

2019 年台風第 15 号による本牧の波浪 Honmoku Waves Due to Typhoon No. 15 in 2019

和田光明
Mitsuaki Wada

Typhoon 1915 (FAXAI) damaged the office building of the Honmoku Sea Fishing Facility. The wave height and water level reached at that time were estimated by the SMB method using the observation data of the Haneda wind. Furthermore, the maximum wave and the reaching water level in front of the facility were estimated from the figures and calculation formulas used in the field of coastal engineering. The estimated offshore wave height is 3.3m at maximum at 3:00 am on September 9, 2019. The maximum wave in front of the disaster area estimated using the wave was 5.5m, and the water level reached from 5.0m to 6.3m. Since the office building itself has not been destroyed, it is considered that the damage was caused by the maximum wave.

1. はじめに

令和元年(2019 年)の台風第 15 号(FAXAI) は、同年 9 月 5 日に南鳥島近海で発生し、図 1 に示すように、9 日未明に相模湾を通過し、午前 3 時前に三浦半島を通過後、中心気圧 960hPa を維持したまま東京湾を北東に進み、午前 5 時前に千葉県千葉市付近に上陸後鹿島灘に抜けた。

この台風の通過により、千葉県を中心に強風被害が発生した。また、東京湾では横浜市を中心に高潮や高波による海岸施設の被害や浸水被害が発生した。

藤木 峻(2020)は、第 3 世代波浪モデルで SWAN より FAXAI 通過時の東京湾の波高分布を計算している。平山克也(2020)は被害を受けた藤木 峻(2020)の計算結果を横浜市金沢地区福浦地区の波浪変形や越波浸水の計算を行っている。

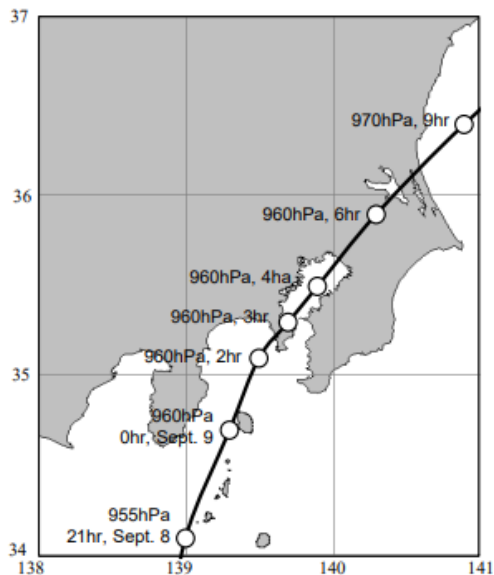


図 1：台風 FAXAI にコースと中心気圧。○印左の数値は上から中心気圧と日時(日本時間)。

河合弘泰他(2020)



図 2：被害を受けた本牧海釣り施設。

2019 年 9 月 10 日毎日新聞朝刊

横浜港本牧埠頭の D 突堤にある本牧海釣り施設では栈橋だけでなく図 2 のように事務所の 2 階まで波を受けてガラスが割れ、室内設備が外部に流

された。9月10日の毎日新聞の記事によると、施設長の談で「過去に2階まで波が来たことはない。想像をはるかに超えていた。」と記述されている。今回は、どの程度の波となったか推定した。



図3：本牧海祭り施設と観測所の位置(上)と上の赤枠で囲んだD埠頭周辺の拡大図(下)

2. 解析手法の概要と使用データ

合田良實(1976、1978)や港湾施設の技術上の基準・同解説(上)(2018)では海の中の構造物に対する波の作用を推定するためには、沖合で風を受けて発生・発達した波が伝搬する過程でどのように変化するかを知る必要があるとしている。

同施設は図3に示すように東京湾西部に位置し

ていて、東方向は東京湾が広がっている。ここでは、東京湾を代表する風の観測点として気象庁アメダスの羽田(図3)の風を用いてSMB法で沖波波浪を推定し、屈折、浅水変形、砕波後の波高などは、合田良實(1978)の教科書や港湾施設の技術上の基準・同解説(上巻)(2018)に掲載されている図を使用して求めた。これらを使用することで、変形後の波浪を簡易に求めることが可能である。

