

第11章 高潮・高波

観測結果

- 日本における高潮の発生頻度は、年によって一定でなく変動が見られるが、有意な長期変化傾向は見られない。
- 高波の波高は、世界の広い海域で増加する傾向が見られる。

将来予測

- 複数の将来予測の結果、多くのケースで将来の台風が強くなり、東京湾、大阪湾、伊勢湾の高潮（潮位偏差）が増大するとの事例研究が報告されている（確信度は中程度）。
- d4PDF を基にした推定では、小規模な高潮の発生数は減少するものの、よりまれで大規模な高潮の発生頻度は増加するとの結果が得られている（確信度は低い）。
- 海面上昇と高潮を合わせた極端水位 ESL の頻度は増加する（確信度は高い）。
- 日本沿岸では平均波高は低くなる（確信度は中程度）ものの、台風経路予測の不確実性及び自然変動の大きさから、台風による極端な高波の波高変化予測は不確実性が大きい。

11.1 世界：高潮

11.1.1 観測結果

高潮は、台風や発達した低気圧などに伴い、海面が短時間に異常に上昇する現象である。特に、海水が海岸堤防等を超えて浸水が起きると、大きな人的・経済的損失につながる。過去には、例えば 1970 年に東パキスタン（現バングラデシュ）で高潮により推定 30 万人以上が亡くなる（Dube et al., 2008）など、大きな被害をもたらしてきた。世界における過去の高潮については、Needham et al. (2015) による報告にまとめられている。遠浅な地形が広がる大陸沿岸部では大きな高潮が発生しやすく、10 m という大きな高潮もまれではない（Needham et al., 2015）。近年も、2005 年のハリケーン Katrina（米国）、2007 年のサイクロン Sidr（バングラデシュ）、2008 年のサイクロン Nargis（ミャンマー）等、甚大な高潮災害が発生しており、2013 年の台風第 30 号 Haiyan ではフィリピン中部で 7,000 名を超える死者・行方不明者（大半は高潮による）が出た。

ここ数年も、ほぼ毎年のように高潮災害が世界各地で発生している（表 11.1.1）が、従来に比べて人的被害は従来に比べ顕著に少なくなっている。これは、高潮防潮堤等のインフラや防災体制が整ってきており、大きな人的災害は起きにくくなっているためと思われる。一方で、高潮による大規模浸水は甚大な人的災害をもたらすため危険性が下がっているわけではない。また、人的災害が軽減される一方で、経済的被害額は大きくなる傾向がある。世界の沿岸低地には多くの大都市や人口密集地帯が存在しており、経済の発展と人口増加により、以前よりも災害規模が大きくなるなど、災害リスクはむしろ高まっている。

表 11.1.1 世界における近年の主な高潮事例

年	地域 ^{*1}	気象要因 (熱帯低気圧名)	経済損失 ^{*2} (十億米ドル)	死者 ^{*2}	典型的高潮 (m)
2017	北西太平洋	Hato	4.31	26	3.5 – 4
	中国・香港・マカオ				
2017	カリブ海	Harvey	148.8	89	3
	キューバ、アンティグ ア・バーブーダ、英領 バージン諸島ほか				
2017	北大西洋	Irma	59.5	97	3
	キューバ・米国				
2017	カリブ海	Maria	107.1	2,981	2.7
	ドミニカ・プエルトリ コ				
2018	南太平洋	Gita	0.22	1	1 – 3
	トンガほか				
2018	北西太平洋	Mangkhut	3.77	134	2 – 3.5
	中国・香港・マカオ				
2018	南インド洋	Idai	2.2	1,593	4.4
	モザンビーク				
2020	南太平洋	Harold	0.123	31	4
	バヌアツ・フィジー				
2020	北インド洋	Amphan	13.7	128	5
	インド・バングラデシ ュ				
2020	北大西洋	Laura	26	42	5.2
	米国				
2021	北西太平洋	In-Fa	>1	6	3
	中国・日本				
2021	北西太平洋	Rai	1.02	410	2 – 3
	フィリピン				
2021	南インド洋	Eloise	0.01	27	2 – 3.5
	マダガスカル・モザン ビーク				
2021	北大西洋	Ida	78.7	96	3.7 – 4.3
	米国				

(Kohno et al., 2022 をベースに作成)

*1 上段は海域名、下段は影響を受けた主な国・地域等

*2 高潮以外によるものを含む

11.1.2 将来予測

亜熱帯・中緯度帯において、多くの高潮（潮位偏差）は熱帯低気圧により生じるため、高潮の将来予測は熱帯低気圧（北西太平洋においては台風）の将来予測と大きくリンクしている。IPCC AR5 と比較して、AR6 では熱帯低気圧の現在までの変化傾向や将来変化についての記述はより定量的になっている。第 7 章でも記述されているように、IPCC (2021) では、「全球では観測されているカテゴリ 3～5 の熱帯低気圧は増加している（可能性が高い）。北西太平洋では最発達域の極域方向の変化が観測されている（可能性が非常に高い）。」とまとめられている。また北大西洋域では、熱帯低気圧の移動速度の低下が観測されている。{11.7.1}

一方、21 世紀末までの熱帯低気圧の将来変化は、全球気候モデルを用いた数値計算結果を基に、ここ十年で理解と評価が急速に進んでいる。IPCC (2021) では、地球温暖化の進行に伴って、発達した熱帯低気圧の最大風速が増加すること、最発達域の極域方向の変化が予想されている（確信度が高い）{Chapter 11}。また、地球温暖化の進行に伴い、発生個数が減少もしくは変化しないことも予測されている（確信度が中程度）（第 7 章参照）。これら熱帯低気圧の特性の将来変化の不確実性は、AR5 から低減している。また、温帯低気圧については、小規模の強度変化に加えて、経路の極域方向の変化が予測されている。この 2 つの効果により、場所によっては温帯低気圧の風速増加が予測されている（確信度が中程度）。

2020 年以降、高潮に関する予測研究数は大幅に増加した。IPCC (2021) では、上述した熱帯低気圧の将来変化に伴い、高潮水位の増加を予測している {9.6.4.2}。全球レベルでは、力学モデルに基づく高潮の将来予測は多く行われていないが、領域レベルの予測は行われている。近年の研究 (Lin et al., 2012; McInnes et al., 2014; Little et al., 2015; Garner et al., 2017; Mori et al., 2019; Muis et al., 2020) は、熱帯低気圧の強度と頻度の将来変化が、地域の高潮の将来変化を引き起こすことを示している（確信度が低い）。また、熱帯低気圧による高潮は、経路の将来変化の影響を受けるため、地域ごとに影響が異なることが指摘されている (Garner et al., 2017)。今のところ、統一的・系統的な全球の高潮予測結果はないが、AR7 に向けての国際的な研究が始まっている。

