

2019年度（第55回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 19-B-8

# 伊勢湾台風とその後の防災

名古屋工業大学 名誉教授

喜岡 渉

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2019年9月

# 伊勢湾台風とその後の防災

## Typhoon Vera and Disaster Prevention Afterward

喜岡 渉  
Wataru KIOKA

### 1. 伊勢湾台風

1959年9月20日、マーシャル諸島近海で熱帯低気圧性の循環の発生が確認され、この渦は21日朝からは北向きに進んで次第に発達し、21日21時にはグアム島の東海上に達して中心気圧が1002hPaの台風15号となった。この台風は、22日21時には中心気圧が960hPaと1日で40hPaを超える急発達をして、マリアナ諸島北部を北西に進んだ。台風はその後にも急発達を続け、23日9時には、中心気圧が905hPaと半日で55hPaも下がり超大型の台風へと成長した。米空軍の台風偵察機がこの台風の中心に入ってドロップゾンデによる観測を行っており、23日の15時にはマリアナ諸島の北西海上でこの台風の最低気圧となる849hPaが記録されている(図-1参照)。なお、北西太平洋における米軍飛行機による台風観測は1988年以降、行われなくなった。

北に向きを変えた台風5915号は26日9時には北緯30度に達し、このときの中心気圧は925hPa、最大風速60m/s、風速25m/s以上の暴風域は中心の東側400km、西側300kmの広さを持ち、超大型で猛烈な勢力を保ったまま北上を続け、26日18時過ぎ和歌山県潮岬の西に上陸、潮岬測候所では18時13分に最低気圧929.5hPaを観測した。上陸時には東海、近畿、四国東部では風速25m/sを越える暴風となった。台風15号は、最盛期に達してから上陸までの日数が3日と短かったことと、台風が北上して来た紀伊半島の南海の水温は周囲に比べて高温であったことから、最盛期に近い勢力を維持したまま上陸した。

台風上陸後は、毎時70km近い速度で紀伊半島、東海地方西部を通過して27日0時に富山市の東を通過して日本海に進んだ。中心が通過した紀伊半島から東海地方西部では猛烈な雨が降った。九州から北海道までの広い範囲で最大風速20m/s以上を観測し、四国東部から関東南部にかけての沿岸地方では30m/s以上の暴風となった。伊勢湾に面した東海地方や紀伊水道に面した地方では、風速20m/s以上の暴風が5時間から10時間にわたって継続した。特に台風の東側に入った伊勢湾沿岸では激しい暴風が吹き荒れ、伊良湖岬での最大風速45.4m/s、最大瞬間風速55.3m/s、名古屋での最大風速37.0m/s、最大瞬間風速45.7m/sを記録している(表-1)。

台風中心が琵琶湖付近に達した21:35には名古屋の

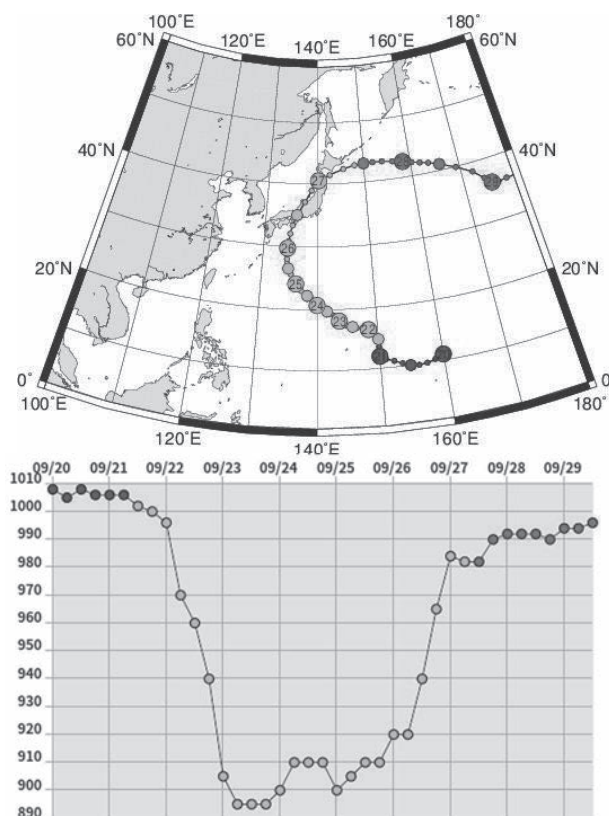


図-1 伊勢湾台風の経路と中心気圧<sup>1)</sup>  
(時間は UTC : 日本標準時間は+09)

表-1 最低海面気圧，最大風速，最大瞬間風速の観測値<sup>2)</sup>

地点名	最低海面気圧		最大風速			最大瞬間風速		
	hPa	月日時分	m/s	風向	月日	m/s	風向	月日
御前崎	986.0	09/26 20:53	35.6	SSW	09/26	44.4	S	09/26
名古屋	958.2	09/26 21:27	37.0	SSE	09/26 (22:00)	45.7	SSE	09/26 (21:25):
伊良湖	964.6	09/26 20:20	45.4	S	09/26 (20:45)	55.3	S	09/26 (21:21)
岐阜	956.0	09/26 21:56	32.5	SSE	09/26	44.2	ESE	09/26
津	944.4	09/26 20:37	36.8	ESE	09/26	51.3	ESE	09/26
舞鶴	968.7	09/26 21:05	36.5	NNE	09/26	51.1	N	09/26
洲本	959.1	09/26 18:57	42.3	NNW	09/26	49.2	NNW	09/26
潮岬	929.2	09/26 18:13	33.4	ESE	09/26	48.5	SSE	09/26
津山	979.0	09/26 19:17	30.6	NNW	09/26	41.5	NNW	09/26

潮位記録は最高潮位の 3.89m を示している。管区气象台で最低気圧と最大瞬間風速を観測した時刻より 10 分程度遅れてこの既往最高潮位に達している。各地点で観測された最大潮位偏差を表-2 に示す。最高気象潮位の発生時刻を見ると、風向の変化にはほぼ対応しており、最初に南東の風により 20:00~20:30 頃には三重県中部海岸で潮位偏差 2m 弱を観測、次に南南東の風を受けた伊勢湾奥では 21:35 に既往最大潮位偏差 3.45m を記録、三河湾奥では最も遅く風が南南西に変わった 22:30 頃に潮位偏差 2.76m を観測している<sup>2)</sup>。このときの名古屋港の波浪観測記録はピーク波高を記録する前に波高計が壊れ欠測となっている。坂本ら<sup>3)</sup>、および井島ら<sup>4)</sup>は浅海の波浪推算法を用い、唯一欠測とならなかった福江港の波高計記録により推算値を検証して、名古屋港の有義波高のピーク値

表-2 最大潮位偏差<sup>2)</sup>

地点名	最大潮位偏差	
	偏差	月日
名古屋 (愛知県)	3.5	9/26
尾鷲 (三重県)	2.0	9/26
浦神 (和歌山県)	1.8	9/26
舞阪 (静岡県)	1.3	9/26
鳥羽 (三重県)	1.2	9/26
東京 (東京都)	1.0	9/26

を 2.1m~2.7m と推定している。湾西側にあたる四日市および津では 3.0m~4.2m とピーク波高はより大きくなっている。名古屋を中心として伊勢湾の西側では高潮偏差よりも波浪が大きく、東側では逆の傾向になることは、間瀬ら<sup>5)</sup>が高潮・波浪結合モデル(波浪については SWAN)による再現計算によって確かめている。

当時の海岸堤防は計画天端高 T.P.+3.38m で設計されており、名古屋港の最高潮位 T.P.+3.89 はこれを大きく上回るものであり、ほぼ 1 時間にわたって計画天端高を超えた高潮が背後の低平地へ流入し続けた。また、当時の設計波高 2m を超える高波が高潮に伴い来襲したため、伊勢湾東側の鍋田干拓地、四日市、津などで海岸堤防が破壊され、被害を激甚化させた。加えて、当時の名古屋港では海岸に水面貯木場を設けており、その総面積の約 122 万 m<sup>3</sup> の約 7 割の貯木場が高潮・高波によって被災し、周辺の堤防の崩壊とともに約 50 万トンの木材が埋立地背後の低平地の市街地へ流出した。大量の流木が高潮とともに流れ込んだ名古屋市南部の南区、港区では一般建築物の全壊・半壊の被害率が非常に高くなっている。

住宅被害や、低平地にある工業地帯が浸水したことによる商工関係の被害などの物的被害も膨大なものになったが、人的被害は災害史上まれにみる甚大なものになった。消防白書によると、死者 4,697 人、行方不明者 401 人、負傷者 38,921 人、住家全壊 40,838 戸、半壊 113,052 戸、床上浸水 157,858 戸、床下浸水 205,753 戸となっており、その内、愛知県は死者 3,168 人、行方不明 92 人、また住家全壊は 23,334 戸、半壊 97,049 戸、流失 3,194 戸と被害の大半を占める。人的被害は名古屋市南部の南区、港区に集中しており、1,792 人と愛知県の死者の 6 割近くを占める。

高潮による湛水被害は、堤防の仮締切り工事が完了するまで低平地で長期に及んだ。名古屋南部の南陽町では 60 日間、港区・南区では 20~30 日間にわたって湛水した地域が大部分であった。これらの地区では、

原則として被災者は地域ごとに、学童については学区ごとにまとめて名古屋市北部の指定避難所へ長期避難させている。

台風 15 号は我が国の気象災害史上、最大の被害をもたらした台風である。特に伊勢湾沿岸における高潮の被害が甚大であったため、気象庁はこの台風を伊勢湾台風と命名した。この伊勢湾台風から 60 年、「その後の防災」とタイトルを大きくしすぎたが、本論では「その後の高潮防災」について述べたい。

## 2. 以降の主な高潮災害

伊勢湾台風以後、我が国に高潮災害をもたらした主な台風・低気圧を最大潮位偏差の順に並べると、2018 年台風 21 号（大阪湾：最大潮位偏差 277cm\*、TP 上の最高潮位 329cm\*）（ただし\*は 3 分平均の瞬間値）、1961 年第 2 室戸台風（大阪湾：260cm、300cm）、2004 年台風 23 号（室戸：253cm、289cm）、1970 年台風 10 号（土佐湾：235cm、313cm）、2018 年台風 24 号（和歌山：218cm、296cm）、2014 年温帯性低気圧（根室：153cm、184cm）、1999 年台風 18 号（八代海：139cm、465cm）、2004 年台風 16 号（高松：133cm、263cm）、1985 年台風 13 号（有明湾：100cm、330cm）となる。第 2 室戸台風の潮位は痕跡による推定値で、そのほかは検潮所記録によるものであるが、平均のとり方が異なっており、また副振動の影響を除いた補正值ではないために、この最大潮位偏差により高潮の規模を比較できるものではない。

伊勢湾台風から 2 年後の 1961 年 9 月、その最盛期において中心気圧 885hPa、最大風速 70m/s、暴風半径 330km という伊勢湾台風に匹敵する規模の第二室戸台風が大阪湾沿岸に高潮災害（死者・行方不明 200 人）をもたらした。図-2 に示すように、北緯 31 度付近での中心気圧 920hPa を保ったまま室戸岬西に上陸し、大阪沿岸に高潮をもたらす典型的な台風進路をとった。上陸直前の中心気圧は 925hPa と伊勢湾台風の 929hPa より低い、暴風域半径と移動速度は伊勢湾台風の方が大きい<sup>6)</sup>。第二室戸台風の高潮最高潮位は 1934 年の室戸台風に次ぐもので、最大潮位偏差は 1950 年のジェーン台風とほぼ等しいものとなっている。この高潮により淀川本川の河川堤防は破堤しなかったものの、淀川を遡上した高潮により洪水が発生した。地盤沈下の影響により大阪の西区から中心部の福島区、北区の一部の 31 平方 km が浸水したが、室戸台風、ジェーン台風と比べると浸水面積は小さく、人的被害も小さくなったのは、ジェーン台風以後に整備された防波堤の効果とされている。

