

高潮とその対策

堀口孝男*・豊島修**

I. 伊勢湾台風まで

1. まえがき

熱帯性低気圧による高潮災害はわが国のみに限ったこととはなく、北半球の大洋に面して、その西側に位置を占める国では宿命とでもいうべきである。昨年、一昨年とベンガル湾であいついで発生した高潮災害は、人命の損失が何万人、何十万人といういままでに例のない異常な事態であったため、世界中にショックを与えたものであった。ベンガル湾の潮せきは、セイロンとスマトラを結ぶ線を nodal line として重複波を形成しており、湾奥に至るほど潮位が高く、3月から5月、8月から9月には、ガンジス河の支流に段波 (bore) を生ずるほどである。これにサイクロンによる高潮が合致すれば、想像されるように形容を絶する現象が現われてくる。生存者の一人が語っているように、10 m にも達する水の壁が迫ってきたというのは、あながち誇張ではあるまい。

大西洋に面する北アメリカ大陸の東岸も、その命運まぬかれざるところであって、フロリダ半島とその先端につらなる Keys とよぶ島々、メキシコ湾沿岸、大西洋沿岸には、しばしばハリケーンによる大災害が発生している。たとえば 1935 年 9 月の Labour day hurricane は、Long Key と Matecumbe Key を直撃したものであるが、当時は経済恐慌のあとを受けた New Deal 政策が発動しており、フロリダ開発をめざす復員兵の救済キャンプがここにあった。ハリケーン接近の報を受けて本土から汽車が到着し、これに乗って逃げるさなか、列車は機関車と炭水車を残して波間に消えさり、死者、行方不明約 400 名の被害をだしている。また、1938 年 9 月の New England hurricane では、Boston 周辺の New England 地方が大災害を受け、試みにアメリカ合衆国東部で、中年以上のアメリカ人に尋ねれば、いまも昨日のごとく当時の模様を話してくれる。

それならば、台風、ハリケーン、サイクロンという熱

帯性低気圧のうち、強烈なものはどれであろうか。大型と呼ばれるそれぞれの気象擾乱を比較してみると、気圧深度、風速などで最も強烈な値を示しているのはハリケーンである。1934 年の室戸台風は日本に上陸した台風のうちで最も深い気圧深度を示しており、684 mmHg である。これに対して前述の Labour day hurricane は 669 mmHg で、これはいままで記録された最低の気圧である。10 分間の平均で表わした最大風速でも、1947 年 9 月のハリケーンで 68 m/sec という記録がある。さらに 50 m/sec 以上というのが、1900 年から 1950 年までのハリケーンで 10 回生じている。わが国では、50 m/sec 以上の平均風速を陸上で記録したことは、まだないようである。

一方、ベンガル湾、アラビア海に発生するサイクロンは、4月から6月、10月から12月にかけて多発し、このうち4月から6月に発生するサイクロンは、目がないのが普通で通常の低気圧に近く、10~12月のものは目を有する低気圧である。したがって、サイクロンは台風と同程度もしくは、それ以下とみなすことができる。

高潮は原因となる気象擾乱が陸岸に上陸または接近して、異常な潮位上昇と強大な波浪を海岸に作用させる現象であるから、波力に耐える構造物で越波、浸水を極力少なくすることが、対策の原理であることは明らかである。ときとして降雨量が大きい場合、これに対する対策も当然考慮されなければならない。このようにみれば、高潮対策は常識的なように考えられるが、結局のところ 1955 年頃まで、確固とした高潮対策の理論形成とその実施はみられなかったといえる。これはなぜであろうか。

高潮の外力の一つである波について考えてみても、なるほど regular で permanent type の線形波、非線形波などの現象は、流体力学の面から研究されてきているが、irregular で統計的処理が必要であり、しかも実際に海で発生する波の研究は 1940 年代から始まったものである。さらに、どの程度まで波が発達してくるか、いわゆる波の予測を可能としたものは、1947 年の Sverdrup-Munk の “Wind sea and Swell” からである。また、災害を防ぐ構造物についても、波の打ち上げ、波圧の変動、堤脚の洗掘、砕波現象、越波量と堤防の天端高などの問題は、数理的な追跡ではいかんともなしがたく、模

* 正会員 運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所長

** 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長

型実験によって、ようやく現象が明らかにされるものである。したがって、戦後の1950年頃から実験施設が各地でつくられ、その実験技術が十分に開花するまで待たなければならなかったわけである。

