

# 高潮災害の変遷と将来予測

京都大学防災研究所 助教授 河 田 恵 昭

*Kawata Yoshiaki*

## V 高潮災害の変遷と将来予測

京都大学防災研究所 助教授 河 田 恵 昭  
Kawata Yoshiaki

### 目 次

1. 結 言 .....	85
2. 風水害・高潮災害の変遷 .....	86
2.1. 死亡リスクの定義とその特徴 .....	86
2.2. 風水害の死亡リスクの変遷 .....	87
2.3. 高潮災害の死亡リスクの変遷 .....	88
3. 大阪湾沿岸の高潮災害の変遷 .....	89
3.1. 高潮の来襲頻度 .....	89
3.2. 高潮災害の実態 .....	91
3.3. 高潮による死亡リスクの変遷 .....	94
4. 統計解析による高潮の将来予測上の問題点 .....	98
4.1. 従来の高潮統計 .....	99
4.2. 高潮の統計解析上の問題点 .....	100
5. 結 語 .....	103

### 1. 結 言

1959年9月26日の伊勢湾台風に伴う高潮によって、未曾有の人的・物的被害を受けて以後、大台風の直撃が少くなり、かつ高潮防御施設の充実が図られてきたために、現在に至るまで高潮災害の規模の縮小と発生数の減少が認められる。これには過去20年間の災害情報の質的变化と伝達手段の発達・多様化が大きく寄与していることはいうまでもない。高潮災害の近年におけるこの傾向は喜ばしいことであるが、その反面、歴史上記録のあるものだけでも701年から1865年までに大阪湾、伊勢湾および有明海などの特定の地域で188回も頻発しており、その後のものを入れると合計約300回発生していることから、むしろ統計的な観点からはいつ高潮災害が起っても不思議ではない状況下におかれているといえよう。しかも、過去20年間の自然環境と社会環境の急激な変化は歴史上記録されなかったものであり、臨海部への社会資本の高度の集積とその後背地を中心とした爆発的な都市化現象を背景として、一度高潮災害が発生すると想像を絶する被害に拡大する恐れが十分あると考えられる。

今日、防潮堤、防潮水門、防潮扉、防潮壁および内水排除施設などのハードウェアによって構成される高潮防御システムが多かれ少なかれ高潮常襲地帯で採用されている。これらのライン系の施設のどこかでトラブルが起これば、その拡大を防ぐ手だてがまったくないことなどの問題点が指摘されてきており、航空機の設計で採用されている fail safe の考えを導入することも1つの案としては有望であろう。

このほかに、過去の高潮災害時の貴重な経験や教訓が時の経過とともに、ともすれば忘れ去られやすい社会の風潮も、間接的に被害規模を拡大するものとして見のがすことはできないので、日頃の防災教育も必須と思われる。

そこで、ここではまず、原子炉の確率論的安全評価を行う際に用いられてきた死亡リスクを使用して、わが国における高潮災害の変遷を概述する。つぎに、昭和年代に入って幾度となく高潮災害を受けた所で、かつ比較的災害資料が整っている大阪湾沿岸、とくに大阪を対象として、高潮災害の実態と変遷を詳述するとともに、最近著者らがすすめてきた高潮の統計的な特性に基づく将来予測上の2, 3の問題点を指摘することにした。

## 2. 風水害・高潮災害の変遷

### 2.1. 死亡リスクの定義とその特徴

高潮災害がほかの自然災害などと比較してどの程度危険であるかは、たとえば死亡リスクを用いて表わすことが可能であろう。これは、(死者数)／年／対象人口によって定義され、原子炉事故解析における安全評価法の基礎となる指標として、ラスムッセン報告<sup>1)</sup>ではじめてとりあげられた。この報告<sup>1)</sup>の中で、アメリカ合衆国の1960年代の事故の種類別あるいは災害別の死亡リスクを表-2.1のように示している。また、わが国においても原子力安全協会が、1962～1966年の5年間平均した死亡リスクを表-2.2<sup>2)</sup>のように求めている。それらによれば、アメリカ合衆国のトルネードやハリケーンによる死亡リスクが $10^{-7}$ のオーダーであるのに対し、わが国の風水害は $10^{-6}$ のオーダー