1970 年の台風 10 号では外洋に面した土佐湾沿岸で異常な高潮（桂浜の検潮所で最大潮位 313cm、最大偏差 235cm を記録）が発生し、高知市周辺一帯に大水害をもたらした。この時の最大潮位偏差は、気圧・風の場合を外力とする従来の高潮モデルによる数値計算では再現できず、

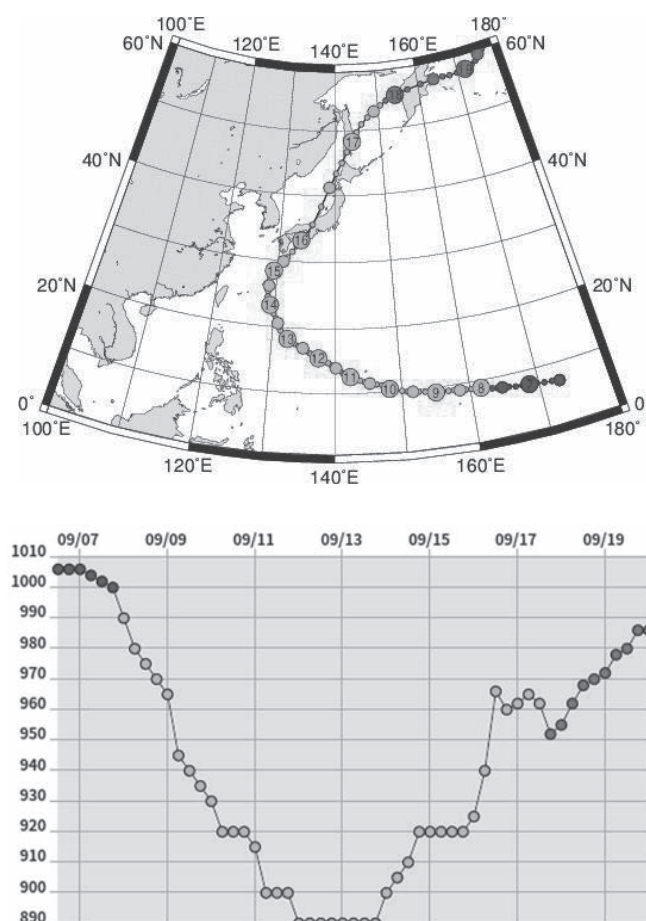


図-2 第二室戸台風の経路と中心気圧<sup>1)</sup>  
(時間は UTC：日本標準時間は+09)

波浪によるセットアップ上昇分が約 1m と支配的であることが明らかになった<sup>7),8)</sup>。

1999年の台風18号は、これまで高潮をあまり警戒して来なかった不知火海（八代海）や周防灘に十数年来の高潮災害をもたらした。特に、不知火海湾奥部に位置する不知火町松合地区では、強風による高潮・高波によって3mを超える潮位偏差が生じ、堤防開口部から流入した海水は護岸を越流して一気に低水地内に流入し、堤内地で12人もの犠牲者が出た<sup>9)</sup>。この人的被害を死亡リスクに換算すると伊勢湾台風のときの浸水域のリスクとほぼ同じになり、高潮が堤防高を越えたときの脆弱さは40年経っても変わっていないことは衝撃的であった。

5年後の2004年には台風の上陸数が最多の10（1951年～2018年に台風の中心が北海道、本州、四国、九州の海岸線に達した数で比較）を記録し、そのうち台風16号は瀬戸内海沿岸の広域で高潮氾濫を引き起こし、台風23号では高潮・高波により外洋に面した土佐湾で海岸堤防等が被災した。瀬戸内海をほぼ平行に南西から北東へ向かう経路を通った台風16号では、勢力から予想された以上の高潮位が発生し、瀬戸内海東部の高松、宇野付近においては満潮と高潮のピークがほぼ重なったために、既往最高潮位が更新された<sup>10)</sup>。東西方向に長く、干満差が比較的大きい瀬戸内海を台風が同様な経路を進む場合、瀬戸内海沿岸のいずれかの場所で満潮と高潮のピークが一致する可能性は高い。

2014年12月に九州の南西海上で発生した温帯性低気圧は四国沖から東北沖を北上し、急速に発達して北海道東部の海上で952hPaの“爆弾低気圧”となった。根室では低気圧の接近と満潮が重なりTP+1.8mまで潮位が上昇し、伊茶仁海岸の海岸堤防の一部倒壊、および根室市街地で床上浸水の被害が生じた<sup>11)</sup>。

記憶に新しい2018年8月の台風21号は、発生時には猛烈な台風へと急速成長したが、北上に伴い早い段階で勢力を弱めて北緯32度では945hPaと、伊勢湾台風の920hPaと比べるとやや弱くなったものの、強い勢力を保ったまま第二室戸台風に近い経路をとり徳島県南部に上陸した。上陸時の中心気圧は950hPa、最大風速は45m/sで、非常に強い勢力のまま淡路島を通過し神戸市付近に再上陸した。台風の移動速度も速く、近畿を中心に東海・北陸・北海道で記録的な強風をもたらした。高潮が発生した大阪湾と紀伊水道の沿岸では6地点で最高潮位記録を更新した。特に大阪湾では、検潮所で329cm（大阪）、233cm（神戸）を記録し、防潮堤の内外で浸水被害が発生した。このうち堤内の市街地への高潮の越流は見られず、護岸や防潮堤からの越波による浸水被害が多く見られた。神戸の埋立地の堤外に位置する商業施設は、岸壁からの高潮浸水により、浸水深55cmを記録している<sup>12)</sup>。淀川では高潮の河川遡上が発生し、下流域では計画高水位を上回った。六甲アイランド東側のコンテナターミナルでは浸水深約2mに達する高潮と波浪により、多数のコンテナや自動車が漂流し、電源施設が浸水するなどの被害が発生した<sup>12)</sup>。コンテナ、自動車などの大型漂流物のほとんどは堤外地に留まり市街地への流出は見られなかったが、タンカー船が走錨して関西空港連絡橋に衝突し交通を遮断するなど、台風21号では伊勢湾台風時の流木被害や半田市堤防に打上げられた貨物船を彷彿とさせる漂流物が被害を増幅させた。

海外においては2000年代に高潮による巨大災害が続いて発生しており、2005年8月ハリケーン・カトリ

表-3 中心気圧、最大風速（\*は1分平均値）の比較

	ハリケーン・カトリナ	台風ハイエン	伊勢湾台風
上陸年月	2005年8月	2013年11月	1959年9月
最低気圧	902hPa	895hPa	894hPa
最大風速	78m/s*	65m/s	75m/s
上陸時気圧	910hPa	895hPa	929hPa
上陸時風速	65m/s*	65m/s 87.5m/s*	46m/s

ーナ(最低気圧 902hPa, 最大風速 78m/s\*) (\*は 1 分平均値), 2007 年 11 月サイクロン・シドル (944hPa, 60m/s), 2013 年 11 月台風ハイエン (台風 30 号) (895hPa, 65m/s) により, それぞれニューオーリンズ市 (死者約 1,800 人), バングラデシュ南西部沿岸 (死者約 15,000 人), レイテ島を中心としたフィリピン中部 (死者約 6,200 人) に甚大な被害をもたらした. とともに 10 分平均値の風速に 1.25 をかけておよそ 1 分平均値に換算すると, 米国の合同台風警報センター JTWC が定めるスーパー台風の階級 (130kts=67m/s 以上) に属する熱帯性低気圧である. このうち, ある程度の防災施設が整備された中, 低平地ニューオーリンズで市民の約 8 割に及ぶ約 40 万人が避難を余儀なくされたハリケーン・カトリーナと, 未曾有の強大な勢力を保ったまま上陸した台風ハイエン (図-3 参照) については, 多くの調査・研究が行われている. 表-3 にこの二つの熱帯低気圧を伊勢湾台風と比較して示す.

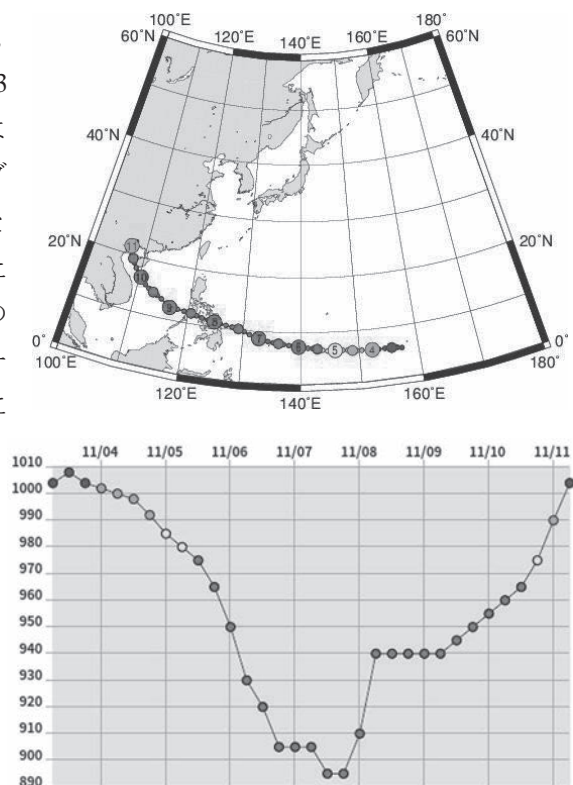


図-3 台風ハイエンの経路と中心気圧<sup>1)</sup>  
(時間は UTC)

### 3. 気象庁数値予報システム

気象庁の数値予報は, 伊勢湾台風来襲の 3 か月前にあたる 1959 年 6 月より, IBM704 を導入して 500hPa の北半球バランスバロトロピックモデルでスタートした. こ

の第 1 世代から数えて現在は第 10 世代の数値予報システムが運用されている. 世代数は大型コンピュータの更新に合わせて切り上げられており, 第 10 世代に至るモデルの改変を表-4 に示す.

1961 年から 4 層ジオ準地衡風モデル (水平解像度 304.8km) が開始されたが, 1970 年には北半球 3 層バランスモデル (水平解像度 381km) に置き換えられている. 1973 年にアジア 6 層プリミティブ・ファインメッシュモデル FLM (水平解像度 152.4km) の運用が開始され, 1975 年にはバランスモデルも北半球 4 層プリミティブモデル NHM (水平解像度 381km) に変更されている. 日本域微格子モデル VFM (水平解像度 63.5km, 鉛直層数 L=11) は, 日本付近のメソ  $\alpha$  スケールの現象を計算して FLM を補足するために, 1983 年からルーチン運用されるようになった. この時期には台風進路予報のための台風 3 次元モデル MNG (381km, 191km, 95km) の三つの領域のネスティング, L=3) の運用も開始され, 北半球モデル, アジア領域モデル FLM, 日本域モデル VFM, 台風モデル MNG の 4 種類のモデルが併用されていた. 1987 年から北半球モデルは全球モデル GSM (水平解像度 280km, L=12) に変更され, 2006 年に GSM (水平解像度 20km, L=60) へ更新される際には, アジア領域モデルと台風モデルが中止になり, 水平解像度 5 km で完全圧縮性の非静力学メソスケールモデル MSM と全球モデル GSM の二つの運用形態になった. この MSM には, 雲や降水を水蒸気, 雲水, 雨, 雲氷, 雪, 霰のカテゴリーに分けてバルク的に時間変化を扱う雲微物理過程のパラメタリゼーションが組み込まれている. 2012 年には MSM の水平解像度 5km をより小さい 2km として, 積乱雲などのよりスケールの小さい現象の表現が可能な局地モデル LFM の運用も始まった.