以上述べたところからみて、高潮災害とその対策の歴史的な過程を問うならば、1953年の13号台風に対する災害復旧をメルクマールとする、1955年頃までの時期が一つの区切りであり、1959年の伊勢湾台風による災害とその復旧対策は、高潮対策の計画・実施に基本的な原則を確立した時期に相当する。そして、伊勢湾台風以後の時期というものがその後続く。

以下に述べるのは、それぞれの時期についてどのようにして対策事業が形成されたかをたどったものである。

2. 1955年頃までの高潮対策

和達、広野両博士の調査によれば、わが国では明治39年(1906)から昭和28年(1953)の間に60回の高潮が発生している。主要な湾での高潮は、大阪湾9回、鹿児島湾8回、有明海8回、東京湾5回、伊勢湾3回である。しかしながら高潮の偏差量が2mを越えるものは少なく、このうち6回だけである。すなわち、有明海では大正3年8月、昭和2年9月、大阪湾では昭和9年9月の室戸台風、昭和25年9月のジェーン台風、東京湾では有名な大正6年10月の台風がこれに含まれ、昭和24年のキティ台風は偏差量1.6mで、2mには及ばない。鹿児島湾では昭和20年9月の枕崎台風がある。

高潮の水理現象、いいかえれば、気象擾乱の進行に伴う沿岸の水理現象のうち、その水位変動については、気象あるいは海洋に關係する理学系の人々によって研究されてきている。現今、高潮の水位変動は、fore-runner, storm surge, resurgenceとして検討されているが、これらはわが国では1935~1940年頃に論じられており、とくに大阪湾、東京湾では、地形と湾振動、振動形式など詳細に研究されている。ところが、波浪を対象とする研究はほとんどなく、戦後の1949年、スクリップス海洋研究所でFolsomの水圧形波高計が口火をきいてから、猛然と研究されだしたものである。しかもわが国では、土木工学の關係者がきわめて熱心であったことがおもしろい。従来、土木工学の關係者は被災状況の調査、被災原因、対策工法の検討という分野で、高潮災害に取り組んできたのであるが、これらの成果は必ずしも有効に生かされたとはいえない状況にあった。というのも、海岸事業に多少なりとも国の事業費が投入されだしたのは昭和25年(1950)からで、それまでは考え方がばらばらであり、被災経験を通じて、技術的な見解が総合的に共通な思想として現われるところまで達していなかった。

このような外力とその反応という両面からの追跡過程を経て、高潮対策の考え方が固まりだしたのは、昭和28年9月(1953)の13号台風からである。ときあたかも、アメリカ合衆国のCouncil on wave researchが主催するCoastal Engineeringの会議が1950年から開かれ、またわが国でも第1回海岸工学講演会が1954年に行なわれたときにあたる。機は熟しつつあったわけである。この13号台風がもたらした成果は、まず海岸堤防の天端高をどのように決定するかということであった。この疑問が堤防に対する波の打ち上げ高という高潮対策の基本事項につながってゆくのである。すなわち、沖波波高、沖波波長、堤脚水深などを基本量にとり、それらを無次元化したパラメーターに変換して汎用性のあるものとなし、海底勾配、堤防のり面勾配の変化に対応した波の打ち上げ高を明らかにしていった。そうして、計画潮位、計画波、背後地の経済活動、事業効果などの考え方を採用し、所要の天端高をそれらとの関連のうえで定める方策がとられたのである。そのほかに、海岸堤防が崩壊するパターンを明らかにしている。石積の堤防では裏込め土砂が前面から吸い出されて壊れ、越波された堤防は、被覆のない場合には天端または裏のり面の土砂がもぎとられて崩壊する過程がわかってきたのである。これらは伊勢湾台風で關係者から嚴重に警告されたものであるがすでにこのときに明らかにされていた。惜しむらくは一般には浸透しなかったのである。