これまでに述べたような力学的な高潮の予測に対し、高潮についての将来変化は無いと仮定し、観測された潮位に領域レベルの海面上昇量を加えて極端海面水位 (Extreme Sea Level; ESL) を予測するアプローチがある（極端海面水位等についての詳細は第 11.5 節を参照）。厳密に言えば、これらの結果は高潮の将来変化を評価していないが、沿岸災害に対する適応に重要な ESL の将来変化予測情報には価値がある。図 11.1.1 は、潮位計による長期観測が行われている地点の極端海面水位と再現確率年数の関係の将来変化である。観測された年平均発生確率 1%（100 年当たり一回）の極端水位に、領域ごとの海面上昇量を加えた ESL の発生頻度の変化を増幅率として示している。図 11.1.1 より、年平均発生確率 1% の ESL は、将来、多くの地点で年に一回、あるいは複数回発生する予測となっている（確信度が高い）。この結果に高潮の将来変化が加わる場合は、更に地域性が増幅した将来変化が現れることが予想される。

Median Amplification Factor of Extreme Still Water Level by:

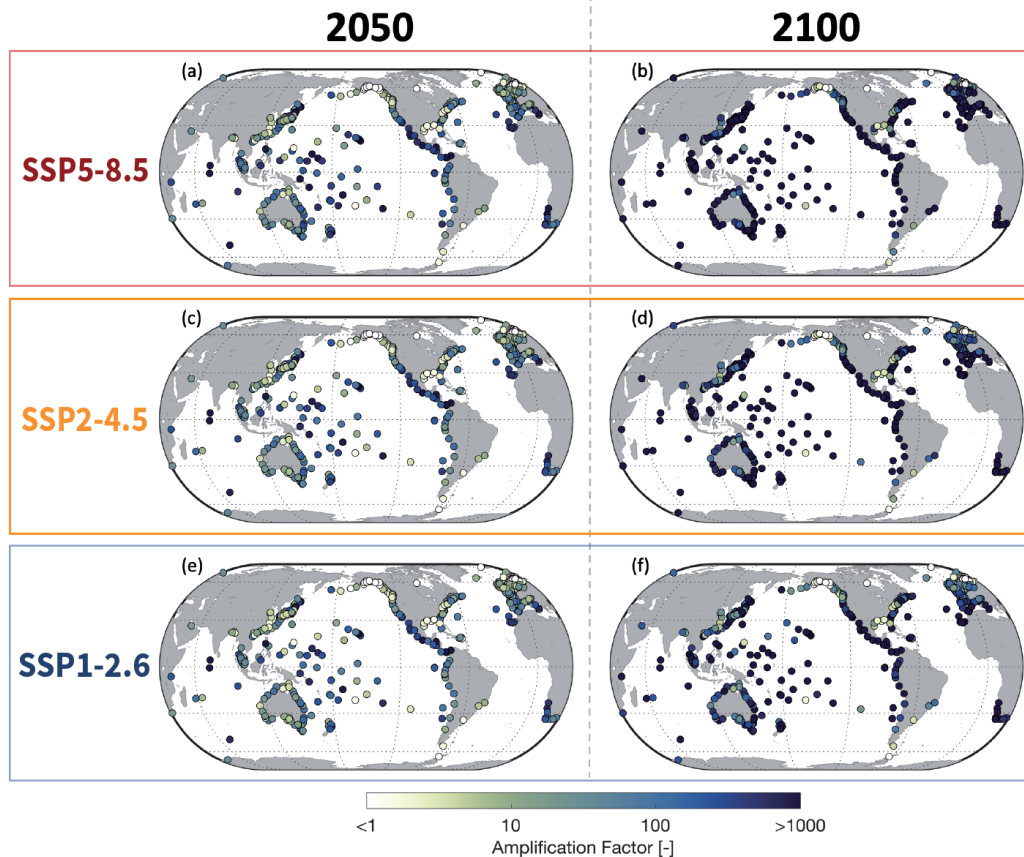


図 11.1.1 年平均確率 1% の極端水位 ESL の将来変化

観測された年平均確率 1% の極端水位に領域ごとの 2050 年及び 2100 年の海面上昇量を加えた ESL の発生頻度の変化を増幅率で示した結果 (増幅率 $\times$ は発生頻度が $\times$ 倍となることを意味する) (a,b)SSP5-8.5、(c,d)SSP2-4.5、及び(e,f)SSP1-2.6 について、領域ごとの海面上昇量を用いている。(IPCC, 2021; Figure 9.32 を転載。)

11.2 日本：高潮

11.2.1 観測結果

日本では、3,000 人以上の犠牲者を出した昭和以降の三大台風（伊勢湾台風、室戸台風、枕崎台風）のうち枕崎台風を除く二つの台風で、甚大な高潮災害が発生している。1934 年の室戸台風では大阪湾で最大 5.1 m の高潮（痕跡に基づく推定値（気象庁, 1961））が発生した。また、1959 年の伊勢湾台風では名古屋港で最高潮位 3.9 m という大きな高潮が発生し、死者・行方不明者 5,000 名以上（うち大多数は高潮による）という大災害となった。なお、名古屋検潮所で観測された潮位偏差 3.5 m は、国内検潮所で観測された潮位偏差の最大値である。このほか、1949 年キティー台風（東京湾）、1961 年第二室戸台風（大阪湾）、1999 年台風第 18 号（八代海及び周防灘）、2004 年台風第 16 号（瀬戸内海）と、国内各地で高潮により大きな浸水災害が発生している。2018 年には、台風第 21 号により大阪湾で大きな高潮が発生し、大阪検潮所で過去最高潮位を超える潮位偏差 2.77 m の高潮が観測され、関西国際空港や阪神間の沿岸部で甚大な浸水災害が発生した。

過去には高潮により死者 1,000 名を超す大きな災害が発生していたが、近年では高潮による死者はかなり減ってきている。防潮堤等のインフラ設備や防災体制の充実などにより、人的被害は出にくくなってきているが、高潮による災害自体は依然として発生し続けている。また、これまで国内では台風による高潮が顕著であったが、近年は発達した低気圧による高潮災害も目立つようになって

