風15号による沿岸被害はどのような海象条件下でもたらされたのか、またなぜ沿岸被害は横浜港周辺にのみ局在化したのか?これらの問いに対する解を提示することを主目的として、第三世代波浪モデルによる過去再現計算および数値実験を行った。

過去計算から得られた最大有義波高は、その空間的な差異が小さく被害海域との関連性も不明瞭であった。一方で沿岸被害の集中した横浜港周辺では有義波高の最大ピーク時に特異的な波浪場が形成されていた可能性が示され、その波浪スペクトルは次の2つで特徴づけられる。

- (1) 横浜港周辺で卓越した東風(~30m/s)に対応する波向き成分波が存在しない。
- (2) 波浪スペクトルは3成分で構成され、それら全てが風波領域に存在する。

波浪モデルによる数値実験からこれら3成分波の内、2成分は東京湾および浦賀水道北部の2つの海域で生成された風波成分、また残りの1成分は外洋で生成された波浪がうねり性波浪として横浜港沖へ伝搬したことを示した。さらにそれぞれの波浪力学過程として、傾斜吹送距離条件下での風波発達および東京海底谷の屈折作用の重要性を明らかにした。本研究においては横浜港周辺に甚大な被害をもたらしたのは湾外からのうねり性波浪に起因する可能性が高いと結論付けている。実際、有義波高の自乗と平均周期の積で算定される最大波パワー(エネルギーフラックス)の空間分布は、浦賀水道から続く筋状の極大値が横浜港周辺まで延伸し、まさに沿岸被害が集中した横浜港・金沢区沖は東京湾内でも特異な海域となっていたことが示された。これは台風15号による強風下でうねりが急速に発達しながら金沢区沖まで到達したためであると考えられる。

キーワード : 2019年台風15号, 東京湾, 横浜港沿岸被害, 波浪スペクトル

* 海洋水理研究領域/海象情報研究グループ・主任研究官

** 海洋水理研究領域/海象情報研究グループ・グループ長

*** 海洋水理研究領域/津波高潮研究グループ・研究官

**** 元・海洋水理研究領域/海象情報研究グループ

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話 : 046-844-5048 Fax : 046-842-5246 e-mail:htamura@p.mpati.go.jp

Ocean swells induced by the Typhoon Faxai hit Port of Yokohama in 2019

Hitoshi TAMURA*, **Koji KAWAGUCHI****, **Takumu IWAMOTO*****,
and Takashi FUJIKI****

Synopsis

The direct hit of Typhoon Faxai (T1915) in September 2019 caused extensive damage to land and coastal areas of the Tokyo metropolitan area. The strong winds at sea brought high waves, and the largest significant wave height (Hs) was recorded at a weather station in Tokyo Bay since the observation commenced in 1991. The surge damaged a number of port facilities and breakwaters and caused flooding in the area behind them. From the post-event survey, two intriguing phenomena of the disaster were reported, which motivated this study. The first is that although the storm impacted the whole bay, significant damage was concentrated in a small area near the Port of Yokohama. The second is about the direction of the hazardous waves, which came from both the northeast and the southeast. The underlying wave dynamics that lead to these events were unknown. Here, we elucidate characteristics of the wave's incident to the Port of Yokohama that caused a concentration of severe damage, and we clarify the mechanism responsible for the two disparate wave directions observed.

The maximum Hs obtained from the wave hindcast were not spatially different, and the relationship with the damaged area was unclear. On the other hand, in the area around the Port of Yokohama an unusual wave field may have been formed at the time of the maximum wave height, and the wave spectrum can be characterized by the following two points:

- (I) There is no wave component in the wave direction corresponding to the prevailing easterly wind (~30 m/s) around Yokohama Port
- (II) The wave spectrum consists of three components, all of which exist in the wind-wave regime.

Numerical experiments using a wave model show that two of the three wave components are wind waves generated in Tokyo Bay and the northern part of the Uraga Channel. The other one is a swell coming from the Pacific and propagated to the Port of Yokohama. In addition, the development of wind waves under slanting fetch conditions and the refraction of the swell by the Tokyo Submarine Canyon were key factors for generating unusual coastal wave spectra. In this study, we conclude that the swell dominant waves from the Pacific are likely to be responsible for the severe damage around the Port of Yokohama. In fact, the maximum wave power has a spatial distribution zonally connected from the northern part of the Uraga Channel to the Port of Yokohama, which corresponds to the primary pathway of swell propagation into the western part of the Bay.

Key Words: Typhoon Faxai, Tokyo Bay, coastal damage, Port of Yokohama, coastal wave spectra

* Senior Researcher, Marine Information Group, Ocean Hydrodynamics Department
** Head of Group, Marine Information Group, Ocean Hydrodynamics Department
*** Researcher, Tsunami and Storm surge Group, Ocean Hydrodynamics Department
**** Former affiliation: Marine Information Group, Ocean Hydrodynamics Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone: +81-46-844-5048 Fax: +81-46-842-5246 E-mail: htamura@p.mpat.go.jp

目 次

要 旨	3
1. はじめに	7
2. 数値計算と解析方法	8
2.1 波浪モデルによる過去再現計算および数値実験	8
2.2 Ray方程式による波束追跡実験	9
3. 結果	9
3.1 台風15号による波浪場の過去再現計算	9
3.2 台風15号による風波生成とうねり伝搬の数値実験	13
3.3 傾斜吹送距離条件下での風波の発達	14
3.4 東京海底谷によるうねりの屈折と湾内への伝搬	15
4. 考察と議論	17
4.1 東京湾を対象とした波浪モデル計算に関して	17
4.2 波パワーと被災海域の関係	17
4.3 東京湾内での「うねりの成長」	19
5. おわりに	19
謝辞	19
参考文献	20

1. はじめに

熱帯低気圧の最大強度位置の極方向への移動 (Kossin et al. 2014) や上陸する台風の強度強化 (Mei and Xie, 2016) など、日本を含む東アジア諸国での台風のリスクが増加してきている。2019年9月に発生した台風15号 (アジア名 Faxai) は関東地方に上陸する台風としては観測史上最強クラスの勢力を保持しており、その直撃は陸上および沿岸部に甚大な被害をもたらした。台風15号は小笠原諸島近海を北西に進みながら徐々に発達し、8日21時 JST (Japan Standard Time, +9 GMT) には神津島付近で再発達し中心気圧 955hPa・最大風速 45m/s の非常に強い勢力に達した。この勢力を保ったまま台風は三浦半島に接近し、9日3時前に三浦半島を通過した。台風の中心は東京湾に抜けて北東に進み、9日5時前には千葉県千葉市付近に上陸した。その後、茨城県を通過して海上に出た台風は、福島県や宮城県を暴風・強風域に巻き込みながら東進した。

台風15号による猛烈な海上風は関東近海で波高 10m 以上に達する高波を引き起こしたと推定される (図-1.1a)。実際、東京湾湾口 (第二海堡) に設置された NOWPHAS 観測点でも、1991年からの観測開始以降で最大の有義波高 (3.27m) が記録された。この高波により

数多くの港湾施設や防波堤が損壊し、その背後地で浸水被害が発生した。沿岸被害の詳細は Suzuki et al (2020) によって報告されている。その中で非常に興味深い被災状況が2点報告されている。1つ目は顕著な沿岸被害を受けた海域が限定されていたことである。東京湾全域に最大で 30m/s に及ぶ強風が吹き荒れていたにもかかわらず、被害は東京湾西岸の横浜港周辺にのみ集中しており、それ以外では目立って確認されていない。2つ目は高波の来襲方向である。Suzuki et al (2020) は倒壊したフェンスや植生の痕跡から横浜港周辺での越波方向を推定しており、それらが ENE および ESE で分布していたことを確認している。東京湾の沿岸被害を受けて設置された「東京湾における高波対策検討委員会」(関東地方整備局) の報告書では第三代波浪モデルによる波浪再現計算を行っている。その結果も横浜港沖合では NE および SE の2方向からの波浪が卓越していたことを支持しており (高橋ら 2020)、委員会では「台風15号による横浜港における波浪は、高波高であったことと2方向波浪であることにより、重複波の発生等これまで経験したことのない波浪特性を有していた」と結論付けている。