このようにみれば、おかしないい方ではあるが、伊勢湾台風を迎える素地ができていたということになる。

3. 伊勢湾台風と高潮対策

伊勢湾台風は昭和34年9月26日(1959)、東海地方を襲った台風で、正式な名称は台風15号である。この台風は影響域が広く、半径450km以内が20m/secの風速、30m/secの風域は右半円で280km、左半円で130kmあり、最大風速45m/secを伊良湖の付近で記録している。進行速度は70km/hで、上陸しても変わらず、前線を刺激して雨量が大きく、1時間雨量で50~100mm、1日雨量で500mmを越えるところが多かった。この擾乱によって発生した高潮は、名古屋港において偏差量が3.5mとなり、それまで最大であった大阪港の室戸台風による偏差量3.1mを更新している。この台風による災害は、わが国有史以来の被害というべきもので、参考のため、室戸台風、枕崎台風との比較を表一1に示しておく。ただし、この表のエネルギーの項については多少の異論がある。

災害復旧は特別に法律をつくって行なったもので、伊勢湾高潮等対策事業と呼ばれる。このため、政府は経済

表-1 台風 の 比較

台 風 名	室 戸	枕 崎	伊 勢 湾
上陸年月日	1934年 9月21日	1945年 9月17日	1959年 9月26日
陸上で測定した最低気圧 (mb)	911.9 (室戸岬)	916.6 (枕崎)	929.5 (潮岬)
上陸直前の半径 (km)	1100	800	900
エネルギー (風) × 10 ²³ erg	3.5	2.0	1.8
工 率 × 10 ²⁰ erg/sec	3.5	2.0	1.8
死者・行方不明	3036	4229	5101
全壊家屋数	38771	55934	36138
半壊家屋数	49275	51385	113052
流失家屋数	4277	2394	4703
わが国通過時の速度 (km/h)	70	70	70
潮 (m)	大阪湾 3.1	鹿児島湾 2	伊勢湾 3.5
わが国で観測した } 平均	S 48 大阪	ESE 40 枕崎	S 45 伊良湖
最大風速 (m/sec) } 瞬間	S 65 大阪	ESE 63 枕崎	S 60以上小牧

企画庁が中心となり、関係各省が参加して対策協議会をつくり、対策の基本方針と計画の調整をはかったのである。この協議会の白熱した議論から、わが国における高潮対策の基本的な考え方が生みだされてきたもので、その概略を記すと次のようである。

① 高潮対策計画と、他の道路、港湾、干拓地などの諸計画とは、有機的に一体となって効果があるように、整合を良くし、二重投資は避けるように努力すること。

② 水理諸元は各省ばらばらでなく、海岸工学上からの検討を加えて、整合した値にすることが必要である。

③ 防災計画の多様性が相当に議論された。大規模防波堤による潮位上昇の緩和、波浪エネルギーの減殺をはかる案；これは港湾、漁港、臨海工業地帯では機能維持のために望ましい計画である。あるいは、外郭堤防を大きくまわし、水門と排水機場を設ける案；これは低地帯で人家、工場の密集している運河地帯に有利である。このような案が電子計算機を活用して水理学上から検討され、実施に移すという道筋が確立された。

④ たとえば、木曾川は明治 29 年以来初めて破堤したように、海岸堤防の崩壊もさることながら、河川堤防の崩壊が重大な浸水被害を起こしている。洪水の流下に強くても、高潮と波による海からの強襲には弱かったのである。これを契機に河川高潮対策の必要性が認識され、東京湾、大阪湾にこれが波及することになった。

⑤ 地盤沈下地帯の堤防の高さを維持する方策が検討されている。すなわち、建設当初に5~10年の沈下量に相当する余裕高をもたせ、その後、高さを復旧する必要が生じたときに、復旧しやすい構造を考えるようになった。

⑥ 堤防の構造はできるだけ統一を保ち、法線をなめらかにすること、また、他の構造物との接続部が弱点となるため、強固につくこととしている。

⑦ すでに 1953 年 13 号台風で明らかにされたように、堤防は鉄筋コンクリート構造を用い、天端、裏のり面の被覆は必ず行なうこと。いわゆる三面巻きの思想は

ここに定着した。

⑧ 堤防の高さは背後地の状況に応じて、弾力的に処理する考え方が示されている。すなわち、低地帯、人口稠密な地帯では越波量を極力小さくする。港湾、漁港、臨海工業地帯では、平常時の機能維持を考慮して波のエネルギーは減殺させても多少の冠水は許容する。また、人家が少なく地盤の高いところでは、少量の越波はかまわないとの見方ができている。

以上のようなことが、高潮対策の基本的な考え方として関係者に認識され、その後の対策事業に定着化してゆくのである。 (堀口)