てきている。2012 年 4 月 3 日から 4 日には秋田沿岸部で、2014 年 12 月 17 日には根室港やその周辺部で高潮による浸水災害が発生した。

図 11.2.1 は、国内で長期にわたり観測を行っている 50 地点の検潮所で、各高潮事例において観測された潮位偏差（高潮）の最大値（1 m 以上）と毎正時に 1m 以上の潮位偏差（高潮）を観測した回数を、年ごとに示したものである（痕跡に基づく推定値も含む）。この図によると、潮位偏差の最大値が 2.5 m を超えたのは、① 伊勢湾台風（1959 年）時の名古屋（3.5 m）、② 台風第 21 号（2018 年）時の大阪（2.8 m）、③ 第二室戸台風（1961 年）時の大阪（2.6 m、痕跡による）、④ 台風第 23 号（2004 年）時の室戸岬（2.5 m）の 4 つのみであり、国内における大半の潮位偏差は 1 m から 2 m である。2 m を超える高潮は、1970 年代から発生数が減少し、1980 年代では高潮そのものがほとんど発生していない。しかし、1990 年代からは、再び高潮が頻発している。このため、1980 年代以降の関東・東海に着目すると、顕著に増加する長期変化傾向が見られる（Islam et al., 2022）が、より長期的な変化傾向として見ると、ほとんど変化していない。また、偏差が 1m 以上の観測回数の平均をとるとここ 20 年で大きくなるが、これは、2004 年の大きな観測回数（18 回）の寄与が大きい。2004 年は 10 個の台風が日本に上陸した特異年であり、多数の検潮所で大きな高潮が観測された。高潮の発生回数は、ほとんどの年で 5 回未満と少ないため、特に発生回数が多い年があると傾向や平均がそれに引きずられて大きく変わってしまう。また、高潮の発生頻度や潮位偏差は、台風の上陸数や強度、上陸地点などで大きく変わるほか、港湾構造物による地形変化等の要因も影響するため、気候変動に伴う高潮の変化傾向を評価することは難しいのが実情である。

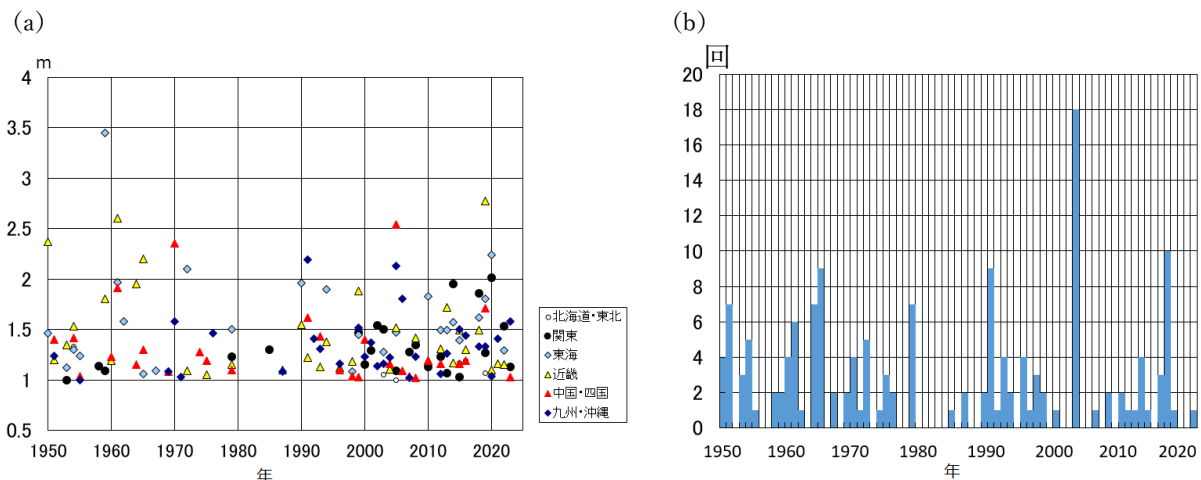


図 11.2.1 国内における高潮の最大値と発生数

(a) 気象庁の検潮所 50 地点で観測された潮位偏差（高潮）の最大値（痕跡に基づく推定値も含む）、(b) 毎時潮位偏差（高潮）1 m 以上を観測した回数。

11.2.2 将来予測

実際に観測される極端な水位は、平均海面水位と天文潮及び潮位偏差（高潮）の合計である。更に、場所により、高波による短周期の水位変動も加わる。第 9 章でまとめたように、地球温暖化に伴い、世界平均海面水位と同様に、日本沿岸の平均海面水位も 21 世紀中に上昇すると予測されている（確信度が高い）。沿岸部の高潮や高波に対する防災・減災施設の整備基準は、上述の 3 要素を考慮した設計高潮位に基づいて計画されているため、平均海面水位に加え、地球温暖化に伴う高潮の将来変化予測は重要な課題となる（農林水産省及び国土交通省, 2020）。

先に述べたように、全球を網羅するコーディネートされた高潮の将来予測は行われていない。領域、更に詳細な湾スケールに注目すると、災害をもたらす規模の顕著な高潮を与える台風等のイベント数は極端に少なくなる。一方で、全球を対象とした予測と異なり、日本を対象とした場合は、評価範囲が狭くなるため、様々な手法による将来変化の予測が可能である。主な手法として、A) 全球気候モデルや地域気候モデルの気象場からそのまま高潮予測を行う直接計算、B) 過去に高潮をもたらした顕著な台風が、将来気候条件下で台風が発生・上陸したとの仮定の下で高潮のシミュレーションをする擬似温暖化実験もしくは簡易擬似温暖化実験、C) 最大となりうる高潮を予測する可能最大予測が挙げられる。特に手法 B の過去の顕著台風の風速・気圧場を関数で簡易表現し、これに将来変化分を加味して高潮の将来変化を見込む簡易的な擬似温暖化実験は、近年の海岸保全計画でも頻繁に使われている。

日本を対象としたこれまでの研究は、手法も将来想定も様々であるが、三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）に集中して多くの予測が行われている。図 11.2.2 は、これまでの三大湾の高潮に対する気候変動の影響についての研究結果を基に、潮位偏差の予測結果をまとめたものである。基となる研究成果は上記の手法 A～C に該当した予測であり、前提条件も様々であるが、三大湾の高潮は、将来の気候条件において平均的に 0.5～1.5 m と海面上昇量と同程度もしくはそれ以上の変化が見込まれる。このように、日本を対象とした研究成果は、潮位偏差の増加を予測している。ただし、多くの予測は台風の将来予測（強度の増加）を前提条件として与えており、予測の確信度は中程度である。