波浪は平均的な海面の上下運動のため、構造物に対する被害に対しては、潮位を考慮した海水面の高さを推定する必要がある。このため、海上保安庁観測の横浜新港(図3上図)の潮位を考慮して到達水位を求めた。

3. 本牧海祭り施設の立地状況

本牧海祭り施設は、図3に示すように、横浜港本牧埠頭のD突堤にある。同施設は東京湾西部に位置していて主に東北東方向が広い海域になっている。

海底地形は図4に示すように、本牧海祭り施設東側の等深線は南西から北東に走向するほぼ平行等深線である。また、同施設前面海低地形は、海上保安庁発行の海図Chart108(図は省略)によると、水深22mの平坦な地形である。



図4：本牧海祭り施設周辺の海底地形。実線は等深線を示す。

海上保安庁発行東京湾北部の海底地形部第6363号9を改良。

被災した事務所棟のある地盤は、図3で示した地図によると標高3mである。事務所棟は盛り土上にある。前面の護岸は直立護岸である。

4. 沖波波浪の計算

沖波波浪を推定するために使う波浪推算方法は SMB 法を使用した。第 2 次世界大戦中の上陸作戦のため、アメリカ海軍は波浪予報手法の開発を海洋学者 Sverdrup と当時大学院生だった Munk に委託した。彼らは、実際には複雑で多彩な波の状況を有義波という単一の代表値を導入して表現し、最初の実用的な予測手法を作り上げた。その成果は戦時中ということでもあり秘匿されたが、戦後になって公開された。その後 Bretschneider を初めとする多数の研究者によって改良が続けられ、1950 年から 1970 年代にかけて精度のよい実用的波浪予測手法として確立された。特に Bretschneider の貢献は大きく、3 人の名前をとって、SMB 法と呼ばれる。

以下に示す、式(4.1)～式 (4.3) は SMB 法の推定式である。

$$\frac{g H_{1/3}}{U^2} = 0.30 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + 0.004 (g F / U^2)^{1/2} \right]^2} \right\} \quad (4.1)$$

$$\frac{g T_{1/3}}{2\pi U} = 1.37 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + 0.008 (g F / U^2)^{1/3} \right]^5} \right\} \quad (4.2)$$

$$\frac{g t_{\min}}{U} = \int_0^{\frac{g F}{U^2}} \frac{d(g F / U^2)}{g T_{1/3} / 4\pi U} \quad (4.3)$$

ここで、 U は風速、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{1/3}$ は有義周期、 F は吹走距離、 $t_{\min}$ は最小吹続時間、 g は重力加速度である。

推定地点に向かう風が吹いている範囲の長さ(吹走距離)と、その風が吹いている時間から式(4.2)を使用して求めた距離の小さい方を F として式(4.1)と式(4.2)に代入して、有義波高、有義周期(以後、それぞれ波高、周期と表現する。)を求める。