現在では, この局地モデル LFM (水平解像度 2km, L=58), メソモデル MSM (水平解像度 5km, L=76), 全球モデル GSM (水平解像度 20km, L=100) の他に, 全球アンサンブル予報システム (水平解像度 40km, 55km, L=100), 大気海洋結合モデルによる季節アンサンブル予報システム (水平解像度 大気 110km, 海洋 50~100km; L 大気 60, 海洋 52 層および海底境界層) の 5 種類のモデルが運用されている. なお, LFM のデ

表-4 気象庁数値予報モデルの変遷

運用開始年月		数値予報モデル			
第 I 世代 IBM704	1959.3	59.6 北半球バランス・パロトロピックモデル (381km)	61.9 アジア準地衡風モデル (304.8km L4)	63.9 台風バランス・パロトロピックモデル (381km)	
II HITAC 5020/5020F	1967.4	70.4 北半球バランスモデル (381km L3)	73.10 アジア・プリミティブ・ファインメッシュモデル FLM (152.4km L6)		
III HITAC 8700/8800	1973.8	75.1 北半球プリミティブモデル NHM (381km L4)			
IV HITAC M- 200H (2台)	1982.3	82.3NHM (381km L8) 83.3 北半球スペクトルモデル HSM (280km L12)	82.3 FLM (127km L10) 83.3 FLM (127km L12) 83.3 FLM (127km L12)	83.3 日本域微格子モデル VFM (63.5km L11) 84.11 VFM (63.5km L13)	82.3 台風 3次元モデル MNG (381, 191, 95km L3)
V HITAC M- 680H HITAC S- 810/20K	1987.9 1987.12	87.12 全球モデル GSM (280km L12) 88.3 全球モデル GSM (180km L16) 89.1 全球モデル GSM (110km L21)	88.3 アジアモデル ASM (75km L16)	88.3 日本域モデル JSM (40km L19) 92.3 日本域モデル JSM (30km L23)	88.3 台風モデル TYM(50km L8)
VI HITACHI S-3800/480	1996.3	96.3 全球モデル GSM (60km L30)	96.3 領域モデル RSM (20km L36)	98.3 メソ数値予報モデル静力学 MSM (10km L36)	96.3 台風モデル TYM(40km L15)
VII HITACHI SR8000E1	2001.3	01.3 全球モデル GSM (60km L40) 05.2 全球モデル GSM (60km L40) (セミラグランジュ法に変更)	01.3 領域モデル RSM (20km L40)	01.3 静力学 MSM (10km L40) 04.9 非静力学 MSM(10km L40)	01.3 台風モデル TYM(24km L25)
VIII HITACHI SR11000/K1 (2台)	2006.3	06.3 全球モデル GSM (20km L60) (08.2 台風アンサンブル予報システム運用開始)	07.11 GSM に統合	06.3 非静力学 MSM (5km L50)	07.11 GSM に統合
IX HITACHI SR16000M1 (2台)	2012.6	14.3 全球モデル GSM(20km L100) (物理過程の改良)		12.8 非静力学局地モデル LFM (2km L60)運用開始 15.1 LFM asuca 導入 17.2 非静力学 MSM (2km L=76) asuca 導入	
X Cray XC50 (2台)	2018.6				

ータ同化にあたっては3次元変分法が、その他のモデルのデータ同化には4次元変分法が用いられている。表-5 に気象庁で運用しているサブモデルを含めた数値予報モデル一覧（2018年3月現在）を示す。2018年6月にはGSM予報時間が84hから132hに延長され、2019年中にはLFMおよびMSMの予報時間の延長、メソアンサンブルモデルの運用開始が予定されている。

気象庁が開発した第3世代波浪モデルMRI-IIIによる、極域を除くほぼ地球全体を対象とする全球波浪モデル（解像度0.5度、スペクトル成分900）と日本周辺を対象とする沿岸波浪モデル（解像度0.05度、スペクトル成分900）の二つの数値波浪モデルが常時、運用されている。一部の内海、内湾に対しては、波浪モデルWAMを用いた高解像度の浅海波浪モデル（解像度1分、スペクトル成分1260）による予測計算も行われている。外力の海上風には全球モデルGSMの予測値が用いられるが、浅海波浪モデルに対してはメソモ

デルMSMの風を使って風応力を計算している。台風が発生している場合は、台風予報円の円周上の4点(右端, 左端, 最速, 最遅)を通ったとした4コースについても台風による仮想的な傾度風で補正した風を用いた波浪予測を行っている<sup>13)</sup>。

気象庁の高潮モデル(解像度30秒)には単層の2次元非線形長波方程式が用いられ、大気からの外力項の計算にはメソモデルMSMの風・気圧場の格子点値GPVが使われている。高潮モデルは毎日、1日8回39

表-5 運用中の数値予報モデル<sup>15)</sup>

予報モデルの種類	モデルを用いて発表する予報	計算領域と水平分解能	予測時間(初期時刻)	実行回数
局地モデル	航空気象情報 防災気象情報 降水短時間予報	日本周辺 2km	9時間 (毎時)	1日24回
メソモデル	防災気象情報 降水短時間予報 航空気象情報	日本周辺 5km	39時間 (00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21時)	1日8回
全球モデル	分布予報 時系列予報 府県天気予報 台風予報 週間天気予報	地球全体 20km	84時間(03, 09, 15時) 264時間(21時)	1日4回
全球アンサンブル予報システム	台風予報 週間天気予報 異常天候早期警戒情報 1か月予報	地球全体 18日先まで40km 18~34日先まで55km	11日間(09, 21時) 5.5日間(03, 15時: 台風予報用) 18日間, 34日間	1日最大4回 それぞれ週4回
季節アンサンブル予報システム	3か月予報 暖候期・寒候期予報 6か月先までのエルニーニョ現象等の見通し	地球全体 大気 110km 海洋 50~100km	7か月間	月1回
全球波浪モデル	外洋波浪予想(波浪図)	極地方を除く地球全体 55km	84時間(03, 09, 15時) 264時間(21時)	1日4回
沿岸波浪モデル	波浪予報	日本周辺 5km	84時間(03, 09, 15, 21時)	1日4回
波浪アンサンブルモデル	週間天気予報(波浪)	極域を除く地球全体 140km	264時間(21時)	1日1回
日本域高潮モデル	高潮情報(警報・注意報)	日本周辺沿岸部 1km	39時間(00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21時)	1日8回
アジア域高潮モデル	高潮情報(アジアの気象局で利用)	北西太平洋 3.7km	72時間(03, 09, 15, 21時)	1日4回
海況モデル	海面水温・海流1か月予報	北西太平洋 10km	35日間	1日1回
海水モデル	海水予報	オホーツク海南部 12.5km	168時間(09時)	週4回
黄砂予測モデル	黄砂情報	地球全体 40km	120時間(21時)	1日1回
全球化学輸送モデル	紫外線情報	地球全体 110km	120時間(21時)	1日1回
領域大気汚染気象予測モデル	スモッグ気象情報 全般スモッグ気象情報	東アジア領域 20km	72時間(21時)	1日1回



時間予測を行い、それに面的天文潮位による天文潮位を加えた値を日本沿岸の 1km メッシュの GPV に展開して予測潮位を提供している。この予測潮位は、波浪のセットアップや暖水渦などの海況要因による潮位上昇が見込まれる場合、補正量を加えた値を（補正済み）高潮ガイダンスとして提供している。なお、セットアップによる潮位上昇については、高潮モデルには組み込まれておらず、過去の観測結果から経験式が求められている検潮所で、沿岸波浪モデルによる有義波高の予測値を経験式に代入して補正量を求めている。台風の進路、風・気圧場の予報結果は、高潮の規模や発生時間に大きく影響する。そのため台風が日本に接近すると予想される場合は、MSM の風・気圧場 GPV を用いるメンバーに加えて、予報円の中の 5 つの異なるコースを通過する台風ボーガスの風・気圧場を用いた 5 メンバー、すなわち計 6 メンバーの予測計算を行っている。ただし、アンサンブル予測計算は行っておらず、台風時には予報円の中心を通る台風ボーガスによる高潮予測結果を基本としている。また、台風ボーガスは台風強度・移動速度は一定として外挿するため、24 時間以内に台風が衰弱して熱帯低気圧化する場合や台風でなくなる場合、温帯低気圧化した後に再発達する場合などの高潮予測値は過大または過小となる可能性がある<sup>14)</sup>。

全球モデル GSM による台風進路の予報誤差は年々減少し続けており、24 時間予報で 1985 年では年平均予報誤差が 200km を超えていたものが 2018 年には過去最高レベルの約 70km にまで低下している。一方、台風中心気圧の年平均誤差の減少は見られず、24 時間予報で年平均の 2 乗平均平方根誤差は 2000 年で 10hPa 程度であったものが、2015 年には約 13hPa に増加している。台風強度の 24 時間予報を最大風速で見ても、2001 年の平均誤差 5.2m/s から 2018 年の 5.4m/s へとほぼ横ばいである。24 時間後の台風進路の予測誤差がベストの 70km としても、日本の内湾の規模では数十キロずれると湾の東から西へ台風進路が変わることになるため、メソモデル MSM の環境場を与える入力値として使う際にも注意を要する。

#### 4. 高潮関係の法令・行政および研究の展開

##### (1) 1959 年～1990 年

伊勢湾台風 6 年前の 1953 年 9 月に東海地方に上陸した台風 13 号による甚大な被害を受けて、海岸保全の実施のための特別な国庫負担率を定める特別立法が制定された。この特別立法を契機として、1956 年には津波、高潮、波浪その他海水又は地盤の変動による被害から海岸を防護することを目的とする海岸法が制定されている。伊勢湾台風直後の 1959 年 12 月には、伊勢湾等に面する地域における高潮対策事業に関する特別措置法が制定され、各種の高潮防御施設の整合性を図るために、関係省庁（総理府、経済企画庁、科学技術庁、大蔵省、農林省、運輸省、建設省）によって構成された伊勢湾等高潮対策協議会が設置された。

協議会は 1960 年 2 月には伊勢湾高潮対策事業の基本方針を決定し、計画潮位偏差および計画波浪には伊勢湾台風時のものを、天文潮位は台風期（7～10 月）の平均満潮位を採ることによって、海岸堤防の計画高さを TP+7.5m とした。また、堤防の構造については、計画上では越波させない堤防においても天端面および裏法面には被覆工を施すことや、越波を許容する場合には法面保護および法尻の洗掘防止を強化すること、将来予想される地盤沈下に十分対処し得るよう考慮することなどが定められた。同年 10 月には名古屋港高潮防波堤計画の基本方針が決定され、鍋田干拓地から対岸に延長約 8.2km の防波堤を築造して台風時の波高や潮位のピークカット（気象庁の高潮モデル数値計算によると、潮位偏差は 0.5m、波高は 0.7～1.3m それぞれカットされる）により、高潮防波堤内の海岸堤防等の高さを TP+6.2～6.3m に低減させることができると定めた。以上の方針に基づき、全体事業は対象となる海岸等延長約 679km で 2 度にわたる補正予算により事業費約 825 億円と決定され<sup>16)</sup>、建設省関係の直轄事業は 1962 年<sup>17)</sup>に、補助事業も翌 1963 年に完成し、名古屋港高潮防波堤も 1964 年に完成した。