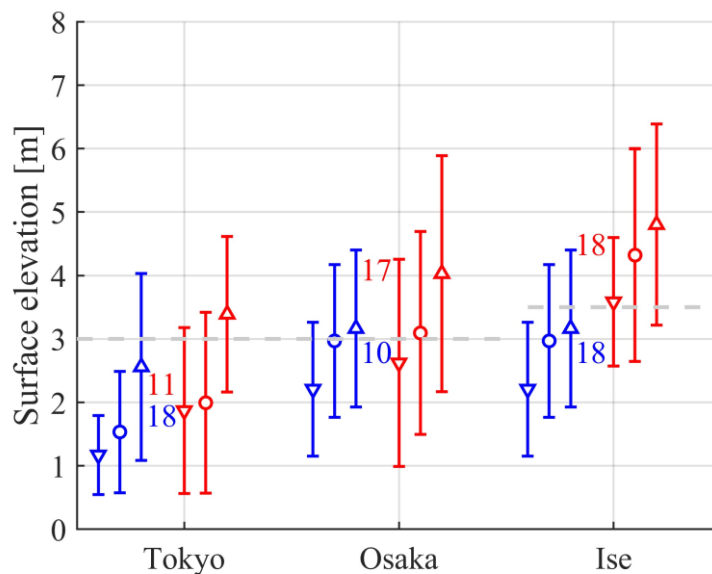


図 11.2.2 既往文献に基づく三大湾の最大潮位偏差の将来変化

論文ごとに示されている将来変化量の平均値（記号）と標準偏差（青線：現在気候、赤線：将来気候（21 世紀末）、○平均的予測、△上位予測、▽下位予測、数字は論文数）。（森ほか, 2020 を基に 2022 年までの論文を取り入れて改変。）

顕著な高潮の発生頻度はかなり低いため、観測や一般的な気候計算で対象とされる数十年程度の評価期間では、頻度や長期評価を議論するために十分な発生数を確保できない。d4PDF (Mizuta et al., 2017; Ishii and Mori, 2020) では、5000 年を超える大規模気候アンサンブルを実施しており、高

潮のような顕著現象の強度と頻度の将来変化を予測することが可能となっている。高潮の強度と頻度の将来変化予測では、必要な強度を持つ台風等のイベント数をどのように与えるかが重要となる。

図 11.2.3 に、d4PDF に基づく大阪湾の潮位偏差の極値分布の将来予測を示す (Mori et al., 2019)。青線は現在気候、赤線は 4°C 上昇実験に基づく予測結果である。再現期間が数年程度の高頻度の高潮の潮位偏差は、現在気候に比べて将来気候の方が小さいが、再現期間が長期になると将来気候の方が大きくなる傾向が見られる。これは、図下の要因分析結果に示されているように、地球温暖化に伴う台風の接近数の減少が高頻度かつ小規模の高潮発生頻度を減少させるが、強い台風の増加と台風経路の将来変化が低頻度かつ大規模な高潮の発生頻度を増加させるためと指摘されている。一方、第 7 章で記述されているように、日本付近の台風の強度は強まることが予測されているが（確信度が中程度）、発生数の将来変化のコンセンサスは得られていない。また、中緯度に位置する日本周辺では、台風経路の将来変化が顕著に出やすい。このため、高潮に対する地球温暖化の影響を定量的に評価するためには、台風の発生個数・強さ・経路の 3 つの特性の将来変化を定量的に捉えることが重要である。現時点では、これら全てについて、d4PDF 以外の他の大規模アンサンブルによる研究事例や観測事実との比較が困難であるという問題があり、高潮予測の確信度は中程度から低い。

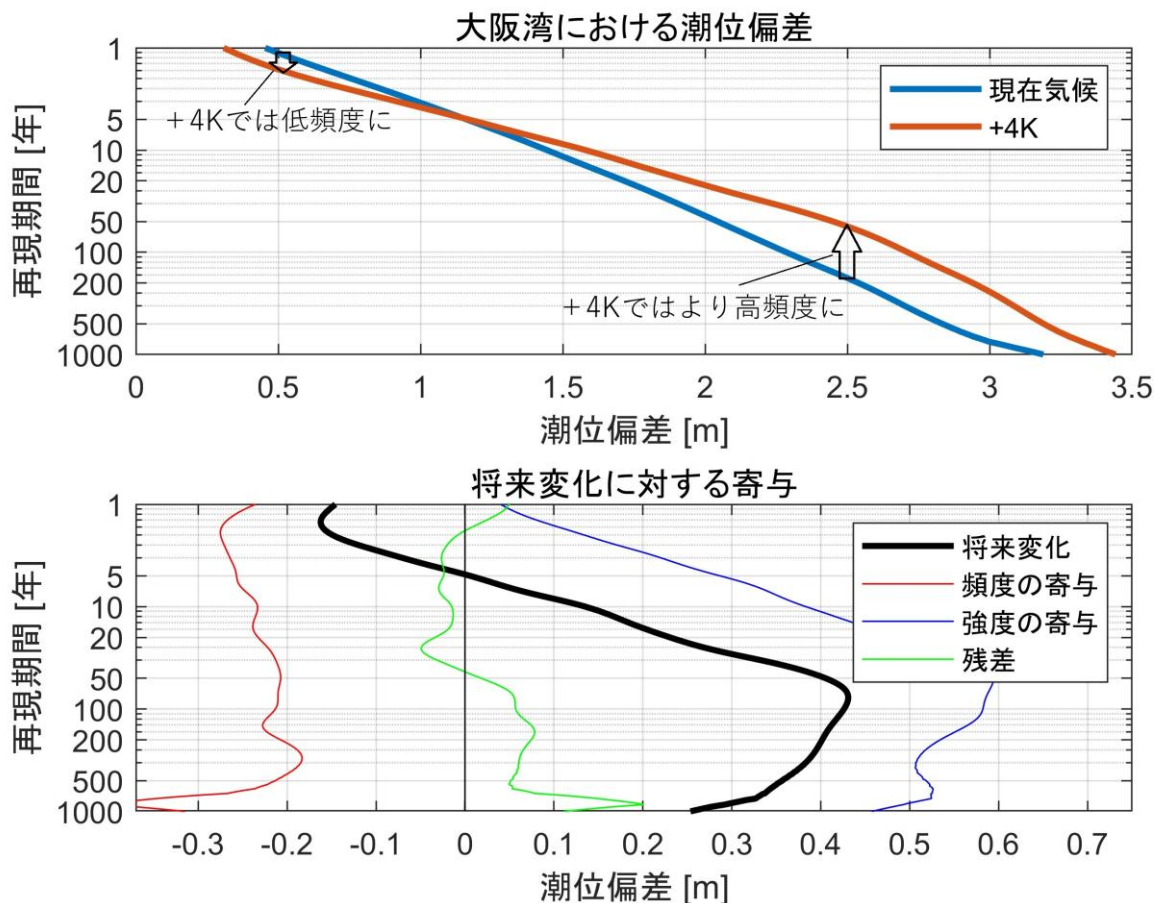


図 11.2.3 現在気候と将来気候 (+4K) 条件における大阪湾の潮位偏差の極値分布 (上) とその寄与 (下) d4PDF を基に算出している。縦軸は再現期間、横軸は潮位偏差を表す。上) 青線: 現在気候 (1951~2011 年)、赤線: 4°C 上昇の場合の将来気候を示す。下) 太線: 各再現期間の潮位偏差の正味の将来変化、赤細実線: 各再現期間の潮位偏差の変化に対する台風頻度変化の寄与、青細線: 台風強度変化の寄与、緑細線: 残差。