表-2.1 アメリカ合衆国の死亡リスク<sup>1)</sup>

小 故 の 種 類	死 者 数	死亡リスク
自 動 車	55,791	$3 \times 10^{-4}$
転 落	17,827	$9 \times 10^{-5}$
火 災	7,451	$4 \times 10^{-5}$
溺 死	6,181	$3 \times 10^{-5}$
毒 物	4,516	$2 \times 10^{-5}$
銃 火 器	2,309	$1 \times 10^{-5}$
機 械 (1968)	2,054	$1 \times 10^{-5}$
水 上 輸 送	1,743	$9 \times 10^{-6}$
飛行機旅行	1,778	$9 \times 10^{-5}$
落 下 物	1,271	$6 \times 10^{-6}$
感 電	1,148	$6 \times 10^{-6}$
鉄 道	884	$4 \times 10^{-6}$
雷	160	$5 \times 10^{-7}$
ト ー ネ ード	91	$4 \times 10^{-7}$
ハ リ ケ ーン	93	$4 \times 10^{-7}$
そ の 他	8,695	$4 \times 10^{-5}$
全 事 故 合 計	-	$6 \times 10^{-4}$

表-2.2 わが国の死亡リスク<sup>2)</sup>

原 因	死亡リスク
病 気	$6.63 \times 10^{-3}$
自動車事故	$1.64 \times 10^{-4}$
その他事故	$2.50 \times 10^{-4}$
風 水 害	$6 \times 10^{-6}$
地 震	$< 1 \times 10^{-6}$
火 災	$1 \times 10^{-5}$
産 業 災 害	$6.4 \times 10^{-5}$

であって、平均的にはわが国の方が10倍程度危険であることがわかる。

表-2.1および表-2.2に示したように、事故や災害の種類によって種々のオーダーのリスクが存在するが、許容リスクレベルとして、How safe is safe enough?

という質問に対する社会的コンセンサスは、つぎのように要約されている。すなわち、 $10^{-8}$ のリスクレベルに対しては、人々はこの値を小さくするようあらゆる努力を惜しまず、 $10^{-4}$ では一致した行動はや

らないがリスクの減少のためには投資するといわれる。また、 $10^{-5}$  のリスクレベルに対してはまだ気にとめており、このリスクの発生原因をなくすためには、ある程度の不便を容認し、さらに $10^{-8}$  またはそれ以下のリスクレベルになると、普通の人はほとんど関心を払わなくなり、俗にいう“天災”という感じになるといわれている。他方、

社会に容認されるリスクの限度を定めるには、それに伴う利益の面を考えないといけない。たとえば、自動車事故をなくすには自動車を追放すればよいのであるが、それでは社会的に大きな損失をもたらすことになる。このことから、一般的に利益の大きいものほど大きなリスクが容認される傾向にあると考えられる。社会が容認できるリスクレベルの概念を表わしたものが図-2.1<sup>1)</sup>である。