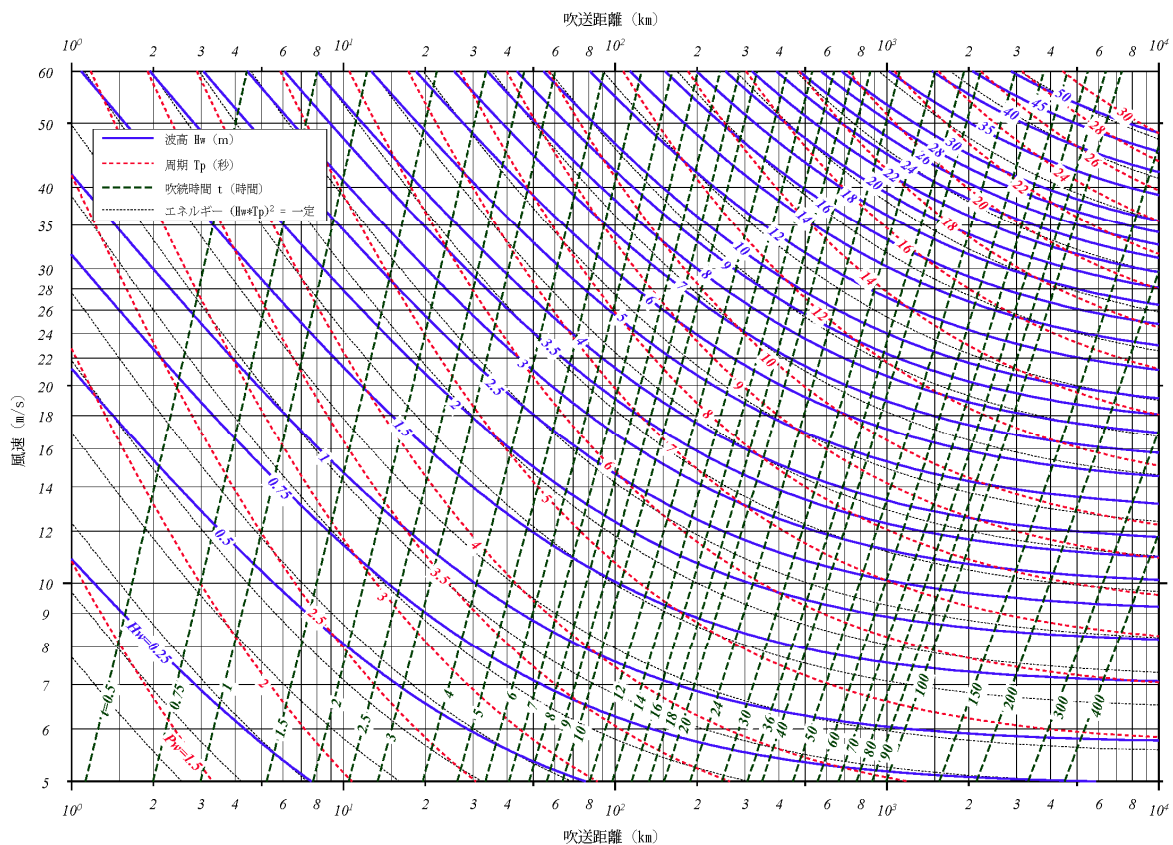


図 5：風浪の推算図

横軸は吹走距離(km)、縦軸は風速(m/s)である。波高(m)、周期(秒)、吹続時間(時間)の値はそれぞれ実線、破線、長破線であらわされる。点線は等エネルギー線である。

羽田(アメダス)の観測記録によると、2021 年 9 月 8 日 24 時～9 月 9 日 3 時の間、表 1 に示すように風向は東北東であった。図 3 上からもわかるように、本牧海つり施設のこの方向は離岸距離が最も長いので、この風を使い、波浪を推定した。吹走距離は Web 上の国土地理院地図より求め、34 km とした。

表 1 : 2021 年 9 月 8 日 24 時～9 月 9 日 3 時の羽田の風向風速

日 時	8日24時	9日1時	9日2時	9日3時
風 向	東北東	東北東	東北東	東北東
風速 (m/s)	15.2	16.9	20.8	29.8

SMB 法による風浪推定図は水理公式集(1999)や多くの海岸工学関連の書籍に掲載されているが、ここでは図 5 に示す高野洋雄(2011)が作成した図を使用した。波浪推算図を用いて波浪を求める場合は、ある風速に対し地図上で求めた吹走距離による波高と、吹送時間により求めた波高を比較し、小さい方の波高が求める波高と周期になる。

推定において、各時刻に観測された風が前 1 時間継続し、その時刻になると次の時刻の風が変わるとした。例えば、8 日 24 時の波浪は風速 15.2m/s の線と吹走時間 1 時間との交点に対応する吹走距離と地図上で求めた吹走距離 34 km を比較して、短い方の吹走距離に対応する値が求める波高になる。実際には吹走時間 1 時間で求めた波高の方が吹走距離(この場合 34 km)よりも低いため、求める波浪は、波高が 0.8m で周期は 2.8 秒になる。次に、エネルギー曲線に沿って次の時刻の風速に上昇させ、そこから 1 時間後の 9 日 1 時の値、波高 1.3m、周期 3.8 秒を求める。同様な方法により求めた波高と周期の値は表 2 に示すように、9 日 3 時には波高 3.3m、周期 5.8 秒となった。