時代は高度経済成長期にあり、この後にも全国の海岸や臨海部埋立地で高潮対策事業は確実に進捗し、1960 年では 1,750km 程度であった海岸堤防は 1970 年には 2,500km に延長され、1970 年代終りにはほぼ現在

の2,900kmと同じ総延長の海岸堤防が完成している。その間、海岸堤防などの海岸保全施設の耐波設計や施工技術が著しく向上し、1969年の海岸保全施設設計便覧の改訂に至っている。1970年頃からは、侵食対策や既設の海岸堤防の安定化のために離岸堤などと組み合わせた面的な海岸防護も行われるようになった。

防災行政については、伊勢湾台風の甚大な災害を契機として、1961年に災害対策全体を体系化して総合的かつ計画的な防災行政の整備および推進を図ることを目的とした災害対策基本法<sup>18)</sup>が制定されている。防災活動の組織化、計画化を図るための総合調整機関として、国、都道府県、市町村それぞれに中央防災会議、都道府県防災会議、市町村防災会議を設置することとされ、災害発生またはその恐れがある場合には、災害応急対策等を実施するため都道府県または市町村に災害対策本部を設置することとされている。中央防災会議は、防災基本計画を作成し防災に関する総合的かつ長期的な計画を定めるとともに、指定公共機関等が作成する防災業務計画および都道府県防災会議等が作成する地域防災計画において重点をおくべき事項等を明らかにすることとしている。災害対策を災害予防、災害応急対策および災害復旧という段階に分け、それぞれの段階毎に、防災訓練義務、市町村長の警戒区域設定権、応急公用負担、災害時における交通の規制等についての規定が設けられた。また、災害予防および災害応急対策に関する費用の負担等については、原則として、実施責任者が負担するものとしながらも、特に激甚な災害については、地方公共団体に対する国の特別の財政援助、被災者に対する助成等を行うこととされている。これを受け、激甚災害に対処するための特別の財政援助等に関する法律(1962年法律第150号)が制定された。この災害対策基本法は、地震、風水害、原子力事故などの災害が発生するたびに見直され、最近では毎年のように改定されている。

伊勢湾台風の翌年の1960年には、今も使われている単層の非線形長波方程式による高潮数値計算が気象庁<sup>19),20)</sup>によって行われ、伊勢湾台風の高潮偏差に対する数値モデルの再現性について調べている。当時の電子計算機の性能から2kmメッシュでの計算が限界で十分な分解能を有しているわけではないが、数値モデルはその後、伊勢湾台風を想定した東京湾<sup>21)</sup>、大阪湾および瀬戸内海西部<sup>22)</sup>の高潮計算にも用いられている。同様な高潮数値モデルを用いて防潮堤の高潮制御効果<sup>23)</sup>についても検討が加えられている。また、京都大学宇治川水理実験所の名古屋港潮流実験模型(四日市と常滑を結ぶ線から北側の海域模型)の実験結果が報告<sup>24),25)</sup>され、高潮発生装置を使って気象擾乱の海面変動を調べた実験<sup>26)</sup>も行われ、この時期には高潮の基礎的研究が盛んに行われた。

1960年には浅海の波浪推算法に基づく伊勢湾台風時の湾内の波浪推算結果<sup>3),4)</sup>が発表され、1964年には光易により強風域では今なお未解明である海面抵抗係数に関する論文<sup>27)</sup>が発表されている。傾斜壁でのり先水深が小さい海岸堤防の波圧分布<sup>28)</sup>、海岸堤防の越波に及ぼす風の影響<sup>29),30)</sup>、防潮水門に作用する波圧<sup>31)</sup>に関する論文も相次いで発表されている。1965年頃からは大阪湾を対象とした、西神戸高潮対策事業<sup>32)</sup>、大阪市内河川の高潮遡上<sup>33)</sup>、大阪湾の台風時波浪の推算<sup>34)</sup>などの研究論文が増えている。

1970年代から1980年代にかけては、大規模台風の来襲はほとんど見られなくなり、高潮被害も極端に少なくなった。1970年~1990年の間に発表された高潮関連の論文はわずか18編である。1970年の台風10号による土佐湾の高潮に関する研究<sup>35)</sup>を除くと、特定の高潮災害を対象とした論文は減って、不規則波期待越波流量、湾水振動、高潮氾濫モデルの開発などの基礎的研究の論文が目立つようになり、1971年、1973年、1978年、1983年、1985年、および1989年の6年では高潮関連の論文はゼロになった。なお、1980年にはモデル台風を50年~100年分発生させて確率年最大偏差を求める手法<sup>36)</sup>が提案されており、1985年には大阪を対象として高潮の最大潮位偏差と台風性降雨の同時生起性を解析した論文<sup>37)</sup>が発表されている。

なお、研究に関しては、以降においても基本的に海岸工学論文集と土木学会論文集Bについて年次ごとに調べ引用することとする。

## (2) 1991年~2010年

この30年は大規模台風による災害、とくに高潮災害は減少傾向にあったこともあり、従来の防護一辺倒か

ら海洋性レクリエーションなどの海岸利用、景観や生態系保全などの海岸環境へと人々の関心も移って行った。1999年には、防護・環境・利用の調和のとれた総合的な海岸管理を行うため、旧海岸法の目的である海岸の防護に、海岸環境の整備と保全、および公衆の海岸の適正な利用の確保を加えて法改正がなされた。海岸法の対象となる海岸を一般公共海岸（自然公物として公衆の自由使用に供される公共海岸のうち海岸保全区域以外の区域を一般公共海岸区域とする）へ広げて、土地の占用、土石の採取等の許可等の海岸法に基づく管理を行う区域とした。市町村長が、都道府県知事等と協議して、海岸保全区域および一般公共海岸区域における日常的な一部の管理を行うことを可能にした。また、海岸整備の計画制度が大幅に見直され、主務大臣による海岸保全基本方針と都道府県知事による海岸保全基本計画を策定することとし、後者については地域の意向等を反映するため、学識経験者、市町村長、地域住民等の意見聴取手続を行うこととした。

海岸保全基本方針を受けて全国の海岸ブロック単位で海岸保全基本計画が作成され、愛知県では2003年に遠州灘沿岸海岸保全基本計画および三河湾・伊勢湾沿岸海岸保全基本計画の二つの基本計画を策定している。

2000年には、海岸保全施設設計便覧が、環境との共生を考えた海岸保全施設のあり方、海岸の多様性に対応した海岸整備の方策、海岸保全施設の耐震性確保等の新しい課題に対応する形で改訂され、保全という言葉を略して本のタイトルが海岸施設設計便覧に変更された。

1990年代になると地球温暖化が台風や高潮特性に及ぼす影響についての研究が始まり、史資料解析に基づく長期的な気温変化と台風特性や高潮発生との関係<sup>38)</sup>、海面上昇に伴う高潮浸水域の拡大<sup>39)</sup>などが調べられている。2000年には、アジア・太平洋の沿岸域における水没域と高潮氾濫域への影響評価<sup>40)</sup>や、2008年になると、GCMシミュレーションとIPCCのAR4モデルによるA1Bシナリオの予測結果を高潮・波浪結合モデルに適用して高潮の将来変化を調べた研究<sup>41), 42), 43)</sup>が登場した。

1991年のサイクロンはベンガル湾に偏差4mの高潮を発生させ、バングラデシュで死者13万人を超える巨大災害をもたらした。このサイクロンによる高潮の特性や陸域への遡上を調べるため数値計算<sup>44), 45)</sup>による検討が行われている。また、準3次元高潮数値モデルが提案され<sup>46)</sup>、確率的台風モデルを用いた高潮の極値推定に関する研究<sup>47)</sup>、大阪湾を対象とした市街地の高潮氾濫解析<sup>48), 49)</sup>や、高潮による地下街水害対策の提案<sup>50)</sup>も行われている。1996年には、1970年の台風10号によって土佐湾で発生した高潮の追算を通して、この高潮偏差には波浪によるセットアップが大きく寄与したことが明らかにされている<sup>7)</sup>。

1999年、八代海の湾奥部の堤内地に高潮を流入させ人的損失をもたらした台風18号は、高潮研究にもインパクトを与えた。翌年には、九州沿岸と瀬戸内海西部<sup>51)</sup>、八代海西部<sup>52)</sup>、周防灘海域<sup>53)</sup>、などにおける高潮災害の調査結果や再現計算による高潮特性の把握に関した多くの研究が発表されている。年間最多の10個の台風が上陸した2004年についても、高松市など瀬戸内海沿岸に浸水被害をもたらした台風16号に関する論文<sup>54)</sup>が多く発表され、台風16号の高潮浸水被害については高松市と倉敷市で住宅などの一般資産の被害に関するアンケート調査<sup>55)</sup>が行われている。米国の自然災害史上、最悪の被害をもたらしたハリケーン・カトリーナの高潮浸水についても調査研究<sup>56), 57)</sup>や再現計算<sup>58), 59)</sup>の結果が発表されている。

この時期からは、潮汐・高潮・波浪の相互作用を考慮した数値モデル<sup>60), 61)</sup>が広く使われるようになり、気象場にメソモデルを用いた高潮・波浪結合モデルによる高潮再現計算<sup>62), 63), 64)</sup>や、確率台風モデルによる予測計算<sup>65)</sup>、高潮の表面流と下水道流などを統合させた氾濫解析<sup>66)</sup>などが行われ、新しいタイプの高潮数値モデルの開発が進んだ。

### (3) 2011年～2018年

東日本大震災を踏まえて、大規模広域な災害対策の見直しが中央防災会議の下の防災対策推進検討会議で進められ、2012年と2013年の2回にわたって災害対策基本法の改正が行われた。主な改正内容は、1) 大規模広域な災害に対する即応力の強化（災害により地方公共団体の機能が著しく低下した場合、国が災害応急

対策を応援し応急措置を代行する仕組みをつくること等), 2) 住民等の円滑かつ安全な避難の確保(市町村長は、高齢者、障害者等の災害時の避難に特に配慮を要する者について名簿を作成し、名簿の作成に際し必要な個人情報を利用できること等), 3) 被災者保護対策の改善(市町村長は、被災者に対する支援状況等の情報を一元的に集約した被災者台帳を作成することができるものとするほか、被害の程度等に応じた適切な支援の実施を図るため罹災証明書を遅滞なく交付しなければならないこととする等), 4) 平素からの防災への取組の強化(住民の責務に生活必需物資の備蓄等を明記するとともに、市町村の居住者等から地区防災計画を提案できることとする等)と多岐にわたる<sup>18)</sup>。また、減災の考え方が明記され、あらゆる分野で災害の発生を常に想定し、災害が発生した場合、できる限りの被害の最小化と迅速な回復を図るといった基本理念が示された。

東日本大震災でこれまでの想定を超えた巨大な地震・津波により甚大な被害を受けたことを踏まえて、最大クラスの津波に対しても被害の最小化を図るために海岸の防災・減災対策を強化するとともに、高度成長期等に集中的に整備された海岸堤防等の海岸保全施設の老朽化に対応することを目的として、前回改正から15年ぶりとなる2014年に海岸法が改正された。主な改正点は、1) 海岸管理における防災・減災対策の推進(堤防と一体的に設置される減災機能を有する樹林(緑の防潮堤)など粘り強い構造の海岸堤防等を海岸保全施設に位置づける)、2) 水門・陸閘等の安全かつ確実な操作体制の確立(水門・陸閘等について、災害発生時に現場操作員の安全を確保しつつ適切に操作するための操作方法、訓練等に関する操作規則等の策定を海岸管理者に義務づける)、3) 海岸保全施設の適切な維持管理(海岸管理者の海岸保全施設に関する維持・修繕の責務を明確化し、予防保全の観点から維持・修繕に関する技術的基準を主務省令で定める)、4) 地域の実情に応じた海岸の維持管理の充実(海岸管理者は、海岸保全施設または公共海岸の維持等を適正かつ確実に行うことができる法人・団体を海岸協力団体として指定することができる)の4項目である。また、翌年の2015年には、各都道府県知事が定める海岸保全基本計画における海岸保全施設の整備に関する事項が細分化され、海岸保全施設の新設または改良に関する事項および海岸保全施設の維持または修繕に関する事項が規定された海岸保全基本方針に変更された。