本研究の目的は、台風15号による沿岸被害はどのような海象条件下でもたらされたのかを解明することである。特に、(もし事実であれば) 横浜港沖合での NE および

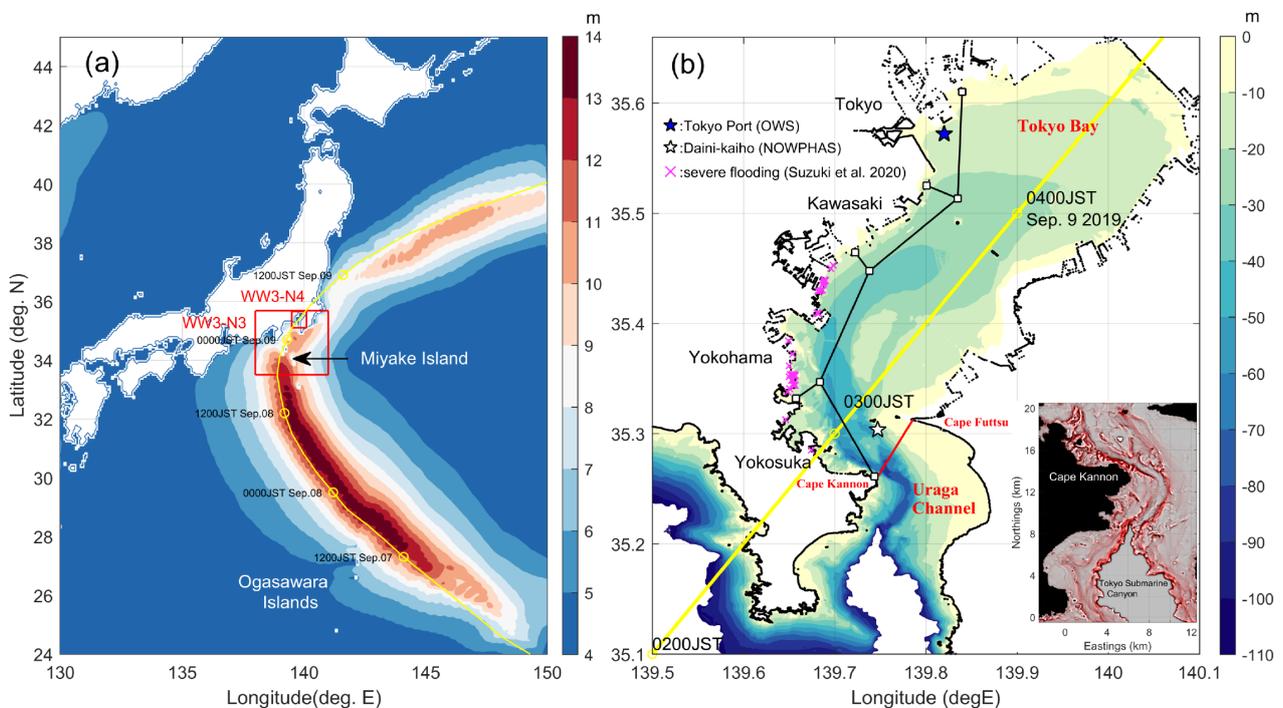


図-1.1 (a) 台風15号による最大有義波の空間分布: WW3-N2 計算値 (b) WW3-N4 の計算領域と海底地形 (内挿図は Chibara ら (2008) による赤色立体地図による可視化)

SE からの2方向波浪はどのような力学メカニズムで生成されたのか？また沿岸被害が局在化した横浜港周辺での波浪特性はどのようなものであったのか？これらの問いに対する解を提示することを主目的として、波浪モデルによる数値実験およびデータ解析を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では本研究で用いる第三代波浪モデルと、それによる波浪再現計算および数値実験の方法を記述する。また Ray 方程式による波束追跡実験の方法についても説明する。第3章ではモデルの計算結果に基づいて台風15号による東京湾内での波浪特性を示す。第4章では既存の波浪モデルの計算結果と本研究の見解が相違することに関して、またなぜ沿岸被害は横浜港に局在化したのかに関して議論する。最後に第5章では結論が示される。

2. 数値計算と解析方法

2.1 波浪モデルによる過去再現計算および数値実験

2019年台風15号による東京湾沿岸での高波とその波浪特性を解明するために波浪過去再現計算を行った。波浪モデルには第三代波浪モデルの一つである WAVEWATCH-III v3.14 (WW3, Tolman 2009) を用いた。波浪モデルの主要な外力となる海上風速データには NCEP/CFRSrver2, JMA/MSM および JMA/LFM の3つのプロダクトを、波浪モデル計算領域およびその解像度に適合するよう採用している。また水深データには NOAA/ETOPO1 および日本水路協会 M7001 を用いており、海岸線についてもそれらの値から海陸マスクを作成して推定している。ただし最も内側の東京湾モデル(下記で説明)に関しては、国土交通省・国土数値情報データセットによる海岸線データも追加で用いることで湾内の複雑な海岸線を再現して海底地形を作成した。WW3による波浪過去再現計算とその外力となる JMA/LFM 解

析データの妥当性を検証するため、東京湾内での観測値との比較を行っている。ここでは一般に公開されている2つのデータ(NOWPHAS 第二海堡, および東京港波浪観測所)を、それぞれ東京湾湾口部および湾奥部を代表する観測点として用いている。観測地点は図-1.1b に星印で示してある。

WW3 による波浪計算には4つの領域(それぞれ全球モデル N1, 日本近海モデル N2, 関東近海モデル N3, 東京湾モデル N4)を設定し、1方向ネスティング手法を用いて効率的に計算を行った。空間解像度はそれぞれ 30' (~50 km), 4' (~7 km), 36" (~1 km), 9" (~250 m) である。計算領域(WW3-N3, N4)は図-1.1a に赤枠で示してある。波浪モデルの力学過程であるエネルギーソース項に関しては、海上風外力項および砕波散逸項には Bidlot et al (2007) によるモデルを、非線形相互作用項には Hasselmann et al (1985) による DIA 法を用いている。浅海域での物理過程(屈折, 浅水変形, 海底面摩擦, 地形性砕波)に関しても全てのモデルで取り込んでいるが、計算結果に顕著な影響が出るのは東京湾モデル(N4)のみである。海上風外力のモデルプロダクトを含めたモデルセッティングの詳細は表-2.1 にまとめてある。

本研究では東京湾モデル(WW3-N4)の計算結果を中心に解析を行うため、ここではその詳細を記述する。WW3-N4 計算領域は図-1.1b に示した海域と対応し、東京湾および浦賀水道の一部が含まれている。これらは観音崎と富津岬を結ぶ境界線で区分される。解析対象となる東京湾西岸には、北から南へ、東京港, 川崎港, 横浜港および横須賀港の4つの港湾区域が設けられており、本研究でもこの区域を参考にして海域を区分しデータ解析等を実施している(図-1.1b の黒線)。WW3-N4 計算領域の南側および西側境界からは、関東近海モデル(WW3-N3)から得られる10分毎の波浪スペクトルを側方境界条件として与えている。波浪モデルのスペクト

表-2.1 WW3 モデルの各計算領域の詳細設定

WW3	N1	N2	N3	N4
計算領域	全球	日本領域	関東近海	東京湾
水平解像度	30 arcmin. (~50 km)	4 arcmin. (~7 km)	36 arcsec. (~1 km)	9 arcsec. (~250 m)
スペクトル解像度	0.041-0.41 Hz (25 grids) 10 deg (36 grids)		0.041-1.1 Hz (35 grids) 5 deg (72 grids)	
海上風外力	NCEP/CFRSR v2	JMA/MSM		JMA/LFM
境界条件	-	Nest1 (hourly)	Nest2 (20 mins)	Nest3 (10 mins)
海底地形	ETOPO1		M7001	

ル解像度は、周波数レンジを0.041-1.05Hzとして対数分布的に35分割、また方向には72分割（解像度5度）に設定した。計算期間は2019年9月8日0000JSTからの2日間である（台風通過はおおよそ9月9日0000JSTから0600JSTまで）。

また上記の過去再現計算に加えて、東京湾内での波浪特性を解明するために2つの数値実験を行っている。1つ目は東京湾および浦賀水道の海域でローカルに生成される風波の影響を調べるために、海上風外力（JMA/LFM解析値）のみで東京湾モデルを駆動した実験である（WND実験）。2つ目は太平洋で生成された波浪が、浦賀水道を通じて東京湾内へ伝搬するうねりの影響を調べるために、WW3-N3による境界条件のみを与えて東京湾モデルを駆動した実験である（BND実験）。これらの実験では、外力以外の計算条件を全て過去再現計算と同様にした。

2.2 Ray方程式による波束追跡実験

本研究ではGallet and Young (2014)による球面座標系のRay方程式（深海波条件）を任意水深に拡張し2つの場面で用いている。1つ目は代表点から海岸線までの（大圏航路に沿った）吹送距離の算出、2つ目は波束の追跡実験である。前者ではRay方程式中の屈折効果を全て除外した。後者では海岸線の幾何形状や海底地形による屈折が東京湾内へのうねりの伝搬特性に与える影響に着目して、浦賀水道と太平洋との境界となる三浦半島・剣崎と房総半島・洲崎を結ぶ線上から波束を入射させ、浦賀水道を通過して東京湾内に侵入する可能性のある全ての経路を追跡した。この実験では境界上の1点に対して、波向きを南から西へ2度刻み、また周期は8秒から20秒まで0.5秒刻みで変えた成分波（1125成分数）を設定した（波束の総数はおおよそ51.3万）。波束はそれらが海岸線（水深2m以下の海域として定義）に到達するまでラグランジュ的に追跡し（ただし海岸からの反射は考慮していない）、それらを6秒のグリッド格子で区切ってカウントした。海底地形および海岸線データはWW3による計算と同様にM7001を用いている。

3. 結果

本章では、まず台風15号通過時の過去再現計算の結果から、沿岸被害の大きかった横浜港を含む東京湾西岸の波浪場の特徴を把握する。続いて2つの理想的な数値実験（WNDおよびBND実験）と過去再現計算の結果を比較することで、湾内で生成される風波成分と外洋から伝

搬するうねり成分の影響を考察する。最後に、WW3による追加的な数値実験、吹送距離則およびRay方程式に基づく解析から横浜港周辺での特異的な波浪場形成には、2つの力学過程（Slanting Fetch条件下における風波の発達と東京海底谷によるうねりの屈折）が重要であったことを指摘する。