表 2 : SMB 法で求めた 2019 年 9 月 8 日 24 時～9 月 9 日 3 時の波高と周期。

日時	8日24時	9日1時	9日2時	9日3時
波高 (m)	0.8	1.3	2.0	3.3
周期 (秒)	2.8	3.8	4.8	5.8

6. 波浪変形計算

6.1 波浪の屈折

波は波長が 1/2 の水深になると海底摩擦の影響で向きを変え最終的には海岸線に平行になる。ま

た、波は屈折により波高に変化が生ずる。

図 6 は水深 h_1 から水深 h_2 に入った波の屈折の概念図である。図 6 で波向線 1 と波向線 2 を横切って横方向への波エネルギーの流出はないとする。その場合、水深 h_1 から水深 h_2 へと進んだ波高の変化式は式(6.1.)のようになる。

$$\frac{H}{H_0} = K_r = \sqrt{b_1 / b_2} \quad (6.1)$$

ここで、 H は屈折後の波高、 H_0 は屈折前の波高、 b_1 と b_2 はそれぞれ屈折前と後の波向線 1 と波向線 2 の幅である。 K_r は屈折係数である。

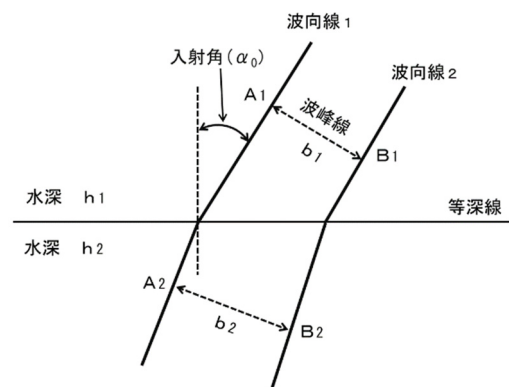


図 6 : 屈折の概念図。

深海波の波長 L (m)と周期 T (秒)の関係は式(6.2)のようになる。

$$L = 1.56T^2 \quad (6.2)$$

前項で求めた、9 日 3 時の波浪の波長は式(6.2)から 52.5m になるため、水深 26m から屈折を考慮する必要がある。本牧海つり施設の前面海域は水深 22m であるため、屈折後の波高を求めなければならない。

図 4 からわかるように、当施設の前面海域は水深 30m から南西か北東方向に走向するほぼ直線状の平行等深線みなせるので、図 7 に示す合田良實(1978)の直線状平行等深線における不規則波の屈折係数を求める図を使用して屈折係数を求め、屈折後の波高を求めた。図 7 にある S_{max} は方向集中度パラメータで、以下のように分類される(合田良實 : 1978)。

①風波 : $S_{max} = 10$

②減衰距離の短いうねり（波形勾配が大）：

$$S_{\max}=25$$

③減衰距離の長いうねり（波形勾配が少）：

$$S_{\max}=75$$

今回の波浪は、減衰域が無いため、 $S_{\max}=10$ の図を使い屈折係数を求めた。

周期 5.8 秒に対する波長 L_0 は式(6.2)より

$$L_0=1.56 \times 5.8^2=52.5\text{m}$$

である。屈折が始まる水深は 26m で本牧海つり施設前面の海域の水深は 22m であるので、平均水深は 24m として屈折係数を求める。水深波長比 $h/L_0=0.45$ となり、入射角 $\alpha_p=67.5^\circ$ であるので、図 7 の $S_{\max}=10$ の図より、屈折係数 $K_r=0.95$ となり、屈折後の波高 $H=3.1\text{m}$ となる。

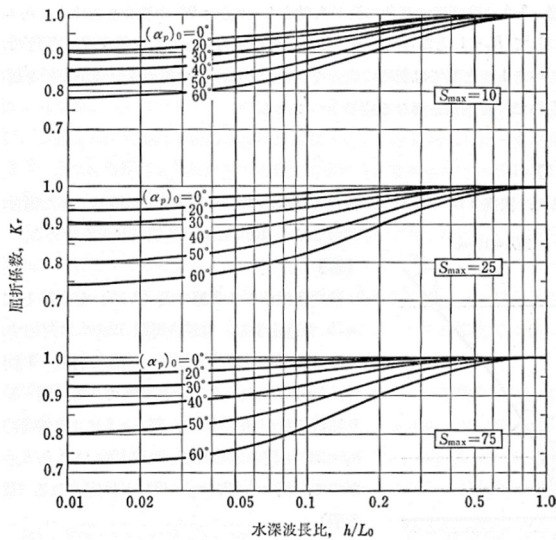


図 7：直線状平行等深線海岸における不規則波の屈折係数。横軸は水深 h と波長 L_0 による水深波長比 h/L_0 で縦軸は屈折係数 K_r である。 α_0 は波の入射角である。