この海岸保全基本方針の変更により全国の海岸保全基本計画の改訂が行われ、愛知県では2015年12月に、地震・津波、高潮に関する新たな知見および施設の維持または修繕に関する事項を踏まえて、遠州灘沿岸海岸保全基本計画および三河湾・伊勢湾沿岸海岸保全基本計画を変更している。なお、愛知県では海岸保全基本計画の変更在先立ち、当該地域では津波災害と同様に高潮災害についても高いリスクを抱えていることから、防護レベルである既往最大台風の伊勢湾台風級と減災レベルである室戸台風級の二つのレベル台風に対して高潮浸水数値シミュレーションを実施し、2014年11月に室戸台風級について高潮浸水想定を公表<sup>6)</sup>(図-4)している。この数値シミュレーションでは、潮位には台風期の平均満潮位、河川流量には平水流量がそれぞれ用いられ、海岸堤防は越流や許容越波量を超えても決壊しないこととしている点で、国が2015年に作成した「高潮浸水想定区域図作成の手引き」<sup>6)</sup>の数値シミュレーション条件と異なる。

将来、今まで考えられなかった規模の水災害が発生する場合でも、少なくとも命を守り(逃げ遅れゼロ)、社会経済に対して壊滅的な被害が発生しないという考えに基づき、2015年5月に水防法が改定された。高潮においても設計外力を超え想定し得る最大規模の高潮により浸水が想定される区域を指定し、避難警戒体制を整えるために、1) 高潮に係る水位情報の通知及び周知(水防法第13条の3: 都道府県知事が高潮により相当な損害を生ずるおそれがあるものとして指定した水位周知海岸(高潮が河川において影響する区間を含む)について、高潮特別警戒水位に達したときは、直ちに水防管理者、量水標管理者および関係市町村長に通知するとともに、必要に応じ報道機関の協力を求めてこれを一般に周知しなければならない)、ならびに2) 高潮浸水想定区域の指定(水防法第14条の3: 都道府県知事は、水位周知海岸として指定した海岸について、高潮時の円滑かつ迅速な避難を確保し、水災による被害の軽減を図るため、想定し得る最大規模の高潮により浸水が想定される区域を高潮浸水想定区域として指定するものとする)が規定された。

愛知県高潮浸水想定

この図解に該当する市町村: 中川区、海部、愛西市、弥富市、豊川市、豊島村



(a) 弥富市・飛島村周辺

愛知県高潮浸水想定

この図解に該当する市町村: 千種区、東郷、西郷、中川区、中区、昭和区、瑞穂区、熱田区、中川区、清洲、南郷、細川、天白区、東海市、大治町、豊川市、豊島村



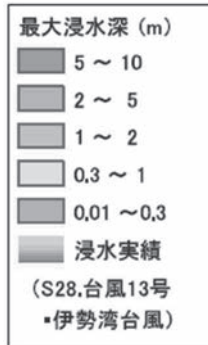
(b) 名古屋市南部

愛知県高潮浸水想定

この図解に該当する市町村: 海部、瑞穂、東郷、大府市、知多市、知多町、豊島村、東浦町



(c) 東海市・知多市周辺



[台風規模]	[計算条件]
室戸台風級	台風期の平均満潮位 水門は閉鎖し、破堤しない 降雨なし

図4 2014年公表の愛知県高潮浸水想定図の一部<sup>67)</sup>

高潮浸水想定区域図(高潮浸水想定区域、浸水深、浸水継続時間)を求めるための高潮浸水深シミュレーション手法については、現在までの科学的知見に基づき高潮浸水想定区域図作成の手引き<sup>6)</sup>に細かく定められている。手引きによると、想定台風を当該地域等で潮位偏差が最大となるよう複数の台風経路を設定して高潮浸水シミュレーションを実施し、その結果を重ね合わせて最大の浸水深を示す図を作成するとされている。想定する台風の中心気圧は室戸台風を基本とし、対象とする海岸における緯度を考慮して台風の中心気圧を増減させた設定値を用い、最大旋衡風速半径および移動速度については伊勢湾台風を基本とし、一定のまま移動させることとしている。河川流量については基本高水流量を基本とし、既設の洪水調節施設による調節や、高潮による影響が明らかな区間より上流における河川堤防の天端越流を考慮して設定すること、海岸保全施設や河川管理施設である堤防等については、最悪の事態を想定し、設計条件に達した段階(うちあげ高が堤防天端高を超える、潮位が設計高潮位を超える、越波流量が許容越波流量を超える)で決壊するものとして扱うことをシミュレーション条件としている。また、浸水想定区域図の作成にあたって、北海道・東北地方・北陸地方については、温帯低気圧によって大きな潮位偏差が発生していることから低気圧についても

考慮すること、寄り回り波等の周期の長いうねり性の高波による浸水実績がある地域については、うねり性の高波についても考慮することなどが求められている。

2011年には、気象研究所の気候予測モデルや IPCC の A1B シナリオ、確率台風モデルに基づいた将来高潮・高波の予測に関する論文<sup>68,9</sup>編が発表されている。この年には、気象庁が伊勢湾台風から50年を契機に全球再解析気象データ JRA55 を用いて伊勢湾台風の再解析<sup>69</sup>を行っており、その再解析結果を使って伊勢湾台風高潮の再現性向上の有無についても検討<sup>5</sup>されている。また、強風時における鉛直混合に対する表層物理モデル<sup>70</sup>、局地気象モデル WRF の計算特性<sup>71</sup>、潮汐・波浪・高潮結合モデルの開境界条件<sup>72</sup>、非構造格子汎濫解析モデル<sup>73</sup>など、高潮数値予測モデルの改良につながる研究も行われている。2012年と2013年には、東日本大震災を踏まえた津波対策と同様な減災レベル（レベル2）に対応する、今までにない強い台風により想定される最大クラスの高潮に関する研究<sup>74,75</sup>が進められ、地球温暖化に伴う高潮の将来予測に関する研究と合わせて15編の論文が発表されている。翌年2014年には、台風ハイエンによる高潮の再現計算<sup>76</sup>がさまざまな数値モデルにより行われ、この年だけで被害調査と合わせて10編の論文が報告されている。

2015年には、JRA55を用いた伊勢湾台風の高潮追算<sup>77</sup>や、MM5高解像度台風モデルを用いた台風ハイエンの再現計算<sup>78</sup>、非静力学地域気象モデル RCM5（水平解像度5km）を用いた気象場のバイアス補正<sup>79</sup>など、高潮数値モデルに統合させる気象モデルの高精度化の検討が行われ、以降はメソ気象モデルに海洋モデル FVCOM を組み合わせた数値モデル<sup>80</sup>や、海洋モデルに ROMS を用いた数値モデル<sup>81</sup>など、大気・海洋・波浪結合モデルに関する研究が盛んに行われるようになった。また、極値の生起確率に対する気候変動の影響の検出とそれに伴う空振りと見逃しの過誤のバランス評価に関する研究<sup>82</sup>、2014年12月の冬季に急速に発達した温帯低気圧による高潮の統計的リスク<sup>83</sup>や北海道東部沿岸における高潮・波浪の再現計算<sup>11</sup>、北陸沿岸の高潮特性に関する研究<sup>84</sup>、越波に対して粘り強い海岸堤防の構造に関する研究<sup>85,86</sup>も行われ、関連論文はこの10年だけで180編も発表されており、高潮防災に関する研究はこの10年で格段に進んだ。

## 5. いまからの課題

いまずぐにでも取り組むべき課題には、主に行政や地下街等の管理者が関わる次の a～e と、大学等の研究機関に関わる f, g が挙げられる。

### a) 水防法第15条（避難支援）の実施

前節4.(3)に示した改正水防法第14条の3に則り高潮浸水想定区域の指定があったときは、水防法第15条により各市町村は避難の支援に必要なハザードマップを作成することになっており、「市町村地域防災計画において、その区域ごとに、汎濫危険情報の伝達方法、避難場所・避難経路に関する事項、防災訓練として市町村長が行う高潮に係る避難訓練の実施に関する事項、高潮浸水想定区域内の地下街等・要配慮者利用施設等の名称及び所在地等の事項について定めるものとする。また、関係市町村長は、これらの事項を住民、滞在者等に周知させるため、これらの事項を記載した高潮ハザードマップの作成及び配布等の必要な措置を講じなければならない」と定めている。東京都と福岡県は、昨年3月にそれぞれ東京湾および玄界灘の高潮浸水想定区域図を公表しており、避難の支援に必要な措置を具体的に検討する段階にある。愛知県・伊勢湾や大阪府・大阪湾についても浸水想定区域図の公表に向けた検討会が進められており、本格的な台風シーズンになるこの水工学に関する夏期研修会頃あたりには順次発表される見通しである。

一度、高潮・洪水による浸水被害が発生すると、低平地を中心に長期にわたる広域避難が必要になる可能性がある。広域避難が想定される愛知県、大阪府でも「首都圏における大規模水害広域避難検討会」のような協議会を設け、広域避難場所、避難手段や誘導、行政機関の役割分担、交通機関の運航停止のタイミング等を事前に検討しておくべきである。低平地で、かつ住宅地周辺に高層ビルが無いような地区については、避難指示（緊急）（警戒レベル4）の段階で避難が完了できるよう、タイムラインの考え方に基づいて避難手

順を事前に検討しておくべきである。伊勢湾台風では、高潮水害が特に甚大であった名古屋市南部地区の被災者は地域ごとに、学童は学区ごとにまとめて市北部の指定避難所に避難させているが、これは台風が去り復旧工事がある程度進んだ後での集団避難であった。

人々は、地下街は暴風雨の影響を受けづらく、台風時も安全と考えがちである。2003年には台風14号により韓国南部の馬山湾で高潮が発生し、この高潮は馬山市で地下施設への浸水により死者十数名の人的被害をもたらした<sup>87)</sup>。水防法により、不特定多数の者が利用する地下街等に対しては、洪水に際しての避難確保計画の作成が所有者または管理者に義務付けられており、2013年の水防法改正では浸水防止計画についても義務化され、2015年には洪水に加えて、内水、高潮も対象になった。地下街への浸水は連続する地下鉄への浸水とつながることもあるため、地下空間が一体となった浸水防止策をとる必要がある。水防法では、地下街、地下鉄駅、地下ビル等が連続している場合、連続している範囲で共同して一体的な計画を作成することができるとしているが、管理者相互の連携を図るには行政の強い後押しが必要である。

### b) 高潮、河川、内水の三つの氾濫危険情報

高潮特別警戒水位は、越流氾濫からリードタイムを考慮した水位と決壊氾濫に達する水位を比較し、低い水位をもって警戒水位としている。運用にあたって、このリードタイムを長くすると、高潮特別警戒水位の設定水位が低くなるために高潮特別警戒水位に到達する頻度が多くなり、逆に短くし過ぎると、高潮の水位が急激に上昇し避難情報には使えないという問題に直面する。愛知県では住民への伝達に要する時間を含めてリードタイム（案）を60分と想定している<sup>88)</sup>。あらかじめ指定されている基準水位観測所の水位がこの特別警戒水位に達したとき、県より高潮氾濫危険情報が発表されることになっているが、このタイミングはリードタイムの設定により決まる図-4 および図-5 のようであり、暴風により避難所への移動が困難となる段階である。この高潮氾濫危険情報は、逃げ遅れゼロとするための住民への最終警告と位置付けられ、垂直避難などの緊急避難を促す情報提供と見なさざるを得ない。