地球温暖化の高潮への影響は、温室効果ガスの排出シナリオやそれぞれの湾に対して異なる。一方で、極端な高潮の評価には、多くのイベント数が必要であり、全ての影響を考慮した包括的な評価は難しい。図 11.2.4 に示すのは、シナリオ依存と地域性を考慮した評価の例であり、先の高潮評価手法 C に該当する可能最大高潮 (MPS) について、太平洋沿岸湾を対象に北から南に沿って評価した結果である (森ほか, 2021)。可能最大高潮は、各湾に対して台風が最悪コースを通過すると仮定し、可能最大台風強度 (MPI) を基に推定している。評価に用いた気候シナリオは、2°C 上昇シナリオ (RCP2.6) 及び 4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) であり、気象庁気象研究所の MRI-AGCM60 (水平解像度 60 km) を用いた気候計算の 20 世紀末に対する 21 世紀末の将来変化を示している。歴史的に大きな高潮が発生している三大湾及び有明海で大きな将来変化が予測され、図 11.2.3 の d4PDF の結果と整合している。また、東京湾より北では、顕著な将来変化は見られない。2°C 上昇シナリオ (RCP2.6) の結果は、湾によって大小があるが、4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) と比べておおむね 50~70% 程度小さくなっている。また、伊藤ほか (2022) は、HighresMIP の結果を用いて同様な解析を行っており、4°C 上昇シナリオ (SSP5-8.5) 下では、日本周辺における可能最大強度は、2020 年から 2050 年までに、アンサンブル平均で -4~6 hPa の変化、可能最大高潮は大阪湾で約 +0.5 m の変化量であることを示している。これらの将来変化は、d4PDF 等の力学モデルによる評価と整合している (予測の確信度は中程度)。

高潮については、現在から将来にわたる将来変化の時間特性も重要である。図 11.2.4 と同じ気候予測に基づき推定された 1950~2100 年までの可能最大高潮を図 11.2.5 に示す。年々変動の影響が大きいものの、4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) の結果が、世紀末に向けて単調増加傾向を示すのに対し、2°C 上昇シナリオ (RCP2.6) の結果は、2050~2060 年でピークアウトする特性が見られる (森ほか, 2021)。

冬季の低気圧による高潮の将来変化については、幾つか検討されている。地球温暖化に伴う日本海側における極端な高潮の将来変化については、今のところ顕著な増加傾向は評価されていない。

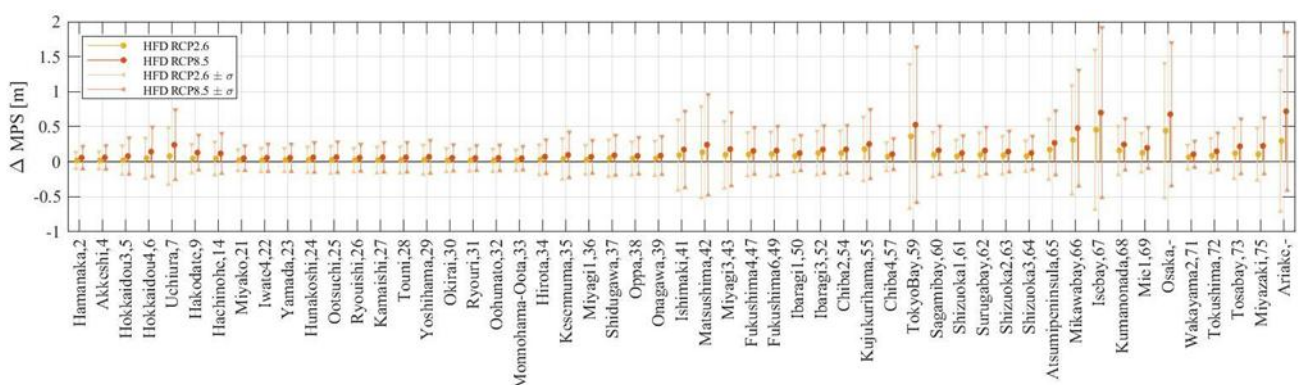


図 11.2.4 7~10 月の平均可能最大高潮 (MPS) の 20 世紀末に対する 21 世紀末の将来変化

横軸は湾名、左から右が北から南に対応、黄：RCP2.6、赤：RCP8.5、点線：標準偏差。(森ほか, 2021 より転載。)

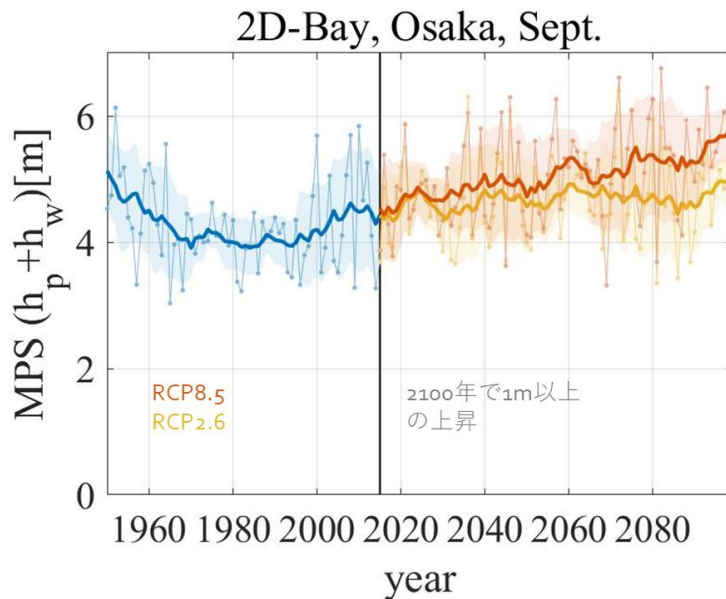


図 11.2.5 大阪湾における 7～10 月の平均可能最大高潮（MPS）の時間変化

青：現在気候、黄：RCP2.6、赤：RCP8.5、細線：年変化、太線：10 年移動平均、網掛け：前後 5 年間の標準偏差。

11.3 世界：高波

11.3.1 観測結果

波浪は、海上を吹く風によって発生・発達し、発達するにつれて波高が大きくなかつ周期が長くなる。よく発達したものは、風域を脱してうねりとなり、数千 km から 1 万 km 以上も伝播する。波浪の中でも波高が特に大きく数 m を超えるものは高波と呼ばれる。波浪の変化特性としては、台風や低気圧により風速が変化する領域において、波高が変化し、大気循環場や台風・低気圧特性の空間パターンの変化による吹送距離が変わり、波高や周期が変化する。