II. 伊勢湾台風以後

4. 伊勢湾台風後の海岸災害

伊勢湾台風はわが国の海岸防災対策に一大変革をもたらすことになったが、その後も、その被害規模は伊勢湾台風に比べて小さいとはいえ、例年のように海岸災害が発生している。

いま、これらのうち比較的規模の大きいものを列挙すると次のとおりである。

- ① チリ地震津波 (昭和 35 年 5 月 24 日)
- ② 第二室戸台風 (昭和 36 年 9 月 16 日)
- ③ 台風 6420 号 (昭和 39 年 9 月 25 日)
- ④ 台風 6523 号 (昭和 40 年 9 月 10 日)
- ⑤ 台風 6626 号 (昭和 41 年 9 月 25 日)
- ⑥ 昭和 45 年 1 月低気圧 (昭和 45 年 1 月 31 日)
- ⑦ 台風 7010 号 (昭和 45 年 8 月 21 日)

これらの海岸災害はいずれも高潮あるいは高波災害というべきものであるが、一方では、昭和 30 年代前後から、しだいに海岸侵食による被害が年を追って増大する傾向をみせており、最近の河川流送土砂の減少とあいまって、海岸侵食は、いまやわが国の国土保全の中でも大きな問題となりつつある。

ここでは、伊勢湾台風後において高潮対策上とくに話題となった異常海象について、その特色と問題点、ならびにこれらの災害を契機として講ぜられるようになった諸対策の概要について述べる。

5. 遠地津波対策

1960 年 5 月 23 日 04 時 20 分、南米チリ沿岸に発生し

たチリ地震津波は、翌 24 日早朝 (02 時 40 分~04 時頃) わが国太平洋沿岸の北は北海道から南は九州に至るほぼ全域にわたって来襲、1 万 8 000 km に及ぶ太平洋をわずか 23 時間余、時速にして 800 km/h というジェット機なみのスピードで伝播・到達した。このチリ地震津波は、従来の日本海溝付近の地震により発生する、いわゆる近海津波とはかなり異なった特性を有しており、津波後実施された「チリ地震津波対策事業」およびその後の津波対策施設の築造にあたり、次のような点についてとくに考慮が払われることとなった。

① わが国の代表的な津波といわれている明治 29 年 6 月 15 日および昭和 8 年 3 月 3 日の三陸大津波は、いずれも震源地が三陸沖のいわゆる近海津波であって、周期は 10~20 分程度と短かったため、湾の固有振動周期の比較的小さい吉浜、綾里、田老などの小湾に大きな被害が生じたが、チリ地震津波の場合は周期が 40~70 分と大きかったため、湾の固有振動の周期の比較的大きい志津川、女川、大船渡湾などに被害が集中した。

また、昭和 8 年の津波では、吉浜湾や越喜来湾のような小さい湾では奥のほうに進むにつれて波高は急速に高くなっているが、宮古湾、広田湾では逆に入口において高く奥が低いという反対の現象を呈していた。

これに対し、チリ地震津波の場合には、いずれの湾においても湾奥部に向って直線的に増大している (図-1 および図-2)。したがって、津波対策の計画にあたっては、従来の近海津波における湾内の津波波高分布だけではなく、遠地津波に対しても十分考慮する必要があるこ

とがあらためて確認された。

② 「地震があったら津波の用心」と日頃から心がけていた三陸沿岸の人々にとって、有感地震のないまま突如として夜明前に来襲したチリ地震津波は、その後の避難および防災対策に、大きな変革をもたらすこととなった。

すなわち、防潮水門の門扉構造については遠地津波の襲来にそなえて海面が一定水位以上になった場合は自動的に重力により閉そくするよう自動装置を設けるとともに津波は地震後襲来するのが普通であるので、停電を考慮して手動式または可搬発動機、あるいは自家発電装置併用という形式が選択された。

③ ① および ② の理由から、中小河川の河口部はなるべく水門で締切ることになり、大船渡湾などでは津波防波堤が設置された。

6. 消波護岸構造

伊勢湾台風までの高潮は、南面する遠浅の湾の西側を台風の中心が北上し、気圧低下と風の吹き寄せにより、2~3m の偏差すなわち気象潮が発生し、比較的高さが低く、かつ天端および裏のりが素土羽であった海岸堤防が高潮による海水の越流あるいは越波によって決壊・破堤するという被害が大部分であった。