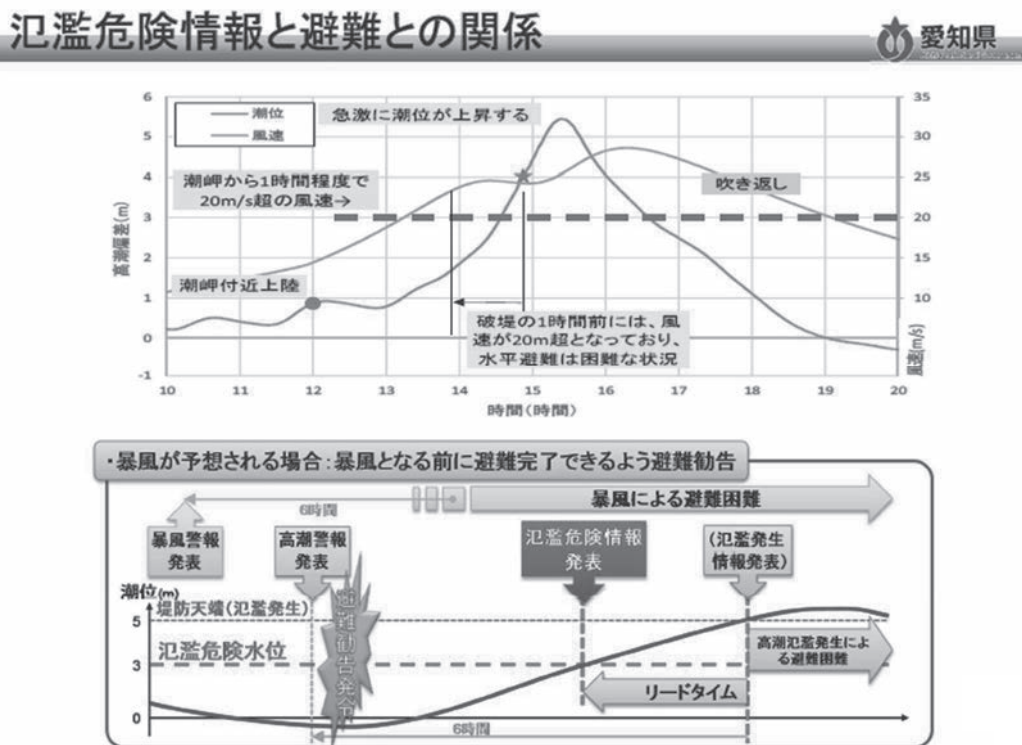


図-4 高潮氾濫危険情報のタイミング<sup>88)</sup>

## ②高潮氾濫危険情報の活用について

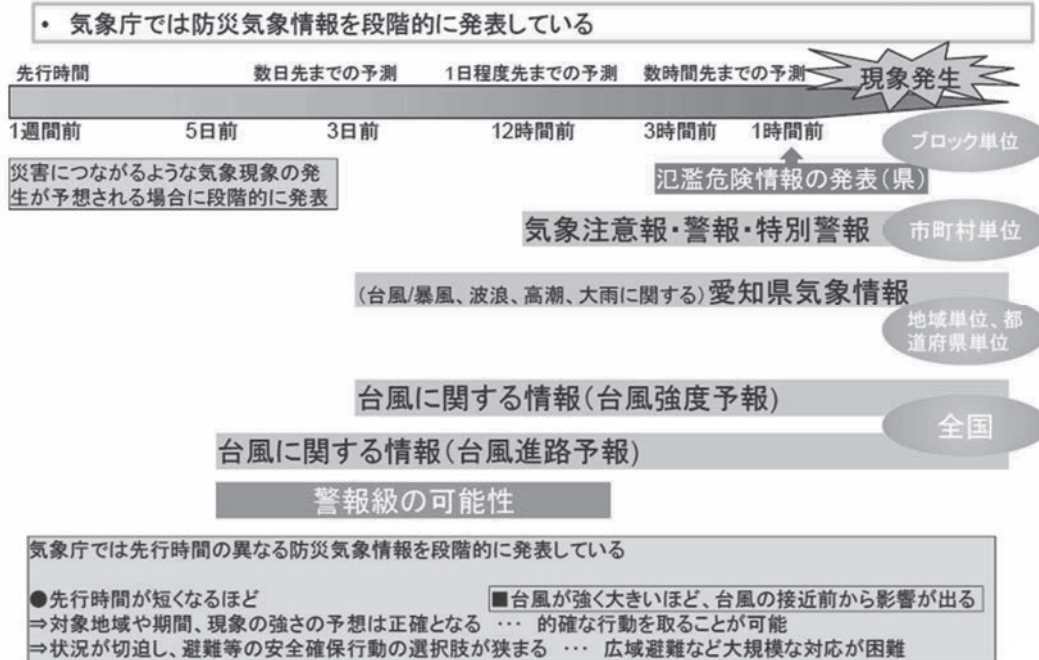


図-5 氾濫危険情報と気象情報との関係<sup>88)</sup>

高潮氾濫危険情報に加えて、洪水予報河川の観測所毎に設定した氾濫危険水位に達したときには河川氾濫危険情報が、内水による災害の発生を特に警戒すべき水位として、指定した水位周知下水道について設定された内水氾濫危険水位（雨水出水特別警戒水位）に水位周知下水道の水位が達したときは内水氾濫危険情報が、それぞれ発表されることになっている。台風通過時には、これら三つの氾濫危険情報が相次いで発表される可能性もあり、避難勧告等の発令に際し混乱を生じさせる恐れがある。それぞれの氾濫危険情報が示す緊迫度や影響範囲、避難の方法や情報の伝達方法などを十分に検討したうえで、あらかじめ市町村地域防災計画に避難勧告等の判断基準を定めておき、これらの情報が住民の適切な避難行動につながるように運用すべきである。

### c) 老朽化対策と堤防高のかさ上げ

南海トラフ巨大災害と同列で減災対策を講じるためには、伊勢湾台風を上回る想定台風による高潮・洪水がもたらす被害規模、すなわち浸水想定範囲内に居住する人口や避難を余儀なくされる人口、直接および間接の資産損失などを最初に明確にしておく必要がある。伊勢湾台風では、臨海部低平地の堤防が切れたことにより低平地の被害が激甚化し、被災地の生産活動が長期にわたる湛水で完全に停止した結果、愛知・三重両県のみで推定被害額 5,050 億円（当時の日本の GNP の約 4 割）に達したと報告されている<sup>89)</sup>。可能ならば、高潮による河川氾濫や堤防の決壊を前提条件としない浸水想定範囲（東京湾は 2009 年公表の高潮浸水想定図、伊勢湾は 2014 年に愛知県が公表した高潮浸水想定図がほぼこの条件に対応）における被災人口や被害額と比較し、防護レベルの堤防等の防災限界と減災効果を明らかにしておきたい。

伊勢湾台風以降、全国で急ピッチに建設された海岸保全施設は老朽化が進み、2030 年には築造後 50 年以上経過した施設が約 7 割に達するといわれている。伊勢湾沿岸の海岸堤防については、早い時期に整備されたこともあり、2015 年時点で約 60%が築造後 50 年以上経過しており、老朽化対策は最優先で取り組むべき課題である。海岸ブロック毎に防護レベルの機能、すなわち伊勢湾台風クラスの外力に対して陸域を高波・高潮から守る機能が維持されているかを点検し、必要な修繕や改築、場合によっては堤防のかさ上げや粘り強い構造への変更などの機能の補強を確実に進めていく必要がある。



磯部雅彦・高潮水防の強化に関する技術検討委員会委員長は、想定台風による高潮浸水被害を甚大化させないためには、粘り強い構造物の開発とともに、天端高は高潮設計潮位プラス打ち上げ高で決められていることを活かして、高潮潮位分は天端高で防ぐように考えるべき、と指摘されている。伊勢湾沿岸の海岸堤防は、基本的に計画潮位+計画波に対する必要高（有義波での打ち上げ高）+余裕高で設計されており、この防護レベル（レベル1）での補強は減災レベル（レベル2）高潮への対策でもある。

#### d) 仮締切りの新工法開発

浸水継続時間は堤防の仮締切り工事と排水に要する時間にほぼ匹敵する。伊勢湾台風では、河川・海岸堤防で約220か所（総延長約33km）が破堤・決壊したため、関係機関が分担して地元住民等の協力による人海戦術をもってしても、名古屋市内で排水工事が完了したのは被災から2か月後、鍋田干拓地では仮締切りが完了するのに実に6か月以上を要した。

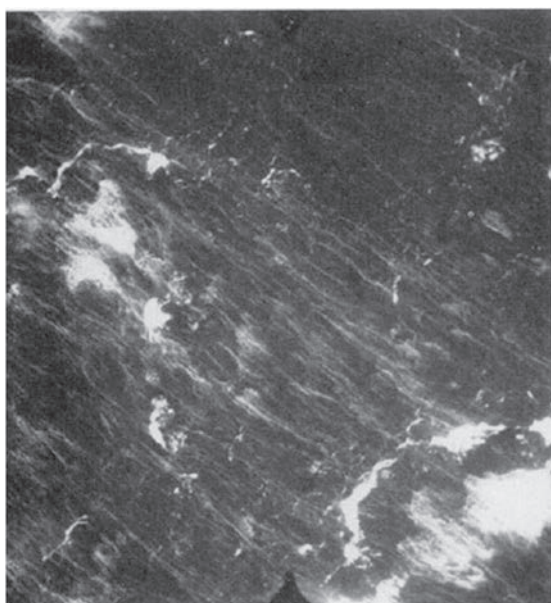
仮締切り時間を大幅に短縮できる仮締切り工法の新技術開発が望まれる。

#### e) 大型漂流物（コンテナ，自動車，船舶走錨）対策

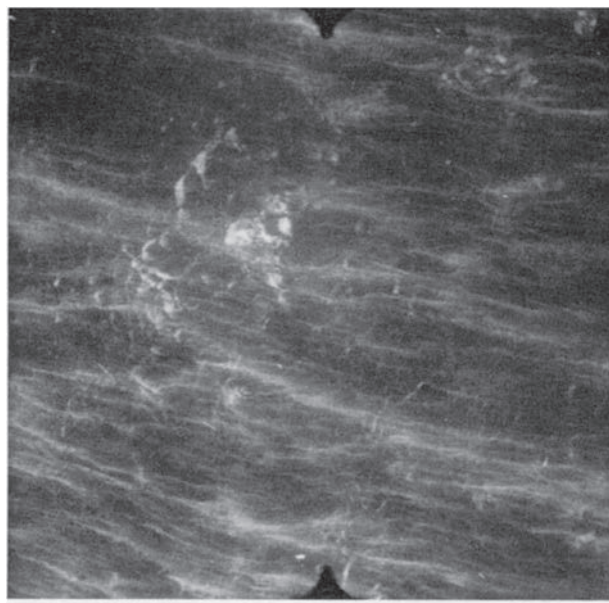
昨年8月の台風21号では、神戸のコンテナターミナルが浸水し、高潮と高波により多数のコンテナや自動車が漂流した。一部のコンテナは海へ流され、潮芦屋ビーチに漂着している<sup>12)</sup>。コンテナ、自動車などの大型漂流物のほとんどは堤外地に留まり市街地への流出は見られなかったが、大型船舶が走錨して関西空港連絡橋に衝突し交通を遮断するなど、漂流物が被害を増幅させた。運輸安全委員会等で検討されているように、非常に強い台風時に錨泊中の船舶には、双錨泊を基本に錨鎖を長く伸出して、十分な把駐力を確保する万全の錨泊方法を徹底させる対策が必要である。中空で比重の小さいコンテナや自動車は浮力の影響を受けやすく、また浮いた状態で波力が働くと相当量を移動する。高潮浸水が予想されるときにはコンテナや自動車を固定するなどの対策や、周りをフェンスで囲んで最悪でも堤防を破壊したり堤外地を越えて周辺の市街地に流出したりしないような処置を講じる必要がある。