過去の長期波浪特性は、ブイ、船舶、及び衛星による観測、又は気候長期再解析データに基づく波浪の数値計算により評価されている。ブイによる長期的な観測は 1970 年代から開始されており、アメリカ沿岸で高波の増加傾向が報告されている (Ruggiero et al., 2010)。ただし、ブイの長期観測による過去波浪変化傾向は、長期観測期間中のブイ躯体、位置、品質管理の変更により観測データの時間的均一性が担保されない問題が指摘されている (Gemmrich et al., 2011)。過去 33 年間 (1985 から 2018 年) の複数の衛星観測データを統合した解析から、高波 (年上位 10% に相当する波高) に広い範囲での上昇傾向が見られ、南大洋で 1 cm/年、北大西洋では 0.8 cm/年の上昇傾向が示されている (Young and Ribal, 2019) (確信度が高い)。Timmermans et al. (2020) は、同様に衛星観測データを解析し、観測データのキャリブレーション及び品質管理の手法により検出される過去変化傾向は、特に低緯度及びインド洋で異なることを示している。近年では、長期大気再解析データに基づく波浪長期推算データが幾つかの機関で作成されている。その推算データセット間の相互比較の中で過去変化傾向が系統的に解析され、衛星観測と同様に広い領域で波高の上昇傾向があることが示されている (図 11.3.1; Erikson et al., 2022) (確信度が低い)。しかし、データセット間のばらつき的大小と衛星観測との違いがあることに注意が必要となっている (Erikson et al., 2022)。

波浪の過去長期変化傾向の検出の困難さの 1 つは、自然変動の大きさ (ノイズ) と気候変動による変化 (シグナル) の比 (シグナル/ノイズ比) が小さいことに拠る。Casas-Prat et al. (2022) は、d4PDF による大規模気候アンサンブルデータセット (1 メンバー 60 年) を用いて、統計的に有意な過去変化傾向を検出するためには 10 以上のアンサンブルメンバーが必要なことを示している。

Hochet et al. (2023) においても大規模アンサンブルデータによる波浪計算により、北大西洋において統計的に有意な過去変化傾向の検出は、少なくとも 2050 年以降になるとしている。以上のように、過去波浪の長期変化傾向が報告されているものの、長期観測データの時間的な不均一性、観測期間の短さ、手法間の相違、自然変動の大きさにより、波浪の長期変化傾向の不確実性は一般的に大きい。

また、沿岸域で波浪が砕波することに伴い、岸側の水位が上昇する。この波浪による沿岸域の水位の上昇量は地形及び波高や波長といった波浪特性に依存する。IPCC AR5 WGI (2013; Chapter 13) までは平均海面の上昇、いわゆる海面上昇に焦点が当てられてきたが、第 11.5 節に記述されているように、IPCC AR6 WGI (2021; Chapter 9.6.4.1) では、近年の研究の進展により、沿岸域の浸水をもたらす極端海面水位への寄与という観点で、波浪変化の重要性が示されている。極端水位における過去長期変化の中で、波浪特性による寄与が平均海面上昇による寄与を上回っている場所がある (Ruggiero, 2012; Melet et al., 2018)。

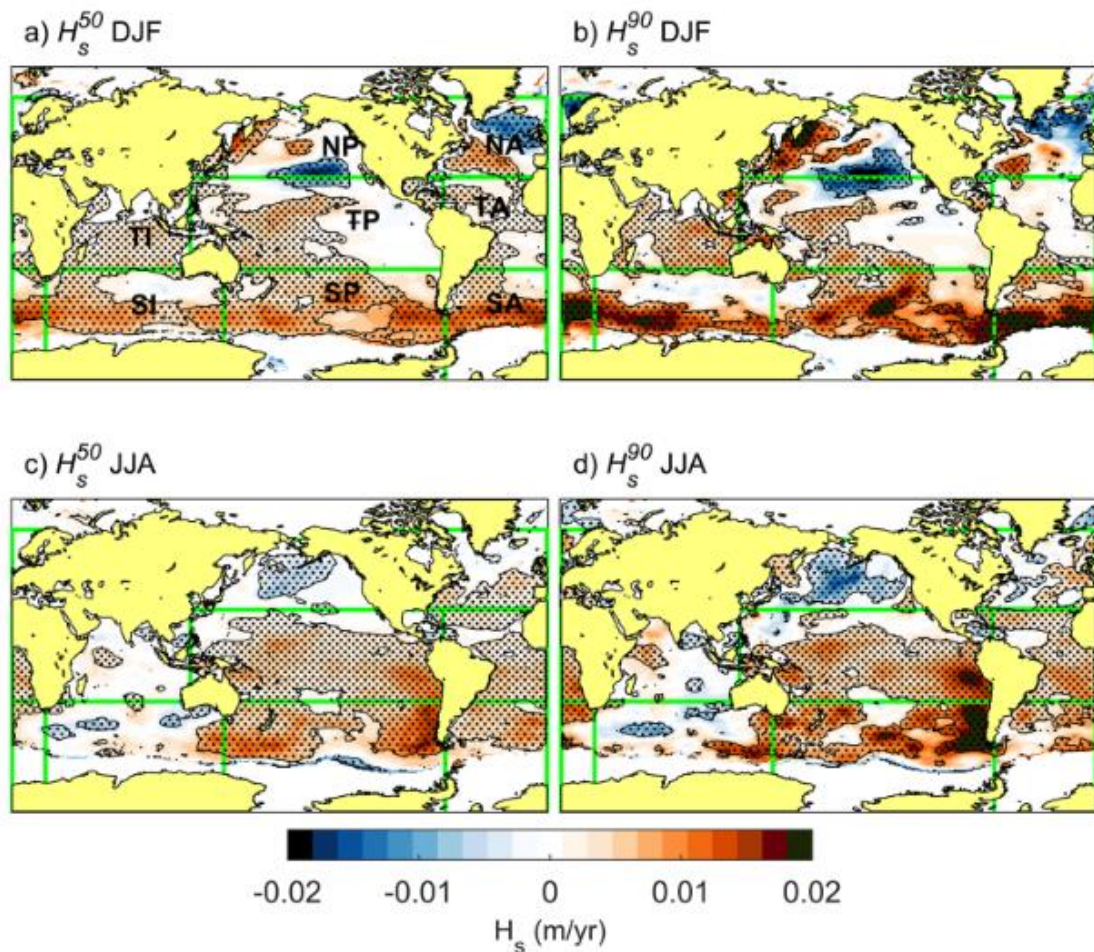


図 11.3.1 気候長期再解析データに基づく波浪長期データによる波の高さの過去 35 年間（1980～2014 年）の長期変化傾向（m/年）

7 つのデータセット間のアンサンブル平均を示しており、ハッチは変化がアンサンブル間の標準偏差を超える領域を表す。(a) 及び (c) は 12～2 月及び 6～8 月の有義波高中央値、(b) 及び (d) は上位 10% に相当する有義波高の長期変化傾向。(Erikson et al. (2022) より、CC-BY 4.0 ライセンス (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) に基づき転載。)