3.1 台風15号による波浪場の過去再現計算

台風15号は強い勢力を維持したまま東京湾海上を通過した。台風の進路や大きさから決まる有効吹送距離に依存して、湾内では時空間変動が大きい波浪場となった（図-3.1）。台風接近に伴い東京湾西岸では有義波高が短時間で増大し（0000JSTから0300JSTで1mから3mへ増大）、台風中心が湾を通過（0400JST）した後、今度は東岸で波浪が急発達する（0600JST）。東京湾西岸に着目すると、湾口部の横須賀港では0200JSTに、湾奥部の東京港では0300JSTに最大有義波高が出現した。沿岸被害が顕著であった横浜港では0200JST付近で有義波高が最大値となった。海上風分布を見てみると風向は概ね空間一様となっており、高波のピーク時刻である0200JSTまでは東京湾および浦賀水道北部において東風—東南東風が卓越していた。一方で、東京湾内の波向は風向分布には対応せず空間的に非一様な分布を示している（本論文では波向きを来る方向として定義して用いる）。例えば、海上風速が増加し始める0000JSTに着目すると、おおよそ北緯35.55度を境に北側では南東向き、その南側では北東向きの波浪が卓越している。また湾口部の観音崎沖合から横浜港沖にかけては南西向きが卓越する。

観測値の時系列分布からも台風15号による擾乱が時間変動の大きな現象であったことがわかる。また観測結果との比較からモデル結果の妥当性も確認できる。図-3.2はNOWPHAS第二海堡および東京港波浪観測所における各物理量の時系列を示している。実線は観測値、丸印はモデル値である。湾口部（第二海堡）での海上風速（図-3.2a）は0230JST頃にピーク値を迎え、その値は35m/s以上にまで達していたことが観測結果からわかる。その30分後には台風中心部の通過により風速は5m/s程度まで急激に減少した。この急激な風速変動はおおよそ30km離れた湾奥部（東京港波浪観測所）では観測されていない。風向（図-3.2b）に関しては、湾口部・湾奥部ともに風速がピーク値に達する前までは東風が卓越し、その後、湾口部（湾奥部）では0200JST（0400JST）から0400JST（0500JST）にかけて西風に急転している。観測値との比較からJMA/LFM解析値による台風15号の再現精度は極めて高いことが確認できる。しかしながら1.

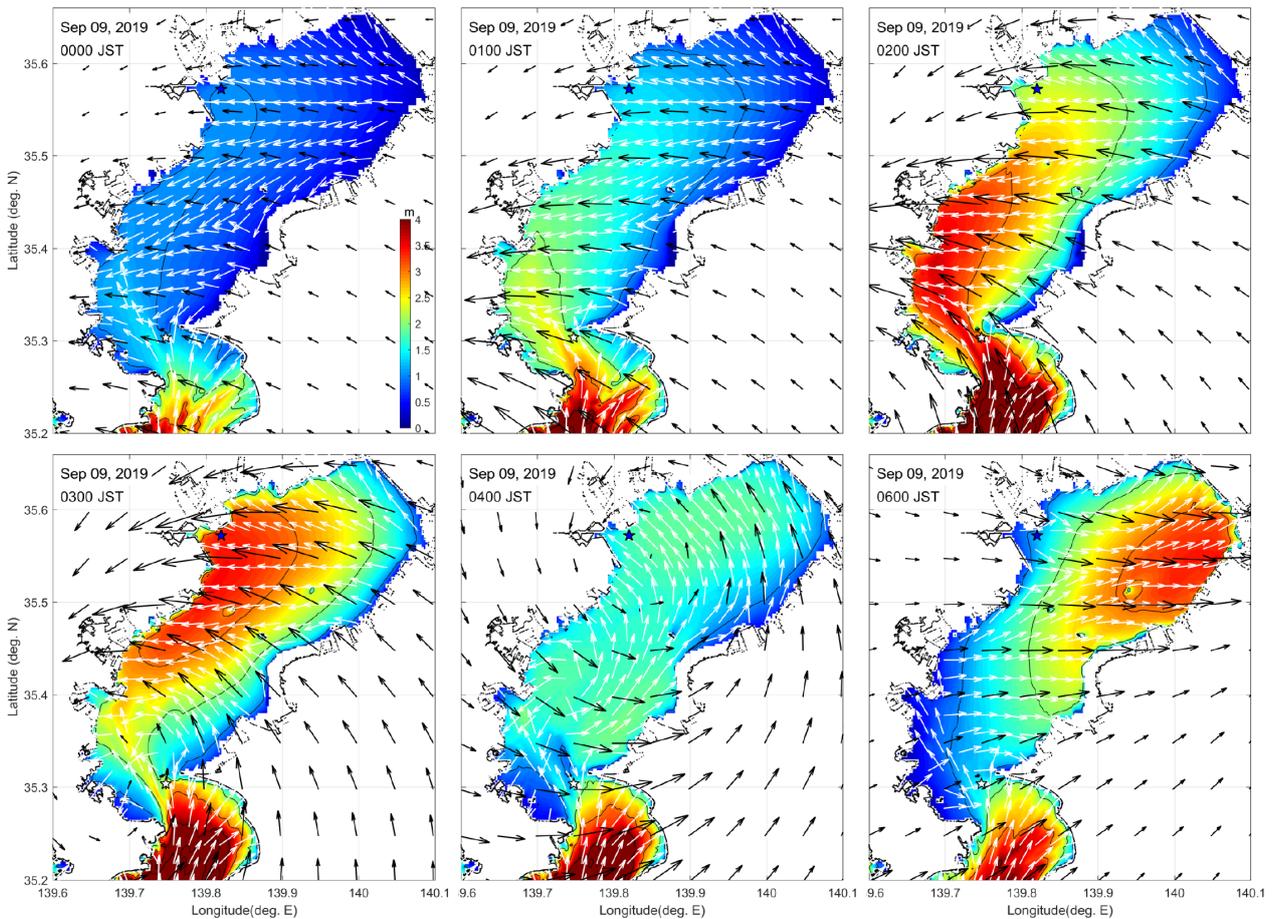


図-3.1 有義波高（カラー）、海上風速ベクトル（黒矢印）、波向き（白矢印）の時空間分布

湾口部での風速のピーク値を多少（5m/s程度）過小評価していること、2. 湾奥部でも風速の低減が生じていること、3. 風向の急転が多少緩やかなこと、といった違いも確認できる。

観測された有義波高（図-3.2c）の最大値は、湾口部および湾奥部でそれぞれ3.27 m（0240 JST）および3.39 m（0400 JST）で同程度であり、それぞれの地点でのピーク値の出現には1-2時間程度のずれがある。WW3による波浪過去再現計算結果でも最大有義波高は同程度（3 m以上）であり、また湾口部と湾奥部の出現時間の差に関しても再現することに成功している。しかしながら観測値と比較するとピーク値の出現時刻に1時間程度のずれが生じている。平均周期（図-3.2d）や平均波向き（図-3.2e）に関しては台風通過時の期間にデータ欠損が多いため詳細な比較は難しいが、おおむねモデル結果は観測結果と整合的である。

波浪スペクトル形状については、台風通過中（9月9

日0時から6時）のデータ測得率が低くモデル結果との比較には限界がある。しかしながらNOWPHAS観測記録では0300JSTにノイズの少ない海面変動が記録されており波浪スペクトルを推定することができている（図-3.3a）。波浪モデルは0.07-0.5Hzの周波数帯でのスペクトル形状とそのエネルギーレベルを精度よく再現できていることが確認できる。また台風襲来の数時間前（9月8日1600JST）から周期12秒程度のうねりが湾内に伝播していたことが観測結果とモデル結果から確認できる（図-3.3b, c）。

日本における防波堤の設計には起こりうる最大有義波高から最高波を推定して設計波とするのが一般的である（Goda 2000）。そのため最大有義波高は海岸構造物の被災に関連して工学的に重要な意味合いを持つ。台風15号の通過による最大有義波高の空間分布（図-3.4）は差異が小さく沿岸被害海域との関連性も明白ではない。図