#### f) 海面抵抗係数

メソ気象モデルのMM5やWRFを用いた気象・高潮統合モデルにおいても、気象場と高潮の結合計算は現在のところ困難であることから、風による吹き寄せの算定には海面抵抗係数Cdを介するバルク法が使われる。台風ハイエンの高潮追算には、本田・光易の算定式において風速30m/s以上はCdを一定とする条件<sup>90)</sup>や、波齢に依存するJanssenの式で風速30m/sを上限とする条件<sup>91)</sup>など、Cdに上限値を設ける条件が多く使



(a) 観測機の高度312mでの風速32.7m/sのとき



(b) 観測機の高度285mで風速45.5m/sのとき

写真-1 観測機から撮影した海面の様子<sup>94)</sup>

われている。また、ハリケーン・カトリーナの高潮追算には Garratt の式に上限値  $Cd=0.003$  を設けた算定値が比較的多く用いられている。

強風下の観測例が乏しく、Powell ら<sup>92)</sup>が示した風速 35m/s で上限値  $Cd=0.0026$  や、風洞水槽実験による Donelan ら<sup>93)</sup>の風速 33m/s で上限値  $Cd=0.0025$  とする測定値が参考にされている。しかしながら、 $Cd$ に上限値を設けても、風速の 2 乗に比例して海面抵抗は大きくなることになり、Black ら<sup>94)</sup>が示したハリケーンの強風下で撮影された海面の滑らかさと矛盾する(写真-1)。Powell らは、海面抵抗係数は風速の増加に伴い上限値をとった後、強風により白波が吹き飛ばされ崩れることにより空気力学的な海面粗度が減少し、その結果、減少に転じることを示唆している。なお、Kioka ら<sup>95)</sup>は、弱圧縮性二相流格子ボルツマンモデルを用いた数値実験で浅海における海面抵抗係数の上限値を求め、波高 2m の白波に対しては、風速 40m/s で上限値  $Cd=0.0029$  をとった後、風速 45m/s では白波が崩壊し  $Cd=0.0010$  まで低下することと、波高 4m の白波については風速 39m/s で上限値  $Cd=0.0031$  と、波高により大きくは変わらないことを示している。

#### g) 数値予測実験

高潮予測モデルに関するほとんどの研究は、追算や再現計算の hindcast を扱うものであり、予測 forecast を扱ったものは極めて少ない。最近では、京都大学防災研究所の間瀬らのグループが高潮・波浪予測モデルである SuWAT を用いて、2016 年台風 12 号による高潮の予測実験<sup>96)</sup>を行った例があげられるのみである。今後、日本の沿岸のどこかで高潮を発生させる可能性があるすべての台風に対して、間瀬らに習い forecast の数値実験を実施し、全国で指定されることになる水位周知海岸における基準観測所の潮位記録と照合して、ピーク予測値との差が例えば $\pm 30\text{cm}$ 、時間差で $\pm 30$  分以内になるように予測モデルの改善をはかるような研究が望まれる。仮に、この実務的な研究を積み重ねて予測の信頼度を高めて行く WG の設置が可能になれば、高潮災害に対する学会への社会的要請に正面から応えるものになるはずである。

風・気圧場はメソ気象モデルまたは台風モデルを用いて算定し、潮汐・高潮・波浪の統合モデルにより台風上陸の例えば 48 時間前から forecast 計算を試みる。潮汐・高潮の計算には、水位周知海岸や基準観測所付近の地形の任意性に対応しやすく、ネスティングが不要になる非構造格子モデルが望ましい。台風の進路予測には偏西風などの環境風や低気圧、高気圧の配置を考慮し得る全球気象モデルを用いる必要があるが、昨年のベストの予測精度においても 24 時間予報の誤差は約 70km となっている。メソ気象モデルへの入力や台風モデルを予報円中心に沿って適用する際、24 時間前でも高潮予測計算に対しては信頼性に欠けることになる。予報計算を 24 時間前以降も逐次実施して、十分な信頼度が得られた時刻が例えばピーク到達の 8 時間前なら、伝達等にかかる時間を差し引いても 6 時間のリードタイムを見込めることになる。

兵庫県では県管理の海岸・港湾における高潮・高波による浸水可能性を予測する高潮危険度予測システム(仮称)の開発に着手し、来年の夏の台風シーズンから試行する予定である。予報業務は気象庁のみに限られており、研究機関の WG が高潮数値予報を出すことはできないが、例えば、学会が委託を受けた都道府県を通じて沿岸市町村に数値予報情報を提供することによって、水防や避難勧告等への実質的なリードタイムの確保が見込まれることになる。

#### 参考文献

- 1) 国立情報学研究所：デジタル台風，<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/>。
- 2) 名古屋地方気象台：気象災害の記録，<https://www.jma-net.go.jp/nagoya/hp/bousai/saigai/s3409.html>。
- 3) 坂本信雄，井島武士，佐藤昭二，青野尚：浅海における風波の図式計算法，第 7 回海岸工学講演会講演集，pp.137-148，1960。
- 4) 井島武士，佐藤昭二，青野尚：伊勢湾台風による外海および伊勢湾沿岸の波，第 7 回海岸工学講演会講演集，pp.149-162，1960。
- 5) 間瀬肇，武藤遼太，森信人，金洙列，安田誠宏，林祐太：詳細気象予測値を用いた伊勢湾台風高潮の再現実験，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，第 67 巻，pp.401-405，2011。
- 6) 農林水産省・国土交通省：高潮浸水想定区域図作成の手引き，60p.，2015。
- 7) 山下隆男，別宮功：台風 7010 号の土佐湾における高潮の追算 —推算誤差は波浪か成層か？—，海岸工学論文集，第

- 43 卷, pp.261-265, 1996.
- 8) 柴木秀之, 加藤史訓, 山田浩次: 密度成層と Wave Setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算, 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp.286-290, 2001.
  - 9) 滝川清: 台風 9918 号による不知火海高潮災害 (災害報告), 土木学会誌, vol.85, Mar., pp.41-45, 2000.
  - 10) 下元幸夫, 山路昭彦, 内田洋平, 大西健二, 上原謙太郎: 瀬戸内海沿岸における波浪と高潮の同時生起特性, 海岸工学論文集, 第 53 卷, pp.211-215, 2006.
  - 11) 熊谷健蔵, 金洙列, 辻尾大樹, 間瀬肇, 辻貴仁: 2014 年 12 月の爆弾低気圧による北海道東部における高潮・波浪の再現計算, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 73 卷, pp.193-198, 2017.
  - 12) 森信人, 安田誠宏, 中條壯大, 片岡智, 鈴木高二朗, 有川太郎, 海岸工学委員会・現地調査団: 2018 年台風 21 号 Jebi による沿岸災害調査報告, Vol.103, Dec. , pp.34-37, 2018.
  - 13) 竹内仁, 高野洋雄, 山根彩子, 松枝聡子, 板倉太子, 宇都宮忠吉, 金子秀毅, 長屋保幸: 日本周辺海域における波浪特性の基礎調査及び波浪モデルの現状と展望, 測候時報, 第 79 卷 特別号, pp.25-58, 2007.
  - 14) 林原寛典: 気象庁の高潮数値予測モデルについて, 天気, 58, pp.55-60, 2012.
  - 15) 気象庁: 気象業務はいま 2018, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/hakusho/2018/index4.html>.
  - 16) 中央防災会議・災害教訓の継承に関する専門調査会: 1959 伊勢湾台風報告書, 216p., 2008.
  - 17) 吉川吉三: 伊勢湾高潮対策事業(建設省直轄施工海岸)について, 第 7 回海岸工学講演会講演集, pp.289-303, 1960.
  - 18) 内閣府: 災害対策基本法, <http://www.bousai.go.jp/taisaku/kihonhou/index.html>.
  - 19) 宮崎正衛, 宇野木早苗, 上野武夫: 伊勢湾台風による高潮とその理論計算について, 第 7 回海岸工学講演会講演集, pp.209-216, 1960.
  - 20) Miyazaki, M. et al.: On storm surges caused by the Ise Bay Typhoon and their theoretical computations, Coastal Engineering in Japan, vol.4, 1961.
  - 21) 気象庁・東京都: 東京湾高潮の総合調査報告, 10 月, 1960.
  - 22) 宮崎正衛, 上野武夫: 大阪湾および瀬戸内海西部の高潮数値計算について, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp.12-17, 1962.
  - 23) 宇野木早苗, 磯崎一郎: 防潮堤開口部の流速計算についての一考察, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp.7-11, 1962.
  - 24) 樋口明生, 吉田幸三: 名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験(1), 第 8 回海岸工学講演会講演集, pp.114-118, 1961.
  - 25) 樋口明生, 吉田幸三: 名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験(2), 第 10 回海岸工学講演会講演集, pp.92-97, 1963.
  - 26) 室田明, 村岡浩爾, 岡田耕: 高潮発生装置の試作とその予備実験, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp.126-130, 1964.
  - 27) 光易恒: 水面に作用する風のせん断力と水面粗度について, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp.42-48, 1964.
  - 28) 富永康照, 伊藤生哲: 海岸堤防に作用する波圧について, 第 11 回海岸工学講演会講演集, pp.193-201, 1964.
  - 29) 岩垣雄一, 土屋義人, 井上雅夫: 風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(I) - 風洞水槽の特性と鉛直堤の越波に関する二,三の実験 -, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp.153-158, 1962.
  - 30) 岩垣雄一, 井上雅夫, 大堀晃一: 風洞水槽を用いた海岸堤防の越波に関する研究(2) - 鉛直堤の越波におよぼす風の影響に関する実験 -, 第 12 回海岸工学講演会講演集, pp.186-192, 1965.
  - 31) 岩垣雄一, 井上雅夫, 吉川昌宏: 円弧型防潮水門に作用する波圧に関する実験, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp.139-147, 1967.
  - 32) 山崎博, 鳥居幸雄: 西神戸高潮対策事業における消波護岸構造決定について, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp.191-197, 1966.
  - 33) 岩垣雄一, 中村重久: 大阪市内河川の高潮遡上に関する実験, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp.104-113, 1967.
  - 34) 合田良実, 永井康平: 大阪湾における台風時の波浪の数値計算, 第 16 回海岸工学講演会講演集, pp.75-84, 1969.
  - 35) 中村重久, 土屋義人: 高知港模型における長周期波の特性について, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp.231-236, 1972.
  - 36) 長友文昭, 鶴谷広一, 副島毅, 宮原誠一: 確率を考慮した高潮の推算手法について, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp.557-561, 1980.
  - 37) 端野道夫, 神田徹, 北澤聖司, 横山真至: 台風性降雨と高潮の同時生起性に関する研究, 土木学会論文集, 357 号/II-3, 141-148, 1985.
  - 38) 河田恵昭: 台風特性に及ぼす長期的な気温変化の影響, 海岸工学論文集, 第 38 卷, pp.931-935, 1991.
  - 39) 松井貞二郎, 立石英機, 磯部雅彦, 渡辺晃, 三村信男, 柴崎亮介: 海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測, 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.1031-1035, 1992.
  - 40) 佐藤圭輔, 三村信男, 町田聡: アジア・太平洋の海岸・沿岸域に対する気候変動の影響評価, 海岸工学論文集, 第 47 卷, pp.1236-1240, 2000.
  - 41) 安田誠宏, 高田理絵, 金洙列, 間瀬肇: 地球温暖化予測データに基づく台風極端化特性の評価と高潮シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 55 卷, pp.1331-1335, 2008.
  - 42) 安田誠宏, 安藤圭, 森信人, 間瀬肇: 地球温暖化予測に基づく将来台風変化予測とその確率モデリング, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 65 卷, pp.1281-1285, 2009.
  - 43) 安田誠宏, 林祐太, 森信人, 間瀬肇: 地球温暖化による高潮・高波推算に対応可能な確率台風モデル, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 66 卷, pp.1241-1245, 2010.
  - 44) 山下隆男, 土屋義人, 藤井健: 1991 年のサイクロンによるバングラデシュの高潮の数値計算, 海岸工学論文集, 第 39 卷, pp.236-240, 1992.
  - 45) 磯部雅彦, 藤城透: ベンガル湾奥における高潮遡上計算, 海岸工学論文集, 第 44 卷, pp.346-350, 1997.