11.3.2 将来予測

IPCC AR5 WGI (2013; Chapter 13.7.3) において、初めて波浪の将来変化について具体的な予測結果が掲載され、日本を含む北半球中緯度における平均波高の減少、南半球中・高緯度における平均波高の増加が中程度の確信度で予測された。その後、IPCC AR6 や海洋・雪氷圏特別報告書に向けて、IPCC AR5 のベースになったモデル群 (CMIP5) の気候変動予測に基づく波浪将来予測研究結果について系統的にまとめられている (Morim et al., 2019)。この結果は、IPCC AR5 以後の 21 の国際的研究グループの研究から 148 の予測アンサンブルについてまとめたものである。この結果、4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) において、世界の海岸線の 52% で平均的な波浪特性 (波高、周期、波向き) に 5~10% 程度の有意な変化が起こると予測している (Morim et al., 2019)。IPCC AR6 WGI (2021; 9.6.4.2) や幾つかの CMIP6 モデル群に基づく波浪予測結果 (Meucci et al., 2023) においても、こうした平均的な波浪特性の変化予測が示されている (予測の確信度は中程度)。

一方、工学的に重要な極端な高波の将来変化については、主に南半球の高緯度及び北太平洋の中央部における波高の増加、中緯度及び北大西洋の広い範囲での波高の減少が予測されている (Morim et al., 2019)。しかし、一般的に IPCC 評価報告書のベースとなる気候モデル (CMIP モデル群) の解像度不足 (空間解像度 100 km 以上) により熱帯低気圧や温帯低気圧等の極端現象が十分に表現されておらず、また極端現象を再現する高解像度モデルによる予測数も極めて限られているため、極端な高波予測の確信度は低い (IPCC AR6 WGI, 2021; Chapter 9.6.4.2)。限られた例として、Shimura et al. (2022) は、熱帯低気圧の強度を良好に再現する気象庁気象研究所の高解像度気候モデル (空間解像度 20 km) による 4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) における全球波浪予測を実施している。年最大有義波高の将来変化の空間分布は、熱帯低気圧の通過個数の変化に良く対応しており、北西太平洋では、台風の通過個数の減少に伴い年最大有義波高の変化は顕著な減少を示す。一方で、年平均発生確率 1/10 以下の低頻度の極端波高は増加する予測も報告されており、これらは台風強度の増加に伴う将来変化に関連する (Shimura et al., 2015; 図 11.3.2) (予測の確信度は低い)。このような台風変化特性に起因する極端な高波の変化予測については、今後の予測数の増加によって Morim et al. (2019) で実施されたような研究間相互比較による系統的な不確実性の評価が望まれる。

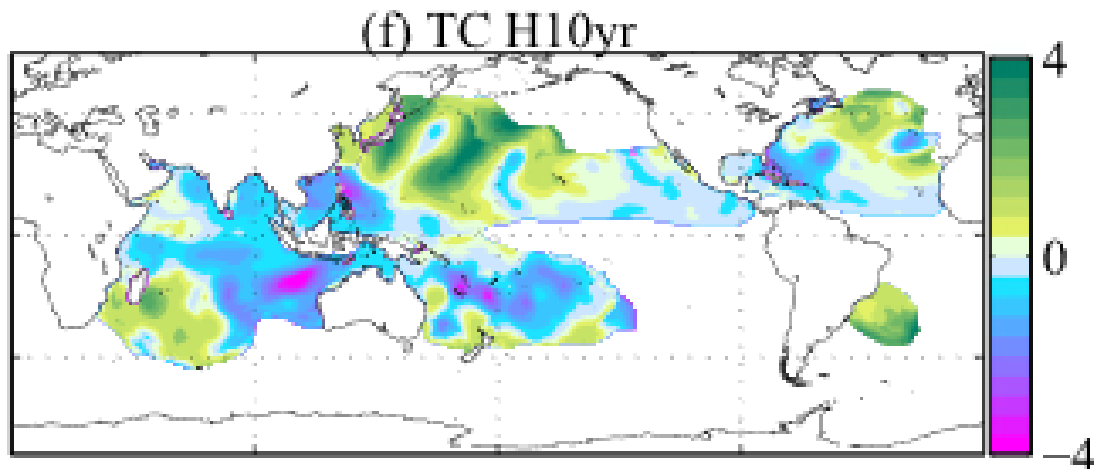


図 11.3.2 台風による極端な波高 (10 年確率値) の将来変化

21 世紀末と 20 世紀末の値の差として表している (m)。(Shimura et al. (2015) より図の一部を転載 ©American Meteorological Society. Used with permission)

11.4 日本：高波

11.4.1 観測結果

日本沿岸では、国土交通省による全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）が 1970 年から運用されており、これを用いた長期波浪特性変化の解析が行われ、地点により高波の特性に有意な変化があることが報告されている（関ほか, 2011）。波エネルギーは、1980 年から 2009 年の間に、東日本の太平洋側で顕著に増加している（Sasaki, 2012）。本報告書の第 7 章では台風接近数に長期変化傾向は確認できないとしているが、清水ほか（2006）のように、1970 年から 2005 年の 35 年間に於いて台風通過数の増加に伴い日本の太平洋側で高波の顕著な増加傾向が見られるという報告もある。加藤ほか（2019）も日本沿岸の全国的な高波の増大を報告しており、年最大波高は地域により 2.5 cm/年から 7.6 cm/年の上昇傾向があり、特に太平洋側の上昇量が大きいとしている。日本周辺の高波増大長期変化傾向が上記のように報告されているものの、確信度が低く、人為的な気候変動によるものか自然変動由来かの見解の一致は得られていない。