伊勢湾台風後、高潮常襲地帯といわれる地域の海岸堤防は全面的に堤防高が高くなり、かつ堤防の天端、裏のりともコンクリートで被覆されていわゆる「三面張り」

堤防となり、多少の越波はあっても決壊・破堤という被害は非常に少なくなった。

このような時機に、2 年連続して西神戸地区に大きな被害を与えた台風 6420 号および 6523 号は、その後の海岸工法に大きな影響を与えるものであった。

西神戸地区は大阪湾の北西部に位置する埋立地で、その前面海域は -9m と深く、高潮時には 12m 程度の水深となるため、大阪湾内の対岸距離から考えられた従来の設計波高 2~3m では重複波となり、既設護岸高 +6.5m で十分と考えられていたが、上記の二台風では大きく越波し、床上 4 000 戸、床下 3 000 戸に及ぶ被害が生じた。ちなみに、ジェーン台風 (昭和 25 年) での波高は 3.2

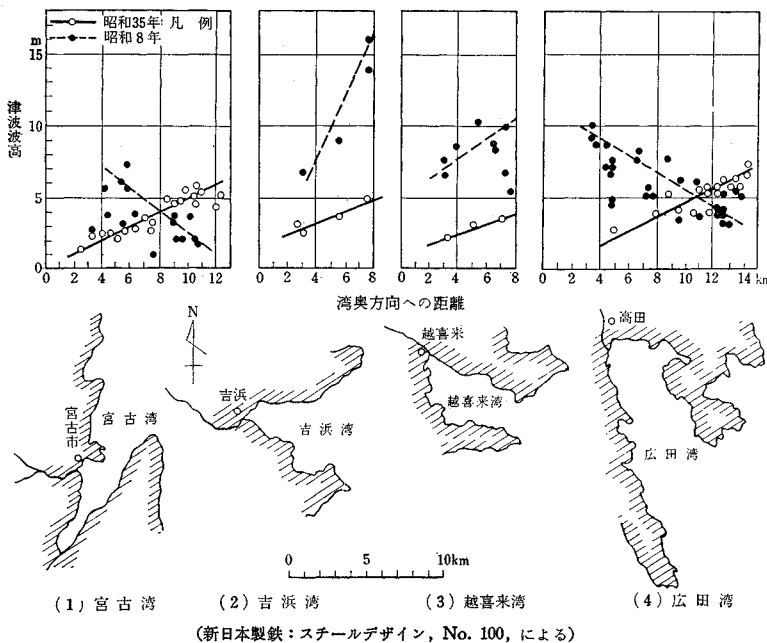
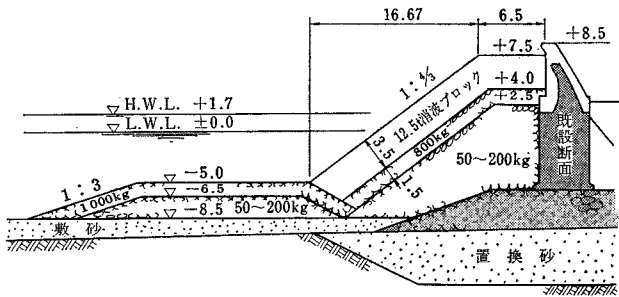


図-1 湾の大きさと津波波高 (上)、向き (下) の関係



(鳥居・山崎：異型消波ブロックの設計と施工，海文堂，による)

図-2 神戸市和田岬地区護岸標準断面図

m, 伊勢湾台風モデルの室戸台風コースによる試算では、最大波高 2.4 m, 周期 5.8 secであった。

これに対し、6420 台風では最大波高 3.8 m, 周期 7.2 sec, 6523 台風では 4.6 m, 7.7 sec を記録した。しかも、その後の調査により、これらの波浪は太平洋から紀淡海峡を経て周期 10 sec を越える外洋のうねり性の高波が大阪湾内に侵入し、これに大阪湾内で発生発達した波が加わり両者が合成されて上記のような波浪となったこと、また、このような長周期性の要素が、従来の大潮に比べて異常な越波を生ずる原因の一つとなったこと等の事実が判明した。