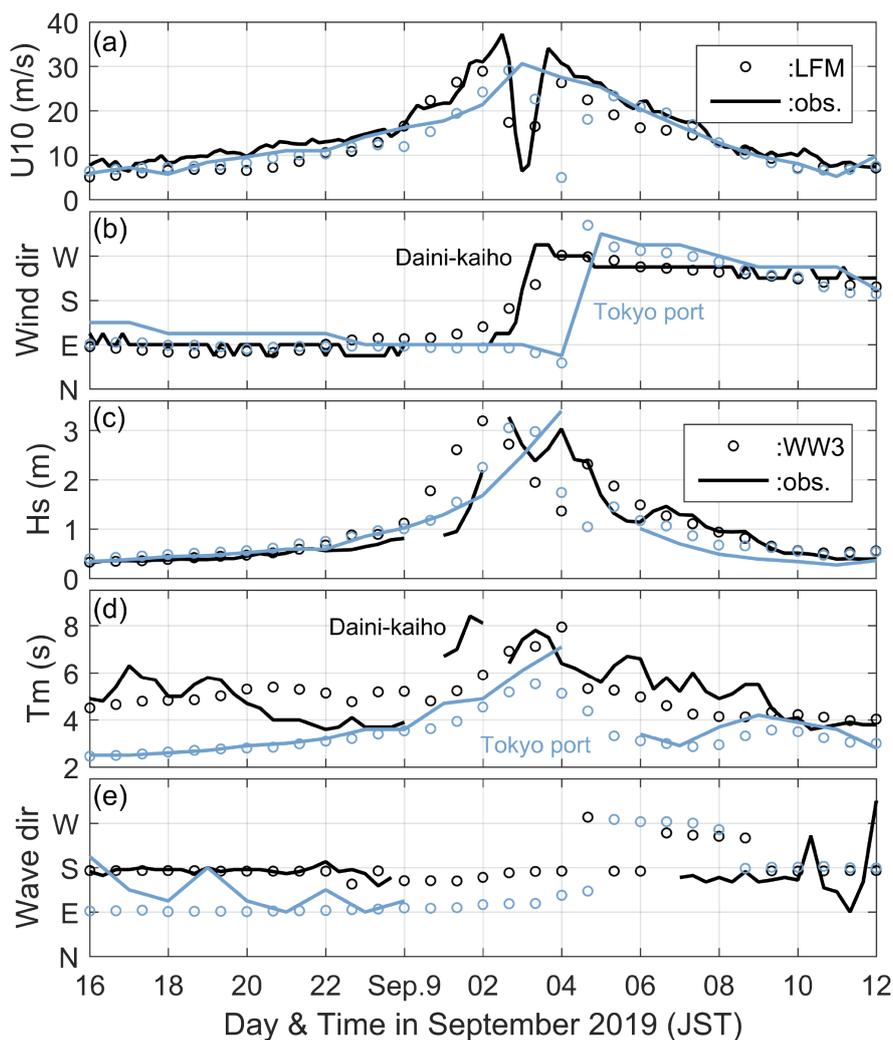


図-3.2 海上風と波浪統計量の観測値および計算値の比較（東京湾内2地点）

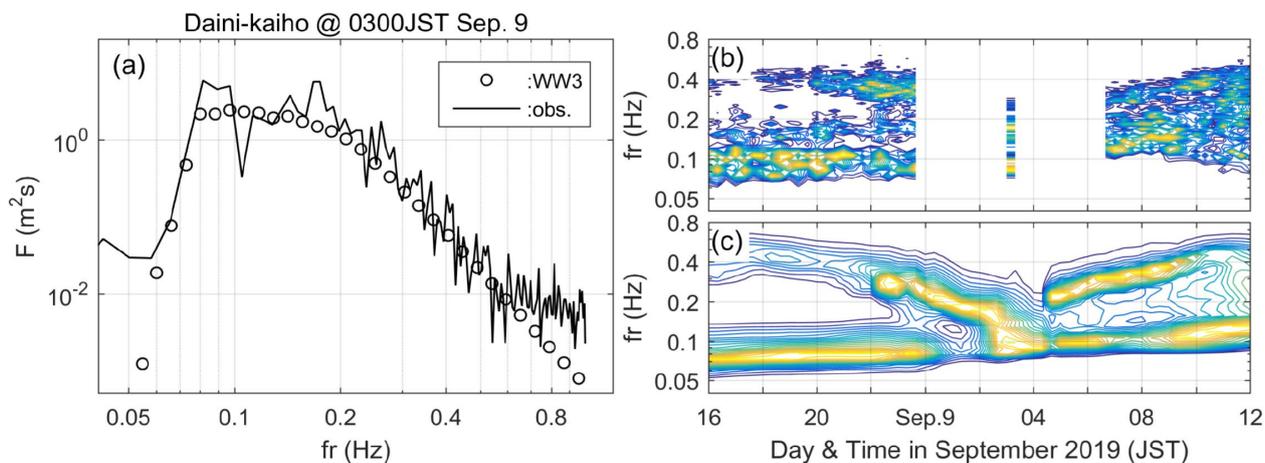


図-3.3 波浪スペクトルの観測値おとび計算値の比較

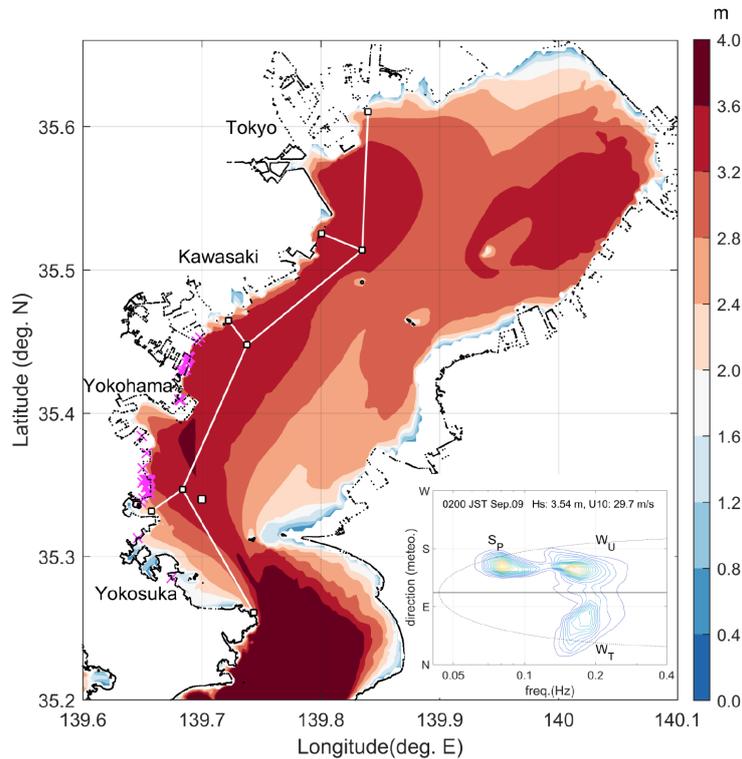


図-3.4 台風 15 号による最大有義波高および横浜港沖の 2 次元波浪スペクトル（過去再現計算）

-3.1 で示した有義波高の時空間変動からも推測できるように、東京湾内の西岸および東岸ではそれぞれ 0200-0300JST および 0600JST で有義波高が最大値となる。これに対応して湾内の西岸と東岸に分かれた 2 つのピーク海域があることがわかる。図-3.4 からわかるように沿岸被害の大きかった横浜港周辺での最大有義波高値はおおむね 3.5m 程度であり東京湾内での最高値となった。しかしながら横浜港と比較して被害の小さかった東京港や川崎港においても最大波高は 3m 以上を記録しており、湾内西岸における南北の空間分布には 10%程度の差 (3.2-3.6m) しかない。湾口部と湾奥部で観測された最大有義波高 (図-3.2c) も同程度であったこともこの結果を支持する。また顕著な沿岸被害が報告されていない東岸の千葉港周辺でも 3m 以上となっている。このことから最大波高分布と被害海域の直接的な関連性は明白ではない。

一方で、沿岸被害の集中した横浜港周辺では波高が最大となる時間帯に特異的な波浪場が形成されていた可能性がある。図-3.4 の内挿図は波浪過去再現計算によって得られた横浜港沖合 (図中の白四角) での 2 次元波浪スペクトルを示している。この図から明確な 3 つのスペクトル成分が確認される。後に示すように、これら 3 成分

は東京湾内で生成された風波成分 (周期: 5.5 s 程度, 方向: NE), 浦賀水道北部から東京湾口に向けた海域で生成された風波成分 (周期: 5.5 s 程度, 方向: SE), および太平洋で生成され浦賀水道を通じて湾内に伝搬してきたうねり成分 (周期: 12.5 s 程度, 方向: SE) から構成される。そのため、これら 3 成分をそれぞれ W_T , W_U , S_P と命名する。実線は同地点での JMA/LFM 解析値による海上風向を示しており、これまでに確認した湾内での東風の卓越と整合的な結果である。

さらに図に示した一点鎖線は Donelan et al (1985) による風波とうねりのスペクトル分離指標であり、各成分波に対する波齢の逆数を用いて次のように表される。

$$U_{10} \cos (\theta - \phi) / c = \alpha \quad (1)$$

ここで、 U_{10} : 10m 高度における風速, θ : 成分波の波向き, ϕ : 風向, c : 成分波の位相速度, $\alpha = 0.83$ である。この区分で $\alpha > 0.83$ のスペクトル領域に存在する成分波は、海上風からエネルギーを受け取り風波として成長する。このスペクトル形状は次の 2 つの点において特徴的である。

- (1) 横浜港周辺および東京湾で卓越した東風 (30 m/s) に対応する波向き成分波が存在しないこと。
- (2) 波浪スペクトルは 3 成分波で構成され、それら全

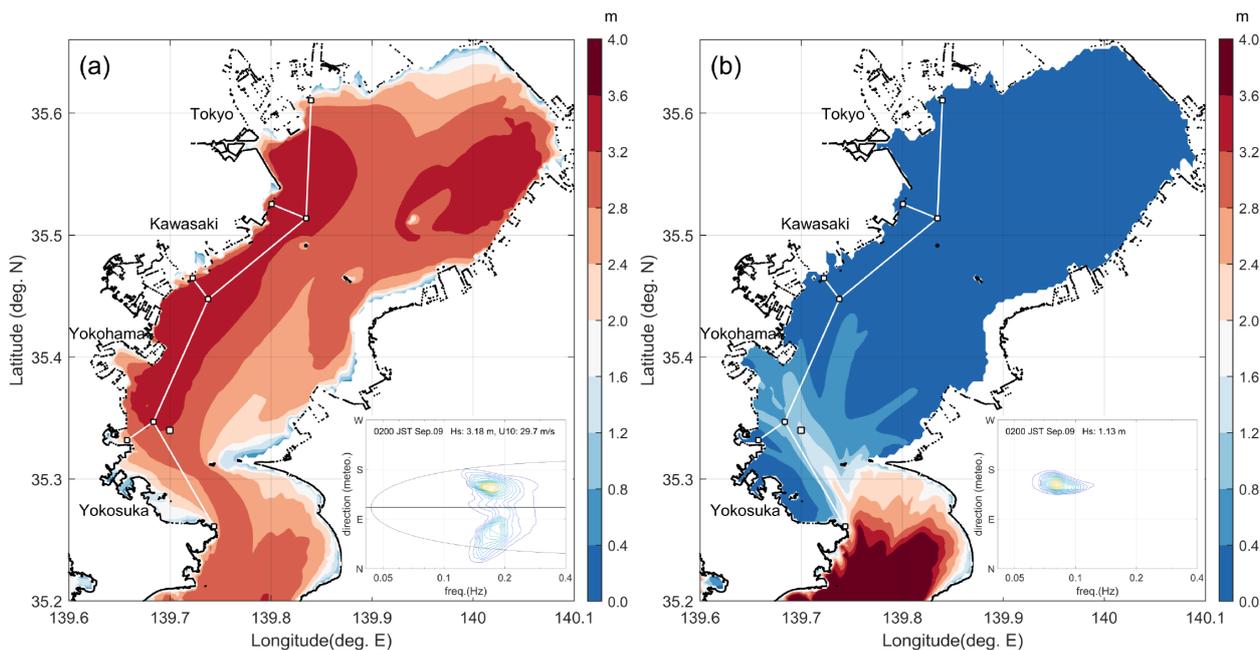


図-3.5 台風15号による最大有義波高および横浜港沖の2次元波浪スペクトル（数値実験）

てが風波領域内に存在すること。

例えば周波数スペクトルに JONSWAP スペクトル (Hasselmann et al., 1973), また方向スペクトルに光易型方向分布関数 (Mitsuyasu et al., 1975) を仮定すると, $\alpha > 0.83$ として区分される風波スペクトル領域内には平均波向きが風向と一致する単峰の2次元スペクトルが得られる. この一般的な風波スペクトルの描像と図-3.4にみられるスペクトル形状は全く異なるものである. この非常に興味深い現象が横浜港周辺での沿岸被害と関連した可能性がある.