11.4.2 将来予測

日本付近の海域では、21 世紀末において、南北方向の気圧勾配及び風速の減少に伴い平均的な波高が 10%程度減少することが予測されている。この予測は様々なモデル間で整合性がある（Shimura et al., 2016）。最新の全球波浪予測比較実験の結果からも、平均的な波高及び周期の減少という予測が報告されている（Morim et al., 2019）。更に、日本周辺の高解像度波浪予測結果からも同様の結果が報告されている（志村・森, 2019）。しかし、過去の観測からは波高減少は報告されていないため、確信度は中程度である。平均波高の大規模な変化は、海上風の東西方向に帯状に見られる将来変化に起因することが CMIP3 の頃から知られている（例えば Mori et al., 2013）。地球温暖化による気温の上昇率は、低緯度より高緯度の方が大きい。赤道から極域に渡る全球的な温度勾配の変化は、ハドレー循環など大気の大規模循環パターンを変化させる可能性が高い。これら東西風に関連する循環場の南北シフトは、海上風では東西方向に帯状の変化をもたらす。また、風速自体の将来変化も予測される。例えば、高緯度では、大気は低温のため、高密度になり、気圧が高くなる（低緯度は逆）。低緯度と高緯度の気温差が大きい場合は、気圧の差も大きく、気圧の傾きが大きくなるため、中緯度の風速が大きくなる。しかし、地球温暖化で低緯度の気温に比べ高緯度の気温が大きく上昇すると、低緯度と高緯度の気圧の差は減少し、気圧の傾きが小さくなり、中緯度の風速が減少する。これらの傾向は CMIP6 までの将来予測でも明確に見られる（Pryor et al., 2020）。これら海上風速のパターン及び強度の変化とうねりの変化の組み合わせが上記の平均波高の広域スケールの将来変化として現れる。

日本周辺の高波は、台風のような強い気象じょう乱により作られるものが多い。そのような高波の将来変化は、台風の強度、頻度及び経路の変化特性に複合的に依存する。地球温暖化条件下で日本付近の台風の強度が強まるという予測の確度は高まってきている（Yoshida et al., 2017）（確信度が中程度）。『気候予測データセット 2022』全球及び日本域波浪予測データを使用して日本周辺の台風による高波の変化を解析した結果、10 年当たり一回の確率で発生する波高においては、21 世紀末と 20 世紀末を比較して、多くの海域で高くなるが、台風の経路変化の影響を受けて場所により $\pm 30\%$ 程度の変化があることが予測された(図 11.3.2; Shimura et al., 2015)（確信度は低い）。台風経路の予測の不確実性の高さから、場所ごとの高波の変化に関しては予測の不確実性は大きい。ま

た、Shimura et al. (2022) は、4°C 上昇シナリオ (RCP8.5) 下の今世紀末の日本周辺の台風による高波 (50 年当たり一回の確率で発生する高波) は、強い台風被害が頻発した 1950、60 年代に比較して、大きくなるとは限らないことを示した。これは、将来における日本周辺の台風通過個数の減少及び 1950、60 年代の海面水温分布が強い台風の発生発達に有利な状態であったことに因る。この結果は、自然変動の大きさによる台風高波予測の不確実性の高さを表しており、自然変動と気候変動による変化を同定するためにはより多くの予測アンサンブルを必要とする。

11.5 極端海面水位及び全海面水位

本章で何度か記述されているように、IPCC SROCC (2019) では、具体的な影響や適応策に向けた情報として、従来の海面上昇に加えて極端海面水位 (ESL) 及び全海面水位もしくは全極端海面水位 (Total Water Level; TWL) の変化の重要性が議論され始めた。海面上昇で議論される海面水位は、平均水位 (MWL) の中長期的な変化であり、例えば月単位や年単位の時間スケールである。極端海面水位は、平均海面水位に最大天文潮位と高潮による短時間水位変化を加えたものと定義される (Wahl et al., 2017)。全海面水位は、極端海面水位に波浪によるセットアップ (潮位上昇) と遡上・打ち上げ高を加えたものと定義され、沿岸付近の浸水や防波堤などの構造物の安定性を評価するために重要である。

極端海面水位や全海面水位の現在値と将来の変化は、海岸保全計画等に直接関係する。IPCC AR6 WG I (2021) 及びWGII (2022) の政策決定者向け要約 (SPM) では、"沿岸都市では、(海面上昇と高潮による) より頻繁な極端な海面事象と極端な降雨／河川流事象の組み合わせにより、洪水の可能性が高くなる (確信度が高い)" と述べられている。更に IPCC AR6 統合報告書 (2023) では、将来予想される可能性の低い発生事象やシナリオを除外することはできず、リスク評価の一部であると警告している。したがって、太平洋、北大西洋、インド洋の中緯度の低平な沿岸域における適応戦略を策定するためには、将来の気候における極端海面水位と全海面水位を評価することが重要である。

本章で議論された高潮及び波浪の将来変化は、極端海面水位や全海面水位の評価に重要なものである。高潮や波浪は、海面上昇に比べて空間的・時間的スケールが細かく、このため、高潮は 100 m オーダー、水深の影響を受けない海域の波高は 1 km オーダー、波遡上は 10 m オーダーの空間スケールでの評価が必要となる (Mori and Shimura, 2023)。最近の研究では (例えば Shimura et al., 2022)、高潮と波浪を双方とも考慮した予測も行われている。

また、地域ごとの評価では、海面上昇、極端海面水位、全海面水位に加えて、地盤高の長期変化の評価も重要となる。特に日本では、沈み込み帯に近い地域では地盤高の変化が大きく、長期的な地盤高変化を加えた相対的な海面上昇量の評価が重要である。

11.6 背景要因

高潮は、気圧低下による海面の上昇 (吸い上げ) と、強風による海面付近の水の沿岸部への移動 (吹き寄せ) の、2 つの効果により生じる現象である。高潮の発生メカニズムのうち吸い上げは、水面上の気圧低下で起こるため、場所には大きく依存しない。一般に 1 hPa の気圧低下は 1 cm の海面上昇をもたらす。つまり、例えば気圧が 960 hPa の台風の場合、吸い上げ効果だけで生じる高

潮は 50 cm 程度に留まる。一方、風による吹き寄せは、海底の地形、湾と風向きの関係により大きく変化する。最も大きな吹き寄せ効果は、湾の沖から奥に向かって風が吹く時に起き、湾が沖から岸に向かって幅が狭く、浅くなるような地形の場合に大きくなる。吹き寄せに及ぼす地形の影響は、湾奥における水塊の収れんが潮位偏差に最も大きな影響を与える。以上の関係により、本章で紹介したような潮位偏差が数 m に及ぶ大規模な高潮災害においては、吹き寄せ効果の寄与が重要な役割を果たすことが分かる。日本において高潮は、主に台風に伴い発生する。台風は日本付近では北向きに移動する傾向があるために南風が強くなりやすく、結果として、主に南側に向いた湾で高潮被害が多く発生している。