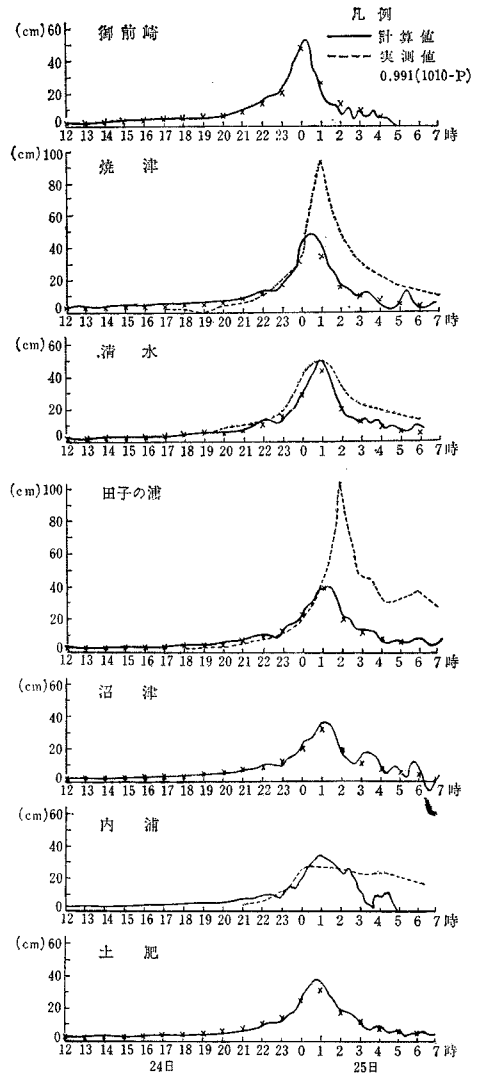
このため、神戸市では運輸省港湾技術研究所に委託して模型実験を行ない、防波護岸構造およびその前面に設置する消波工の規模について検討をすすめた。模型実験の結果、高さ +10.0 m の直立壁護岸形式（消波工なし）と、高さ +8.5 m の直立防波護岸の前面に（捨石マウンド+消波工）を設けた消波護岸形式の 2 つについて検討されたが、前者は基礎が小さく不安定であり、また台風時には強風によって跳波が大きく、堤内側に入ることが予想されるのに対し、後者は跳波が比較的少なく、建設地点が軟弱地盤であるためマウンド形式は円弧すべり対策上も好都合であることから後者の消波護岸構造形式が採用された（図-2）。

このような深い前面水深をもつ埋立地にも、来襲波の特性によっては十分な消波対策が必要であることが判明したため、その後における埋立護岸の計画に大きな指標を与える結果となった。

7. 奇妙な大潮

昭和 41 年 9 月、駿河湾奥部を襲った 6626 台風および昭和 45 年 8 月土佐湾奥部を襲った 7010 号台風は、ともに異様な大潮を発生させた点で注目されている。

いままで台風による大潮といえば、南面する遠浅の湾に風の吹き寄せ効果が大きく作用して発生するものであり、事実いままでの 2 m を越える気象潮（大潮偏差）は



(運輸省港湾技研：港湾技研研究所報告，Vol. 6, No. 7, による)

図-3 6626 号台風（駿河湾）による気象潮の時間的変化

すべて東京湾、伊勢湾、大阪湾、および有明海に限って発生していた。ところが、比較的深い、決して遠浅ではない土佐湾の湾奥部で 2.4 m に及ぶ気象潮が発生したのである。土佐湾の高知市桂浜では、過去の大潮資料を用いて作られた実験式によって計算すると、7010 号台風の場合でも最大気象潮は 85 cm 程度であり、とても 2 m 以上という偏差には及ばない。また、高知の桂浜のように外洋に面した地点の最大偏差は気圧低下による偏差の 2~3 倍程度といわれており、これから計算しても、たかだか 56~84 cm 程度の値となって実測値を大幅に下回るのである。

一方、これより先、わが国でも他に比類をみないほど深い駿河湾で、6626 号台風の際やはり似たような、説明のつかない大潮が発生していた。

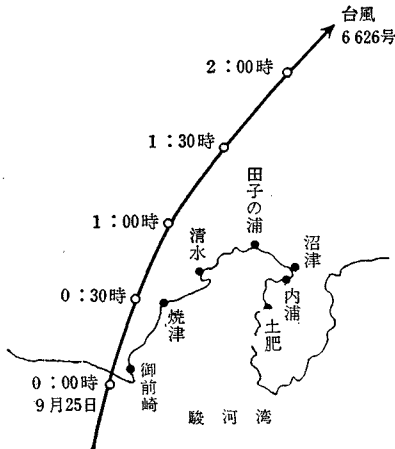


図-4 駿河湾検潮所と6626号台風のコース

運輸省港湾技術研究所において行なわれた6626号台風による気象潮の計算によれば、図-3に示すように、駿河湾内の各地における気象潮の値は、計算値と気圧低下効果による偏差(×印)とが非常によく合っており、風の吹き寄せによる効果は非常に小さい。これは、急深な駿河湾においては当然予想されるところである。