3.2 台風15号による風波生成とうねり伝搬の数値実験

東京湾内における高波と横浜港周辺の特異な波浪スペクトルはどのように形成されたのか? ここでは過去再現計算で得られた3つの成分波 (W_T , W_U , S_P) がどのような力学過程で生成されたのかを明確にするために WND 実験 (海上風外力でのみ駆動) および BND 実験 (境界条件でのみ駆動) の結果を解析した. 図-3.5a および 3.5b は, それぞれ WND 実験および BND 実験によって得られた最大有義波高の空間分布を示している. WND 実験の結果から, 東京湾および浦賀水道内 (図-1.1b で示した WW3-N4 計算領域) で生成される風波の最大波高は, 東京港から横浜港にかけての西岸一帯ではほぼ一様な分布となることわかる (図-3.5a). しかもその値は3 m以上に達しており過去再現計算結果 (図-3.4) と同程

度である. それに対し BND 実験の結果からは, 東京湾内に伝搬するうねりの波高が最大1 m程度であり, 更に沿岸域では0.5 m程度まで低減することがわかる (図-3.5b). 風波成分に対してうねり成分の最大有義波高は15%程度に留まる. またうねりの影響範囲は横浜港周辺に限定しており局所性が高い (図-3.5b). これらの結果から湾内の最大有義波高の空間分布には, ローカルに生成された風波の寄与が大きいことがわかる.

これらの数値実験結果から, 過去再現計算で得られた特異なスペクトルの生成機構についてもその一側面を理解することができる. 図-3.5の内挿図に示された横浜港沖合での2次元波浪スペクトルを過去再現計算結果 (図-3.4) と比較する. 過去再現計算で得られた W_T および W_U の2成分は WND 実験から得られる波浪スペクトルとその形状が一致している. また残りの1成分 S_P についても BND 実験から得られる波浪スペクトルと明確な対応関係があることがわかる. つまり W_T および W_U はその場の海域で生成された風波成分であり, S_P は遠方から伝搬し東京湾内に侵入したうねり成分であることがわかる. これらの成分波の中で S_P 成分による有義波高は W_T および W_U によるものと比較して小さいことは図-3.5で既に示した. そのため横浜港周辺での沿岸被害にはうねりの影響は小さく風波が主因であったと既往研究では言及されている (例えば, 高木ら 2019). しかしながら第4章で議論するように, 本研究では最大有義波高 (波圧)

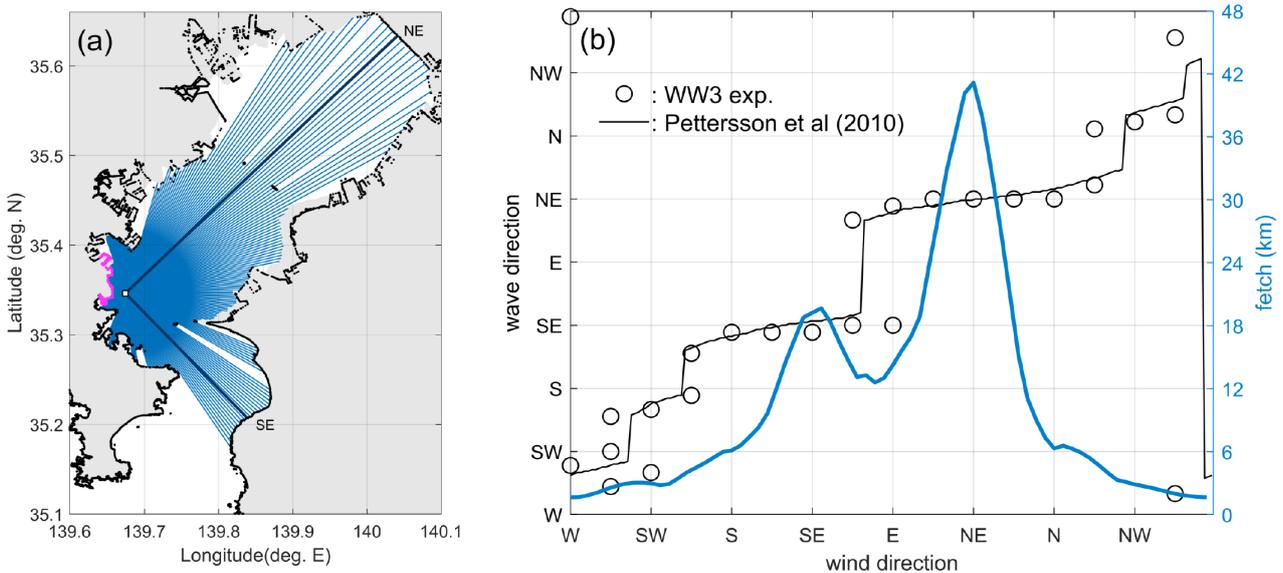


図-3.6 横浜港金沢区沖における有効吹送距離と波向き

ではなく最大エネルギーフラックス（仕事率）を用いて沿岸被害海域との対応を整理する。そのような観点からの解析は湾外から伝搬したうねり（ S_p ）が横浜港周辺での沿岸被害に重要な役割を演じていたことを示唆する。

前述のとおり、沿岸被害の大きかった横浜港沖合の2次元スペクトルの特徴は、1. 横浜港周辺で卓越した東風に対応する風波スペクトル成分が存在しないこと、2. 湾外からのうねり成分を含めた全成分波が風波領域内に入っていることである。ではなぜ台風による東寄りの海上風から北東および南東からの風波成分が生成されたのか？またどのようなメカニズムでうねりが横浜港沖に入射したのか？以降では横浜港周辺での特異的な波浪場形成過程に関して、風波の発達とうねりの伝搬に分けて議論を進める。そこから傾斜吹送距離条件下での風波発達と東京海底谷によるうねりの屈折が重要であったことを指摘する。

3.3 傾斜吹送距離条件下での風波の発達

一般的に吹送距離則は、無限に長い海岸線に対しそれに直交する海上風を仮定した波浪発達（エネルギーおよび周波数）の相似則である（例えば Young, 1999）。また平均波向きは風向に一致することを前提としている（例えば Mitsuyasu, 1968, Hasselmann et al., 1973）。しかしながら海上風が海岸線に対して傾いて吹送する場合はこの吹送距離則は機能しない。Donelan et al (1985) はオンタリオ湖における現地観測から、スペクトルピーク周辺の波向きが風向とは大きく異なり、有効吹送距離の卓越す

る方向へシフトしていることを発見した。これは傾斜吹送距離（slanting fetch）条件下における風波発達として説明される（例えば Walsh et al., 1989, Ardhuin et al, 2007）。海域の幾何学形状と風向から決まる有効吹送距離が波浪の発達に非常に重要な役割を果たす。

被害の集中した横浜港（特に金沢区沖）は、2つの楕円形状をした海域（つまり東京湾と浦賀水道の北部）のそれぞれの長軸頂点付近に位置している。そのため横浜港の中でも金沢区沖は有効吹送距離に2つの極大値を有する特殊な海域である。実際、金沢区沖合の代表点（北緯 35.35 度，東経 139.67 度：図-3.6a 中の白点）から1度刻みで吹送距離を算出すると図-3.6a に示した軌跡が描ける。これらを±15度の移動平均をかけて平均化した吹送距離が図-3.6b（第2軸）に示してある。北東および南東からの海上風に対して有効吹送距離が卓越（それぞれ 40 km および 20km 程度）することがわかる。

ではこのような海域に空間一様な海上風が吹いた場合、金沢区沖ではどのような波向きの波浪場が形成されるのか？ここでは WND 実験の追加実験として、より理想的な海上風外力下での数値実験を行った。数値実験では定常で空間一様な海上風（20m/s）を与え、風向のみを 16 方位に変えて WW3 を駆動した。なお WND 実験同様に境界からのうねりの入射は考慮していない。計算開始から3時間後（ほぼ定常状態）の2次元波浪スペクトルから、そのスペクトル極大値に対する波向きを算出した。図-3.6b 中の丸印は風向に対する波向きの対応関係を示している。非常に面白いことに金沢区沖において風向き

と波向きが一致するのは北東風および南東風の場合のみである。それに対し北東風および南東風の±70度程度の風向幅からの海上風に対して、波向きの風向依存性は小さくほぼ一定値となっている。しかもそれらの波向きは北東方向および南東方向となり、2つの卓越する有効吹送距離の方向（図-3.6a 青線）と一致する。