6.2 砕波帯内の波高の計算

合田良實(1978)によると、式(6.3)から式(6.6)の略算式を用いて砕波帯内の波高を求めてもよいとしている。

$$H_{1/3} = K_s H_0' : h/L_0 \geq 0.2 \quad (6.3)$$

$$H_{1/3} = \min \left\{ \left(\beta_0 H_0' + \beta_1 h \right), \beta_{\max} H_0', K_s H_0' : h/L_0 < 0.2 \right\} \quad (6.4)$$

$$H_{\max} \equiv H_{1/250} = 1.8 K_s H_0'$$

$$: h/L_0 \geq 0.2 \quad (6.5)$$

$$H_{\max} \equiv H_{1/250} =$$

$$\min \left\{ \left(\beta_0^* H_0' + \beta_1^* h \right), \beta_{\max}^* H_0', 1.8 K_s H_0' \right\}$$

$$: h/L_0 < 0.2 \quad (6.6)$$

ここで、 K_s は浅水係数、 H_0' は沖波波高(砕波帯前の波高)、 h は水深、 L_0 は波長である。式(6.3)から式(6.5)の略式係数は表 3 である。

表 3：砕波帯内の波高の概算係数

$H_{1/3}$ の略算係数
$\beta_0 = 0.028 (H_0'/L_0)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta)$ $\beta_1 = 0.52 \exp(4.2 \tan \theta)$ $\beta_{\max} = \max \left\{ 0.92, 0.32 \left(H_0'/L_0 \right)^{-0.29} \right\} \times \exp(2.4 \tan \theta)$
$H_{\max}$ の概略係数
$\beta_0^* = 0.052 \left(H_0'/L_0 \right)^{-0.38} \exp(20 \tan^{1.5} \theta)$ $\beta_1^* = 0.63 \exp(3.8 \tan \theta)$ $\beta_{\max}^* = \max \left\{ 1.65, 0.53 \left(H_0'/L_0 \right)^{-0.29} \right\} \times \exp(2.4 \tan \theta)$

注： $\max\{a, b\}$ は a 又は b のいずれかの大きい値

6.1 項で求めたように波長 L_0 は 22m であり、同施設の前面海域の水深 h は 22m であるので、式(6.3)から式(6.6)を使用するための判別条件は

$$h/L_0=0.41 \quad (6.7)$$

となり、0.2 よりも小さい。また、本牧海つり施設の事務所棟そのものが壊れていないという被災状況から、最大波によるものと考えた。このため、式(6.5)を使用して砕波帯内の波高を計算する。浅水係数 K_s は合田良實(1975、1978)による図 8 を使用する。

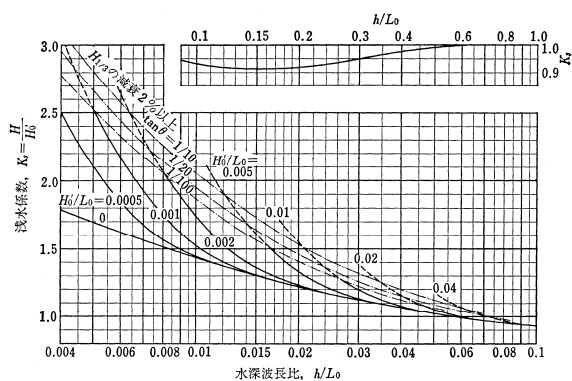


図 8：浅水係数の算定図。

横軸は水深波長比 h/L_0 、縦軸は浅水係数 K_s である。 H は入射後の波高、 H_0 は入射前の波高、 h は水深、 L_0 は波長である。曲線は、 H_0/L_0 である。