一方、これらの計算値と実測値(点線)を比較してみると、清水と内浦ではほぼ計算値と等しい値を示しているのに対し、焼津と田子の浦では著しく大きな値を示しており、とくに田子の浦では計算値はわずか42cmであるのに対し、実測値は106cmと2倍以上の値を示している。

図-4でもわかるように、清水は焼津と田子の浦の中間にある。通常の高潮であれば清水の気象潮が焼津と田子の浦の平均値程度はあってもおかしくはないが、実測値は著しく小さく計算値と一致している。このことは、焼津や田子の浦では南方向からの高波が海岸近くで堆積して水面が上昇するという現象があったのに対し、北側に開口部をもつ清水港では、これがなかったのではないかと考えると、ある程度説明ができるように思われる。このことは、焼津、田子の浦のピークが計算値のピークよりかなり遅くなっており、台風の中心が清水市の西側をとおりすぎて駿河湾内の風がNEからSに変わるようになった頃から焼津のピークが現われているのに対し、清水では台風中心が最も接近した1時頃にピークを生じていることから判断される。

なお、この田子の浦の異常高潮は今回が初めてではなく、「田子の浦海嘯」とよばれ、藩政時代から何回か記録に残されている。

これに対し、土佐湾の高知・浦戸湾における7010号台風による異常高潮は、いままでほとんど前例のないも

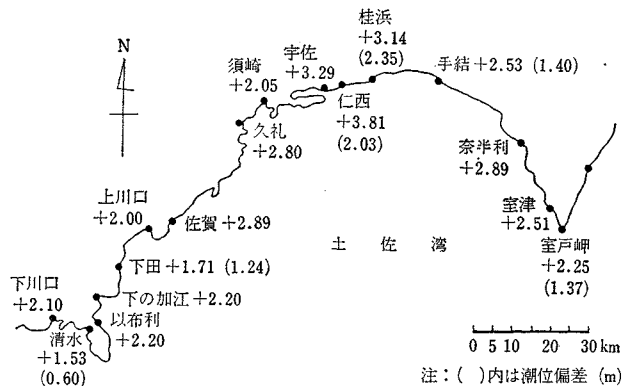


図-5 土佐湾沿岸における7010号台風による最高潮位(TP)と潮位偏差

のであり、7010号による値を加えない場合の最高潮位の再現期間は数万年~数十万年にも及ぶものであるといわれている。

土佐湾の場合も沿岸各地での最高潮位を調べてみると(図-5)、湾奥部の高知(桂浜)や宇佐など、局地的にせよ東面している海岸では+3m以上の潮位を示し、次いで西側の南面している須崎では+2.05mと低く、その南側の久礼では再び+2.80mと高くなっており、東からの風または波の影響がかなり大きかったのではないかと考えられる。ちなみに従来、高知県に上陸した台風はいずれも南西から北東へ向って上陸したが、偏差の最大は第二室戸台風の際の91cmであった。今回の7010号台風は佐賀付近を北西に向って上陸している。過去にもこれに似たコースをとおり北に向って上陸した6016号台風は123cmと台風による偏差では7010号台風に次ぐ史上第2位、既往第1位の偏差を生じている。このことは、土佐湾の西側をまっすぐ北へあるいはやや北西の方向へ抜けるような台風のコースの場合は、風や波の影響が重なって湾奥部あるいは湾の西側の沿岸に大きな気象潮を発生させる可能性があると考えが必要がありそうである。

以上、最近の2つの台風において、従来とは異なった形の高潮が発生していることを紹介した。駿河湾、土佐湾においては、それぞれの被災条件に対し再度災害を防止すべく対策事業が進行中である。

しかし、このような形の高潮は田子の浦周辺ではすでに過去何回となく生じていることに注目すべきである。高知では今回はじめてこの異常高潮に襲われたという。これらに似た海岸地形をもつ相模湾などには、このような事例はないのであろうか。検討してみる必要がありそうである。

(豊島)