Donelan et al (1985)は傾斜吹送距離条件下での波浪発達の相似則を提案しており、その中でピーク周期を用いることで主波向きを推定する経験的な方法を提案している。Pettersson et al (2010)はこれを改良することでより適用範囲の広い推定式を次のように提案している。

$$\theta(f_p) = \theta_{\max}(T_p) \quad (2)$$

$$T_p = 0.459g^{-0.73} (U_{10} \cos(\theta - \phi))^{0.46} X(\phi)^{0.27} \quad (3)$$

ここに T_p : ピーク周期, $X(\phi)$: 風上方向の吹送距離（図-3.6bの青線に対応）である。この経験式から得られる波向き（図-3.6b 黒線）と比較しても WW3 の実験結果は整合的である。ただし、台風15号通過時に卓越した東風に着目すると、風向に対して1個の波向きを取る経験式では波向きが北東方向であるが、2次元スペクトルから波向きを推定する WW3 では北東方向と南東方向からの波浪が重合する結果となる。

以上の結果から、過去再現計算および WND 実験で得られた横浜港沖合の2成分波 (W_T および W_U) は、それぞれ東京湾および浦賀水道北部の2つの海域で生成された風波成分であると考えられる。またその生成メカニズムは傾斜吹送距離条件下での波浪発達として説明できる。風波は厳密にその場で生成される波浪成分ではなく、風上側での生成とその伝搬を考慮した正味の発達の結果としてある (Donelan et al 1985)。そのため台風15号による卓越する東風に対応する成分波は顕著には表れず、有効吹送距離の卓越する北東方向および南東方向からの風波が横浜港沖合に伝搬したと考えられる。

3.4 東京海底谷によるうねりの屈折と湾内への伝搬

WW3による過去再現計算と BND 実験結果より、台風15号の通過時には外洋で生成された波浪がうねりとして東京湾西岸の横浜港沖へ伝搬した可能性を示した。一般的にうねりが閉鎖性湾内に伝搬する過程では、海岸線による遮蔽や海底地形による屈折、また地形性碎波といった浅海域での力学過程などが重要となる（ただし問題を簡素化するために流れによる屈折の影響は考慮しない）。ここでは Ray 方程式による波束の伝搬実験（実験

方法に関しては第2章に記述がある）および WW3 による追加の数値実験から、台風15号によって横浜港沖合へどのようにうねりが伝搬したのか、また一般論としてどのような力学過程が東京湾内へのうねりの伝搬に重要であるのかを調べた。

まず初めに Ray 方程式中で深海波条件を適用することで屈折効果を除外した場合の結果を図-3.7a に示す。この場合、境界から等方的に入射された波束は大圏航路に沿って伝搬し、その空間密度分布と最終到達点は海岸線の幾何形状のみによって決まる。東京湾内へ伝搬する波束密度は浦賀水道内と比較して2オーダー以上小さいことが確認できる。波向きが南から南東の特定の成分波のみが観音崎から富津岬までの湾口を”すり抜けて”東京湾内へ侵入しそのまま川崎港に到達することがわかる。これが屈折の影響がなく海岸線で規定される場合の波束の伝搬経路となる。

では海底地形（つまり東京海底谷）による屈折作用はどれくらい伝搬経路に影響を及ぼすのか？屈折の影響を加味した Ray 実験結果（図-3.7b および 3.7c）では特徴的な空間構造が確認でき、屈折作用のない場合（図-3.7a）とはその様相が全く異なることがわかる。図-3.7b および 3.7c はそれぞれ波束の最終到達海域が浦賀水道および東京湾であったものを区別して示している。浦賀水道においては（図-3.7b）東西側方の房総半島および三浦半島へ向かって収束発散する筋状の構造が確認できる。等方的に入射した波束は浦賀水道内で海底地形による屈折の影響を受けてその大部分が東西側方へ分散しフィルタリング作用を受ける。そのため東京湾湾口部まで達する波束は浦賀水道内のそれと比較すると2オーダー程度まで小さくなることがわかる。

非常に興味深いことに東京湾内へ伝搬する波束の経路にも特徴的な空間構造が確認できる。東京湾内へ侵入する波束は、入射境界線上では空間的な広がりをもって分布する（図-3.7c）。しかしながら北上にともない分布範囲は狭まり、湾内へ入射する全ての波束が観音崎から沖合2km程度までの海脚地形を通過する結果となる。東京海底谷の地形（図-1.1b）と浦賀水道で捕捉される波束分布（図-3.7b）を合わせて考えると、浦賀水道中央部（水深が100m以上）の経路をたどる波束のみが屈折作用を受けず、観音崎沖合まで到達するためと推察される。しかしながら詳細に関してはさらなる定量的な解析が必要である。波束が東京湾内へ侵入すると、今度は湾内の西岸と東岸へ分岐し、しかも西岸では横浜港の金沢区沖合を中心に収束する結果となる。この結果は BND 実験によって得られる最大有義波高分布（図-3.5b）とも相似

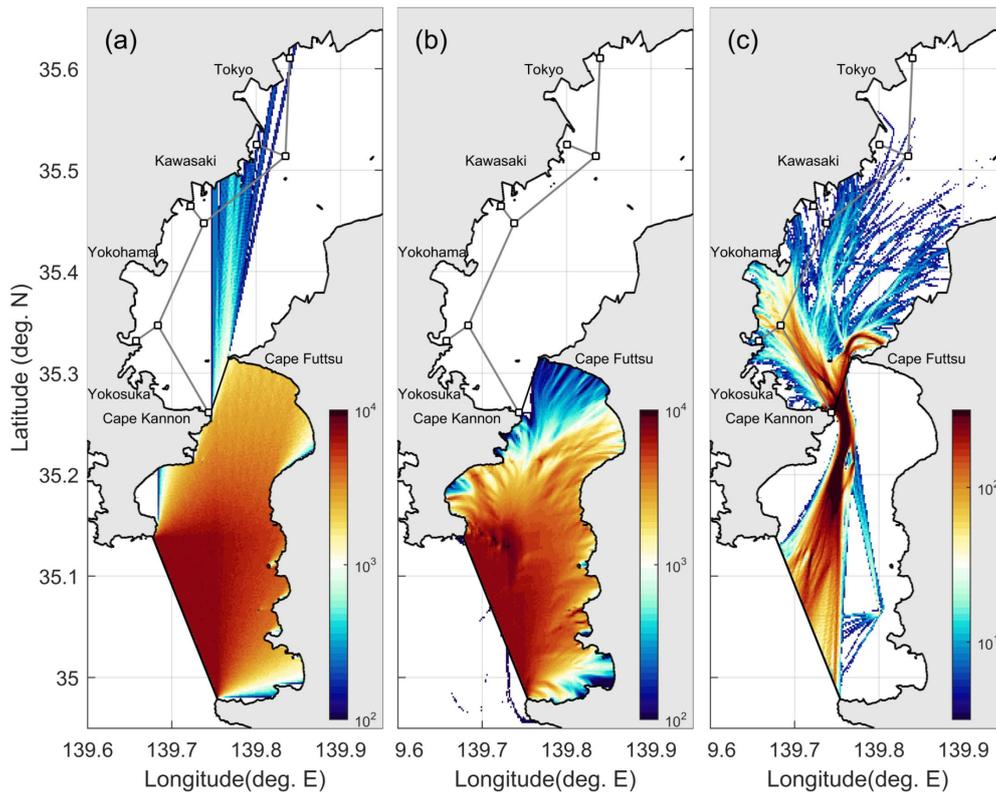


図-3.7 波束密度の空間分布 (a: 屈折なし, b: 屈折あり・浦賀水道, c: 屈折あり・東京湾内)

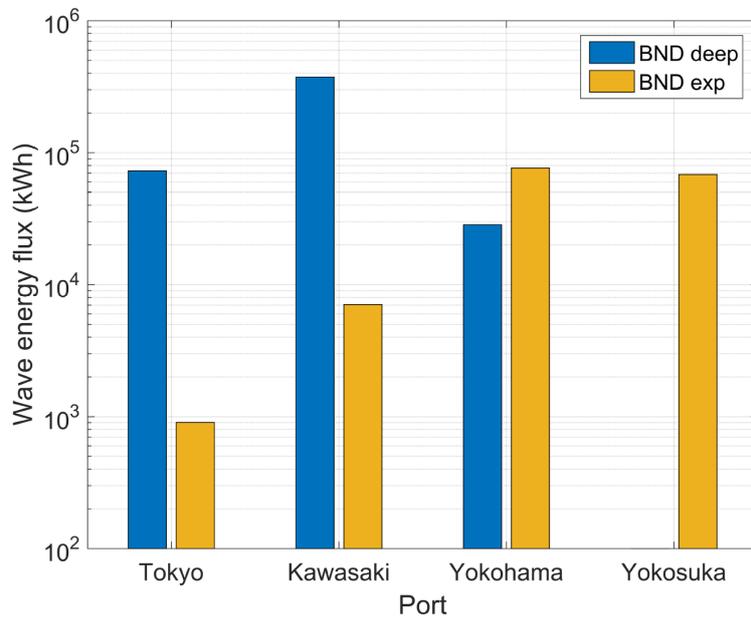


図-3.8 純粹なうねりによる各港湾へのエネルギーフラックス

性があり、いずれの結果も湾口部から横浜港金沢区沖に至る特徴的な空間構造が顕在化している。これに対し屈折効果を考慮しなかった場合には波束が主に川崎港へ直

達する結果となることから (図-3.7a), 東京湾内へのうねりの伝搬過程には観音崎沖の海底地形が極めて重要な役割を担っていると言える。

WW3による追加の数値実験からは、東京海底谷による屈折作用が東京湾内へのうねりの伝搬パターンおよび各港湾区域への波浪のエネルギーフラックスに重要であることを定量的に示す。ここではBND実験と同様に親ネスト(WW3-N3)から得られる境界条件のみで波浪モデルを駆動する。ただし2つの追加実験では、1)全ての浅海力学過程を除外するため水深を500m一様で深水波条件とした実験(BND deep)、および2)浅海力学過程を全て考慮(海底地形による屈折や地形性砕波)した実験(BND exp)を行った。これらの結果から東京湾西岸の各港湾区域へ入射するエネルギーフラックスを計算し、それらを台風の接近から通過するまでの期間(2019年9月9日0000JSTから0600JSTまで)で時間積分した(図-3.8)。海底地形の影響を全て除外した場合(BND deep)には境界から入射した成分波のエネルギーは主に東京港および川崎港へ伝搬し、一方で海底地形を考慮した場合(BND exp)には横浜港および横須賀港へのエネルギーフラックスが顕著に増大する。特に湾奥部(東京港および川崎港)では地形効果の有無でエネルギーフラックスの差が70倍にも及ぶ結果となる。これは定性的に示したRay方程式による波束追跡実験(図-3.7)と整合的である。