図 8 に示した算定図を使用するために、水深波長比 h/L_0 は式(6.7)から 0.41 である。図 8 の上方の図から 0.41 の目盛りから下方に描かれている

実線に対応する浅水係数 K_s の目盛りを読むと 0.98 である。このため、式(6.5)を使用して計算すると、

$$H_{\max} = 1.8 \times 0.98 \times 3.1 = 5.5$$

となり、求める波高は 5.5m になる。

6.3 岸壁前面の波高

本牧海つり施設のある護岸前面には波消ブロックが設置されていない直立護岸である。このため、森本倫生他(1965)、合田良實(1976)に図 9 に示した半無限堤防による回折図（厳密解）直立防波堤の場合の図を使用して、護岸前面の波高を求めた。図 9 によると、岸壁の前面（図 9 では防波堤）は波高が 1.5 倍から 2 倍になる。このため、本牧海つり施設での波高は、8.3m から 11.0m になる。

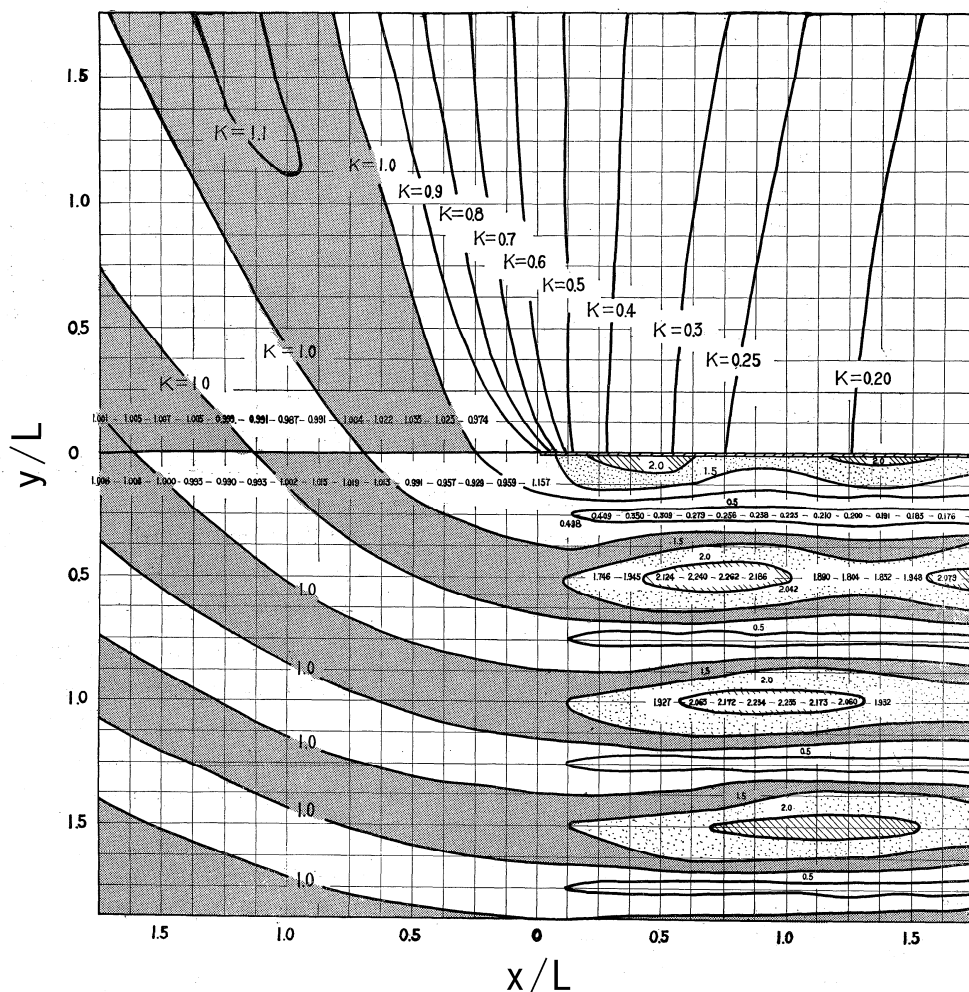


図 9：半無限長防波堤周辺の規則波の波高分布。 x は堤防先端からの距離、 L は波長である。

7. 潮位を考慮した海水面の高さ

波浪は平均海面を基準とした海水面の上下運動である。波浪による海水面の到達水位は平均海面に波高の半分の高さ加算した値となる。図 10 は、海上保安庁が横波港で観測している潮位の観測記録である。