- 46) 山下隆男, 土屋義人, 吉岡洋, 吉野敏成: 準3次元高潮数値モデルとその適用性, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.211-215, 1993.
- 47) 山口正隆, 畑田佳男, 花山格章: 伊勢湾における高潮の極値の推定, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.321-325, 1995.
- 48) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 林秀樹: 市街地の高潮氾濫解析法の研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.331-335, 1998.
- 49) 井上和也, 川池健司, 山上路生, 戸田圭一: 街路ネットワークモデルに基づく高潮氾濫時の避難行動解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.351-355, 1999.
- 50) 河田恵昭, 石井和: 津波・高潮・洪水氾濫による地下街水害対策の提案, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.356-360, 1999.
- 51) 河合弘泰, 平石哲也, 佐藤孝夫, 大川郁夫: 台風9918号による九州沿岸と瀬戸内海西部の高潮の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.321-325, 2000.
- 52) 平石哲也, 平山克也, 河合弘泰, 上原功: 熊本県竜ヶ岳町における台風9918号高潮災害の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.306-310, 2000.
- 53) 佐藤孝夫, 山本悟, 橋本典明, 平石哲也, 北澤壮介, 松島健滋, 大川郁夫: 周防灘海域における台風9918号による高潮被害および危険度判定手法について, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.316-320, 2000.
- 54) 例えば, 下元幸夫, 山路昭彦, 内田洋平, 大西健二, 上原謙太郎: 瀬戸内海沿岸における波浪と高潮の同時生起特性, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.211-215, 2006
- 55) 加藤史訓, 福濱方哉, 野口賢二: 高潮による浸水被害の実態調査, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.1321-1325, 2005.
- 56) 高橋重雄, 河合弘泰, 平石哲也, 小田勝也, 高山知司: ハリケーン・カトリーナの高潮災害の特徴とワーストケースシナリオ, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.411-415, 2006.
- 57) 柴山知也, 安田孝志, 小島治幸, 田島芳満, 加藤史訓, 信岡尚道, 安田誠宏, 玉川勝巳: Hurricane Katrinaによる高潮被害の調査, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.401-405, 2006.
- 58) 金庚玉, 李漢洙, Mohammed Haggag, 山下隆男: 大気・波浪・海洋結合モデルによるハリケーンカトリーナの高潮場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.416-420, 2006.
- 59) 文屋信太郎, ヨハネスウエストリンク: 非構造格子を用いた高潮・波浪・潮汐結合モデルによるハリケーンカトリーナ高潮場再現計算, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.316-320, 2008.
- 60) 滝川清, 田淵幹修: 高潮・潮汐・波浪の相互作用解析に基づく出現最大を想定した高潮・高波のハザードマップの作成, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.1366-1370, 2001.
- 61) 佐藤孝夫, 末永正次, 橋本典明, 中垣壽, 宇都宮好博: 相互作用を考慮した波浪高潮結合モデルの開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.216-220, 2001.
- 62) 大澤輝夫, 竹山剛生, 安田孝志: メソ気象モデルと台風ボーガスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.281-285, 2001.
- 63) 金庚玉, 山下隆男, 布田昌司, 駒口友章, 高瀬和博: 大気・海洋結合モデルによる山陰地方の高潮・高波の再解析, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.331-335, 2007.
- 64) 山下隆男, 金庚玉, 李漢洙, 駒口友章: 大気・海洋結合モデルによる日本海の高潮・高波の数値解析-2008年2月の爆弾低気圧への適用-, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.166-170, 2008.
- 65) 橋本典明, 佐藤裕司, 松浦邦明, 市川雅史: 確率台風モデルの構築とその統計的特性, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.456-460, 2001.
- 66) 河原能久, 内田龍彦, 木梨行宏: 沿岸都市域における氾濫統合解析手法の開発, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.1331-1335, 2007.
- 67) 愛知県: <https://www.pref.aichi.jp/soshiki/kowan/0000077972.html>.
- 68) 例えば, 野口賢二, 諏訪義雄: 気候予測モデルの結果を用いて算出した三大湾の将来高潮偏差の変化特性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第67巻, pp.1186-1190, 2011.
- 69) 別所康太郎, 中澤哲夫, 川畑拓矢, 釜堀弘隆, 高野洋雄, 新藤永樹, 國井勝, 原昌弘, 高橋清利, 海老田綾貴, 太田行哉, 古林慎哉, 守谷昌己, 本田有機, 澤田謙: 伊勢湾台風再現実験プロジェクト, 天気, 57号, pp.247-254, 2010.
- 70) 森信人, 田中悠祐, 間瀬肇, 鈴木崇之, 木原直人: 沿岸域における強風時の強鉛直混合についての数値実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第67巻, pp.321-325, 2011.
- 71) 鈴木勝之, 柴木秀之, 尾形竹彦: WRFの計算特性に関する幾つかの検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第67巻, pp.426-430, 2011.
- 72) 金洙列, 松見吉晴, 安田誠宏, 間瀬肇, 水沼裕介: 海浜流推算における潮汐・波浪・高潮結合モデルの開境界条件に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第67巻, pp.326-330, 2011.
- 73) 桐博英, 丹治肇, 白谷栄作: 非構造格子に適用するための準Lagrange型氾濫解析モデル, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第67巻, pp.441-445, 2011.
- 74) 例えば, 木梨行宏, 山城賢, 姫野慎太郎, 横田雅紀, 橋本典明: MRI-AGCM3.2Sにより得られた将来気候データに基づく有明海での将来の高潮に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第68巻, pp.201-205, 2012.
- 75) 例えば, 村上智一, 吉野純, 深尾宏矩, 安田孝志: 三河湾に発生する‘想定外高潮とその発生機構’, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第69巻, pp.221-225, 2013.
- 76) 例えば, 森信人, 澁谷容子, 竹見哲也, 金洙列, 安田誠宏, 丹羽竜也, 辻尾大樹, 間瀬肇: 2013年台風30号 Haiyanによる高潮の予測可能性と再解析精度, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第70巻, pp.246-250, 2014.
- 77) 二宮順一, 竹見哲也, 森信人: 伊勢湾台風を対象とした高潮追算のための JRA55 再解析データの力学的ダウンスケール, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第71巻, pp.1699-1704, 2015.

- 78) 豊田将也, 吉野純, 荒川悟, 小林智尚: 高解像度台風-高潮結合モデルによる台風 1330 号とそれに伴う高潮の再現実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 71 巻, pp.463-468, 2015.
- 79) 安田誠宏, 片平成明, 森信人, 間瀬肇, 澁谷容子: 気候モデル台風のバイアス補正手法の開発と高潮の将来変化のアンサンブル予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 71 巻, pp.1507-1512, 2015.
- 80) 川崎浩司, 二村昌樹, 下川信也, 飯塚聡, 栢原孝浩, 佐々木 淳: 海洋流動モデル FVCOM とメソ数値予報モデルを用いた日本周辺海域の高潮推算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 72 巻, pp.199-204, 2016.
- 81) 岩本匠夢, 高川智博: メソ気象モデルを用いた台風 1418・1419 号による高潮および副振動の再現計算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 73 巻, pp.265-270, 2017.
- 82) 北野利一, 喜岡渉: 気候変動による影響の検出に伴う 2 つの過誤のバランス, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 71 巻, pp.97-102, 2015.
- 83) 猿渡由未, 武江寿大, 渡部靖憲: 冬季の温帯低気圧による高潮の統計的リスク評価, 冬季の温帯低気圧による高潮の統計的リスク評価, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 72 巻, pp.247-252, 2016.
- 84) 仲井圭二, 笹昭二, 岩崎正二, 高橋信幸, 佐藤由浩, 村瀬博一, 井上亮一: 北陸沿岸の高潮に対する南西風の重要性, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 73 巻, pp.199-204, 2017.
- 85) 竹下哲也, 加藤史訓, 五十嵐竜行, 小泉知義, 宇多高明: 越波に対して粘り強い海岸堤防の構造に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 73 巻, pp.1093-1098, 2017.
- 86) 喜多司, 鈴木高二朗: 高潮位・高波複合作用時の護岸の背後の安定性に関する検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 73 巻, pp.991-996, 2017.
- 87) 安田誠宏, 平石哲也, 河合弘泰, 永瀬恭一: 韓国南部馬山市における高潮浸水被害現地調査と地下浸水解析, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.1366-1370, 2004.
- 88) 愛知県: 高潮対策検討委員会, 第 2 回委員会資料, 103p., 2017.
- 89) 設省河川局: 伊勢湾台風災害誌, 全国防災協会発行, p.700, 1962.
- 90) 中村亮太, 大山剛弘, 柴山知也, 松丸亮, 高木泰士, Miguel ESTEBAN, 三上貴仁: Typhoon Yolanda によるフィリピンの高潮被災の高潮追算と現地調査の比較, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 70 巻, pp.236-240, 2014.
- 91) 金洙列, 森信人, 澁谷容子, 安田誠宏, 間瀬肇: 高潮・波浪結合モデルを用いた 2013 年台風 30 号 (Haiyan) の高潮・波浪推算, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 70 巻, pp.226-230, 2014.
- 92) Powell, M.D., Vickery, P.J. and Reinhold, T.A. : Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, *Nature*, 279-283, 2003.
- 93) Donelan, M.A., Haus, B.K., Reul, N. Plant, W.J., Stiassnie, M., Graber, H. C., Brown, O.B. and Saltzman, E.S.: On the limiting aerodynamic roughness of the ocean in very strong winds, *Geophys. Res. Lett.*, L18306, 2004.
- 94) Black, P.G., Burpee, R.W., Dorst, N.M., and Adams, W.L. : PHOTO OF QUARTER-Appearance of the sea surface in tropical cyclones, *Weather Forecasting*, 1, 102-107, 1986.
- 95) Kioka, W., Kurono, K. and Tominaga A.: Spray droplet separation from breaking foamed waves in very strong winds, *Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts*, Hanoi, Vietnam, 2019. (in publication)
- 96) 京都大学防災研究所: 2016 年台風 12 号高潮予測実験, [http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web\\_j/saigai/20160905\\_kisyo.pdf](http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/20160905_kisyo.pdf).