4. 考察と議論

4.1 東京湾を対象とした波浪モデル計算に関して

これまで示した過去再現計算や数値実験結果は東京湾における波浪モデル計算において海底地形の取り扱いが極めて重要であることを意味する。特に外洋から東京湾内へのうねりの伝搬においては観音崎沖合の海脚地形(沖合2km)を含めた東京海底谷をモデル内で適切に再現できているかが重要なポイントとなる。日本近海の海底地形として代表的なJTOPO30は空間解像度がおおよそ1km程度であり、このプロダクトを用いた波浪計算では東京海底谷の詳細な形状は取り込めない可能性がある。これは波浪モデルの空間解像度が1km程度よりも大きく格子幅が粗い場合も同様であり、また曲率の大きいうねりの屈折過程に対しても適切な方向分解能が必要であることを意味する。

台風15号による横浜港周辺での沿岸被害に関して、Suzuki et al. (2020)は倒壊したフェンスや植生の痕跡からENEおよびESE方向からの越波が卓越したことを指摘している。また、本研究と同様に第三世代波浪モデルを用いた過去再現計算からもNEおよびSEからの2方向波浪場が形成されていたことが示されている(関東地方

整備局・東京湾における高波対策検討委員会報告書、高橋ら2020)。本研究においても沿岸被害の大きかった横浜港・金沢区沖ではNEおよびSEからの風波成分(W_T および W_U)が卓越したことを示し、その発生メカニズムが傾斜吹送距離条件下での風波発達であったことを明らかにした。さらに本研究では湾外からのうねり(S_P)が東京海底谷の屈折作用を受けて湾内に伝搬し横浜港周辺に影響を及ぼした可能性を指摘した。結論として被災海域では3つの成分波(W_T , W_U , S_P)が重合した特異な海象場となっていたと考えられる。

2019年台風15号による横浜港の沿岸被害は、これまで2方向波(W_T および W_U)によってその原因が一般的に説明されてきた。それに対して本研究ではうねり性波浪の発達(S_P)といった力学過程から沿岸被害を説明する。

4.2 波パワーと被災海域の関係

海岸構造物の被災原因を完全に解明することは極めて困難である。なぜならば自然外力に加えて、構造物の経年変化、材料の劣化度、損壊に至るまでの複雑な過程を考慮しなければならないからである。すべての要素を包括的に検討することは本研究の範疇を超えている。ここでは議論を限定して波浪外力と沿岸被害海域との関係について考察を加える。前述のように最大有義波高は工学的に重要な意味を持っている。なぜなら海洋構造物の設計基準は発生しうる最大有義波高に基づいて最大波および最大波圧を推定することで設定されているからである。しかしながら波浪モデルの結果を見ると、大きな被害が報告されていない海域も含めて、湾内の最大有義波高は同程度(3+m)であった(図-3.4)。一方、被災調査では沿岸被害は湾西側の横浜港に限定されていることが確認されている。仮に湾内の海洋構造物の設計基準に極端な違いがないとすると、局所的な沿岸被害の成因を最大有義波高に求めることは難しい。これを説明するためには横浜港周辺で顕在化する何かしらの波浪外力指標が必要となる。

波浪によるエネルギーフラックスは、主に波の動圧による仕事に起因し、その仕事率(波パワー)は2次元エネルギースペクトルを用いて次のように表すことができる。

$$P = \rho_w g \iint c_g(f) F(f, \theta) df d\theta \quad (4)$$

ここに、 ρ_w : 海水密度、 c_g : 群速度である。式(4)は波浪統計量を用いて下記の通り求められる。

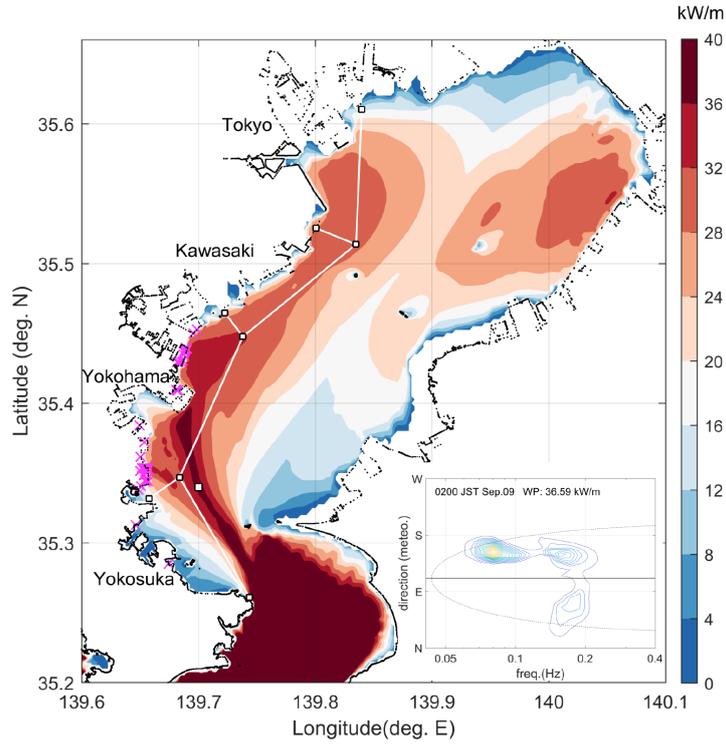


図-4.1 台風 15 号による最大波パワーおよび 2 次元スペクトル (過去再現計算)

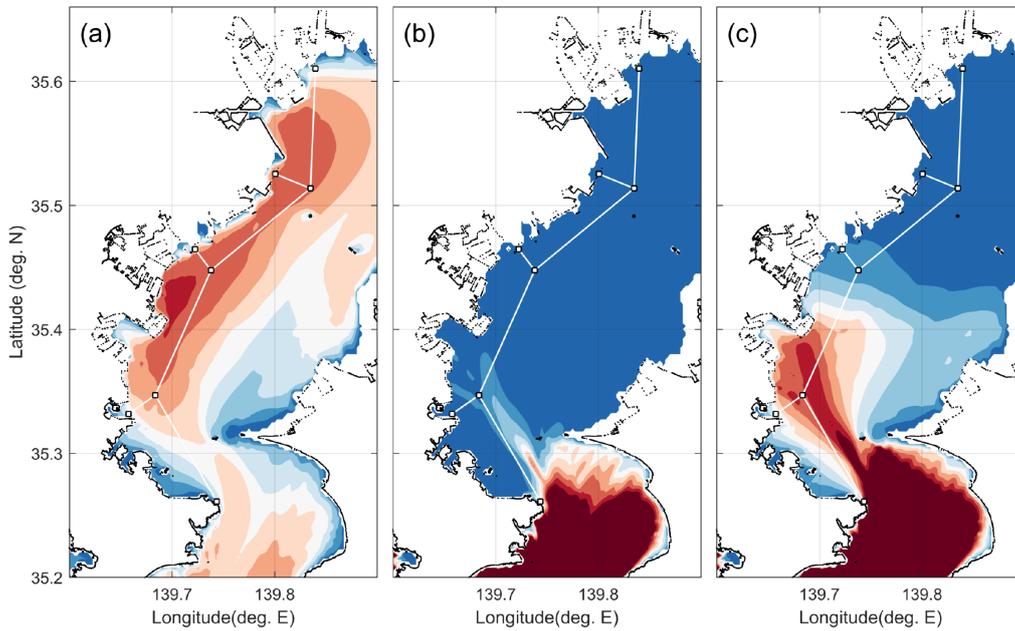


図-4.2 各数値実験による最大波パワー (a : WND 実験, b : BND 実験, c : BND 実験+局所風)

$$P = \frac{\rho_w g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (5)$$

ここに T_e : エネルギー周期 (例えば, Cornett 2008) である. 図-4.1 は台風 15 号によって引き起こされた最大波

パワーの空間分布を示している. 最大有義波高の空間分布は西海岸で 10-20%程度の差しかないのに対し, 最大波パワーは最大で 40%程度の差があり横浜港周辺に最大値が現れていることが確認できる. 少なくとも今回の台風