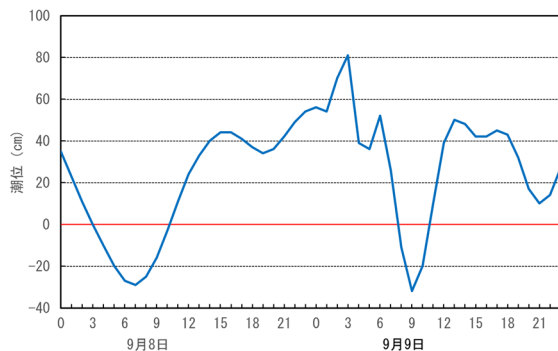


図 10：2019 年 9 月 8 日から 9 月 9 日の海上保安庁横浜新港の潮位変化。横軸は日時、縦軸は潮位(cm)。潮位 0 cm は T.P=0 cm。

波高を計算している 9 月 9 日午前 3 時の潮位観測記録は、81 cm である。計算された波高は 8.3m から 11.1m であるので、その 1/2 の値に潮位 81.5 cm を加えると、到達した水位は 5.0m～6.3m となる。

8. 結果

9 日 3 時の到達水位を求めた方法と同様に 8 日 24 時 9 日 2 時の到達水位を求め、9 日 3 時の結果を含めて沖波波浪とともに表 4 に示した。

表 4：SMB 法により推定された沖波波浪と波浪変形後の最大波の波浪と到達水位。

日時	8日24時	9日1時	9日2時	9日3時
沖波波高(m)	0.8	1.3	2.0	3.3
沖波周期(秒)	2.8	3.8	4.8	5.8
到達後の最大波高(m)	1.4	2.3	3.6	5.5
到達水位(m)	1.6～1.9	2.3～2.9	3.4～4.3	5.0～6.3

表 4 に示すように、8 日 24 時と 9 日 1 時の到達水位は 3m 以下であるため、海つり施設がある地盤の高さが標高 3m に満たない高さである。9 日 2 時は到達水位が 3.4m から 4.3m であるので、防波堤を超えることはできない。9 日 3 時の最大波による到達水位は 5.0m から 6.3m である。この波浪により本牧海つり施設に被害を受けたと考えられ

る。

9. まとめ

令和元年台風第 15 号 (FAXAI) により本牧海つり施設の事務所棟が被災した。その際の波高、到達水位を羽田の風の観測データを使い、SMB 法により沖波波浪を推定した。更に海岸工学の分野で使われている図や計算式により、施設前面の最大波と到達水位を推定した。推定沖波波高は 2019 年 9 月 9 日午前 3 時が最大で 3.3m である。その波を用いて推定した被災場所前面の最大波は 5.5m で、到達水位 5.0m から 6.3m となった。事務所棟そのものが破壊されていないため、最大波による被災と考えられる。

参 考 文 献

- 土木学会, 1999: 水理公式集 平成 11 年版, 丸善 450 p
- 河合弘泰・鈴木高二朗・平山克也・川口浩二・山本康太・本田和彦・里村大樹・鶴田修己・藤木峻・千田優・岩本匠夢・朝比翔太・川口真吾・久保田博貴, 2020: 台風 1915 号の気象・高潮・波浪の特徴と浸水被害, 港湾技術研究所資料, No.1379, 54p
- 合田良実, 1975: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究報告, Vol.14, No.3, 59-106
- 合田良実・鈴木康正, 1975: 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No.230, 45p
- 合田良実, 1976: 不規則波に対する設計計算法の体系化について, 土木学会論文報告集、第 253 号、59-68
- 合田良実, 1978: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 237p
- 高野洋雄, 2011: 有義波法による波浪推算—現業での利用を目的として—, 測候時報, 78.5, 185-201
- 森本倫生・奥山育英, 1965: 海の波の解析計算法と解析図, 港湾技研資料, No.21, 15p
- 日本港湾協会, 2018: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上巻), 130-164