15号の事例では最大有義波高よりも最大波パワーの方が被災海域との関連性が高いことが示された。最大波パワーの空間分布は浦賀水道から続く筋状の極大値が横浜港周辺まで延伸しており、まさに沿岸被害が集中した横浜港・金沢区沖は東京湾内でも特異な海域となっていたことを示している。しかも湾西部へのうねりの主要な伝搬経路に対応している(図-3.7c)。図-4.1の挿入図は横浜港沖の波パワー密度を示している。図-3.4のエネルギー密度とは対照的にうねり成分 S_p の波パワー密度は風波成分 W_T や W_U の波パワー密度よりも増強され高くなる。これは波パワーが周期に比例しているためである。このことは横浜港周辺での最大波パワーの局在化には湾外からのうねりが重要であることを意味している。

4.3 東京湾内での「うねりの成長」

ではどのような力学的過程を経て横浜港に波浪外力が到達したのであろうか。図-4.2aと4.2bは前章で行ったWND実験およびBND実験で得られた最大波パワーの空間分布である。純粹なうねりの伝播によって引き起こされる最大波パワー(図-4.2b)は、風波成分(図-4.2a)のそれよりもはるかに小さいことがわかる。これは図-3.5に示した最大有義波高の空間分布と一致している。一方で、図-4.2cは局地的な海上風外力(35.4°N以南の海域)に加えて、境界からのうねりの入射を行った場合の最大波パワーを示している。この結果は図-4.1に示した浦賀水道北部から横浜港にかけての最大波パワーの帯状分布を再現していることがわかる。

一般的に、長波長で伝搬速度の速いうねりは、その場の海上風への緩やかな上向き運動量輸送(つまりうねりのエネルギー減衰)をとめないながら遠方まで伝搬する(例えばMunk et al., 1963)。そのため外洋域においてうねりの成分波は式(1)で $\alpha < 0.83$ のスペクトル領域に位置するのが普通であり、そこでの成分波の成長率は負となる(例えば, Donelan et al., 1999, Tamura et al., 2018)。しかしながら上記で指摘したように、台風15号の場合にはうねりの成分波 S_p は成長率が正(つまり $\alpha > 0.83$)のスペクトル領域に入っており(図-3.4中のスペクトル)、うねりの伝搬に際して通常とは異なる力学機構が働いた可能性がある。台風15号による東京湾内での強風速は30m/s(時速100km程度)にも達し、これは湾内に侵入したうねりの伝搬速度(~15m/s)を大きく上回った。しかも東寄りの海上風と南東へのうねりの伝搬方向が概ね揃うことで、うねり成分 S_p が浦賀水道北部から横浜港沖合に伝搬する過程で海上風からのエネルギーを受けて発達したと考えられる。このことが横浜港周辺にのみ限定

された波浪外力を引き起こし、沿岸被害を引き起こしたものと推察される。

5. おわりに

本研究では2019年9月に発生した台風15号による東京湾内での沿岸被害がどのような海象条件下でもたらされたのかを解明することを目的として波浪モデルによる数値実験およびデータ解析を行った。波浪計算では過去再現計算に加えて、海上風外力および境界条件を外力とする数値実験を行うことで、ローカルに生成される風波の影響および外洋から東京湾内へ伝搬するうねりの影響に関してそれぞれ調べた。台風15号の通過による最大有義波高の空間分布は差異が小さく沿岸被害海域との関連性は明白ではなかった。一方で、沿岸被害の集中した横浜港周辺では波高が最大となる時間帯に特異的な波浪場(3成分波スペクトル)が形成されていた可能性を示した。またそれらの成分波が東京湾および浦賀水道北部の2つの海域で生成された風波成分、および外洋で生成された波浪がうねりとして東京湾西岸の横浜港沖へ伝搬した可能性を示した。これらの特異なスペクトル形状を形成する力学メカニズムとして、傾斜吹送距離条件下での風波の発達と東京海底谷の屈折作用の重要性を指摘した。

既往研究と同様に、本研究においても横浜港沖合では北東および南東からの2方向風波が発生する特異な海象場であった可能性を示した。しかしながら横浜港周辺に甚大な被害をもたらしたのはこれら2方向波ではなく、湾外からのうねり性波浪に起因する可能性が高いと本研究では結論付けた。実際、有義波高の自乗と平均周期の積で算定される最大波パワー(エネルギーフラックス)の空間分布は、浦賀水道から続く筋状の極大値が横浜港周辺まで延伸し、まさに沿岸被害が集中した横浜港・金沢区沖は東京湾内でも特異な海域となっていたことが示された。これは台風15号による強風下でうねりが急速に発達しながら金沢区沖まで到達したためであると考えられる。

(2021年6月4日受付)

謝辞

NOWPHAS波浪観測データは国土交通省港湾局および関東地方整備局からご提供いただき、また使用に際してはNOWPHASデータ処理班から多大なご支援を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 関東地方整備局:<https://www.pa.ktr.mlit.go.jp/kyoku/takanami/takanami.html>
- 高木泰士, Md Rezuhanul ISLAM, Le Tuan ANH, 高橋篤平, 杉生高行, 古川郁貴: 2019年9月台風15号による神奈川県・千葉・茨城の高波被害および東京湾の波浪追算, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.76 No.1, 2020
- 高橋康弘, 高山知司, 遠藤敏雄, 鈴木善光, 浜口正志, 松藤絵理子, 石本健治, 原信彦: 東京湾における台風1915号による波浪スペクトル特性と対策施設整備の留意点, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol76, No2, I_193-I_198, 2020
- Arduhin, F., T. H. C. Herbers, K. P. Watts, G. P. van Vledder, R. Jensen, and H. C. Graber : Swell and Slanting-Fetch Effects on Wind Wave Growth. *J. Phys. Oceanogr.*, 37, 908--931. <https://doi.org/10.1175/JPO3039.1>, 2007
- Chiba, T., S. Kaneda, Y. Suzuki : Red Relief Image Map: new visualization method for three-dimensional data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing ISPRS Vol. XXXVII. Part B2, 1071--1076.*, 2008
- Cornett, A. M. : A Global Wave Energy Resource Assessment. *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2008
- Donelan, M. A., J. Hamilton, and W. H. Hui. : Directional spectra of wind-generated waves. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, 315A, 509--562., 1985
- Donelan, M. A. : Wind-induced growth and attenuation of laboratory waves. *Proceedings of institute of mathematics and its applications (UK) conference wind-over-wave couplings. Oxford University Press, Oxford*, 183--194., 1999
- Gallet, B., and W. R. Young : Refraction of swell by surface currents. *Journal of Marine Research*, 72, 2., 2014
- Goda, Y. : *Random Seas and Design of Maritime Structures.*, Adv. Ser. Ocean Eng., vol. 15, 443 pp., Univ. of Tokyo Press, Tokyo, Japan., 2000
- Hasselmann, K., and Coauthors : Measurements of windwave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." *Dtsch. Hydrogr. Z.*, 8, 1--95., 1973
- Kossin, J. P., K. A. Emanuel, G. A. Vecchi : The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity. *Nature*, 509, 349--352., 2014
- Mei, W., and S. P. Xie : Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s. *Nature Geosci.*, 9, 753--757., 2016
- Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda, and K. Rikiishi : Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. *J. Phys. Oceanogr.*, 5, 750--760., 1975
- Munk W. H., G. R. Miller, F. E. Snodgrass and N. F. Barber : Directional recording of swell from distant storms, *Phil. Tran. of the Royal Soc. London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*255505--584, 1963
- Pettersson, H., K. K. Kahma, and L. Tuomi : Wave Directions in a Narrow Bay. *J. Phys. Oceanogr.*, 40 (1): 155--169. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4220.1>, 2010
- Suzuki, T., Y. Tajima, M. Watanabe, N. Tsuruta, H. Takagi, T. Takanabe, K. Suzuki, T. Shimozono, Y. Shigihara, T. Shibayama, S. Kawaguchi, and T. Arikawa : Post-event Survey of Locally Concentrated Disaster Due to 2019 Typhoon Faxai along the Western Shore of Tokyo Bay, Japan. *Coastal Engineering Journal*, doi:10.1080/21664250.2020.1738620., 2020
- Tamura, H., W. M. Drennan, C. O. Collins, and H. C. Graber : Turbulent airflow and wave-induced stress over the ocean. *Boundary-Layer Meteorol.*, 169:47--66., 2018
- Tolman, H. L. : User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, Camp Springs, Md., 2009
- Walsh, E. J., D. W. Hancock III, D. E. Hines, R. N. Swift, and J. F. Scott. : An observation of the directional wave spectrum evolution from shoreline to fully developed. *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 1288--1295., 1989
- Young, I. R. : *Wind Generated Ocean Waves.*" Elsevier Science, 288 pp., 1999

港湾空港技術研究所報告 第60巻 第1号

2021.6

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2021) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

1. Cyclic Beach Morphological Changes in the Swash Zone
due to Tidal Range Fluctuations
Masayuki BANNO · Yoshiaki KURIYAMA
2. Ocean swells induced by the Typhoon Faxai hit Port of Yokohama in 2019
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takumu IWAMOTO · Takashi FUJIKI
3. Dynamics of ocean swells in Toyama Bay
Hitoshi TAMURA · Koji KAWAGUCHI · Takashi FUJIKI
4. Study on Stability of Temporary Armor Units against Waves
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Tsutomu TANAKA
5. Study on Wave Pressure acting on Receding Parapet type Seawall
Kojiro SUZUKI · Hiroki KUBOTA · Naoki TSURUTA
6. Study of slow slip mechanism on plate boundary fault decollement zone
Yuri SUGIYAMA · Shinya TACHIBANA · Yoshiyuki MORIKAWA
7. Development of frictional contact algorithm using weighted least squares for MPM-rigid body
simulation and its application to behavior of open-ended pile driven into the ground
Keita NAKAMURA · Satoshi MATSUMURA · Takaaki MIZUTANI