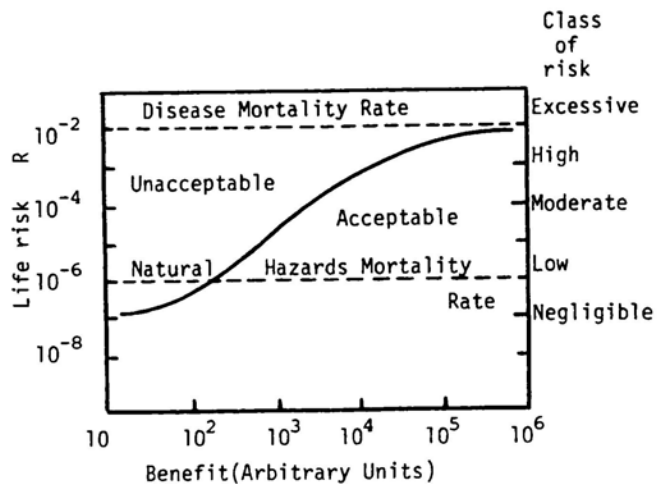


図-2.1 リスクレベルの概念図

## 2.2. 風水害の死亡リスクの変遷

わが国は毎年のように台風に襲われ、多くの被害を受けている。台風と梅雨前線などによる集中豪

雨に起因する風水害によって失われる人命は、行方不明者を加えると、1915年から1978年の64年間に、平均して毎年850名にも及ぶ。図-2.2は死亡リスクと台風の工率などとの関係の経年変化を示す。ここに、台風の上陸数および発生数以外はすべて3年間の移動平均値である。なお、図中には比較のためにアメリカ合衆国におけるハリケーンによる死亡リスクも図示した。高橋<sup>8)</sup>によれば、台風の工率 $E$ とは、台風が単位時間に地面との摩擦で失う運動エネルギー $W_s$ と空気の粘性によって失われる運動エネルギー $W_a$ の和として定義されている。なお、台風の強さと死亡リスクとの関係を検討する場合、災害に結びつく家屋の倒壊や高潮の発生などは地表や海面における風の特性に関係すると考えられるので、 $E$ よりもむしろ $W_s$ のみを考えた方が理解しやすい。しかし、昭和年代に入ってからわが国に上陸した約200の台風については、そのほとんどの場合、 $W_s$ と $W_a$ がほぼ等しいことがわかっており、いずれにしても経年的な変化の特性が変わらないので、一応工率を用いることにした。

図-2.2から、年間の台風の工率はかなりの変動は認められるものの、1965年以前では平均的に $10^{81}$  erg/s 程度であるのに対し、それ以降は台風の上陸数の減少に従って減少傾向を示していることがわかる。また、台風による死亡リスクは風水害のその過半数を占め、1960年以前では4年あるいは8年程度の周期性を示し、同時期のアメリカ合衆国のハリケーンの場合に比べて10倍以上に及んでいる。1960年以降、台風による死亡リスクは急激に小さくなっているが、これはやはり柳田<sup>4)</sup>が指摘したように、大災害が続出した戦後の混乱期からまがりなりにも情報のネットワークの臨戦体制が編成され、情報伝達が守勢から攻勢へ、被害報道から防災報道へと転換した時期と一致している。つぎに、台風による死

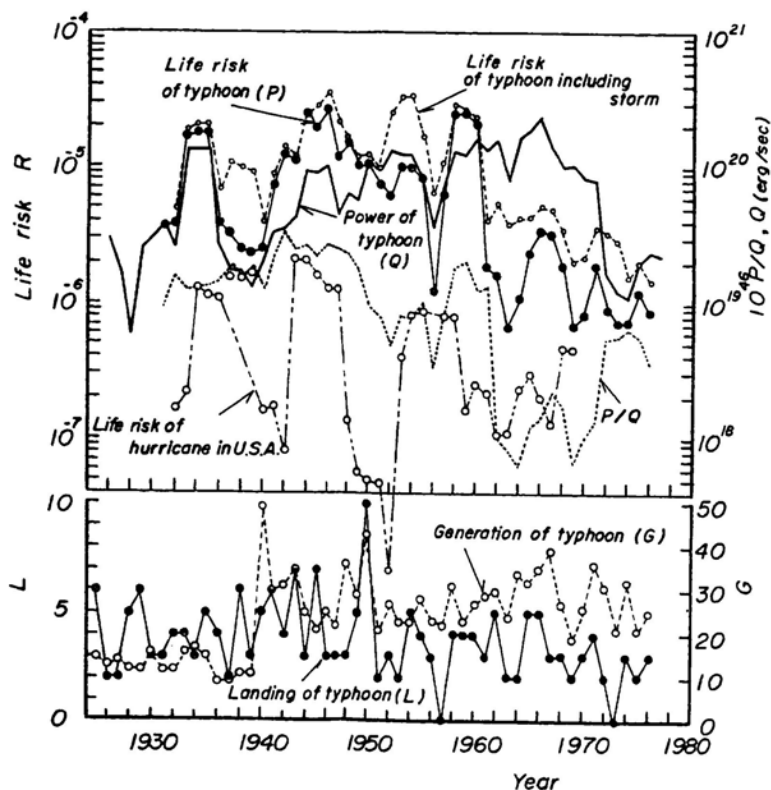


図- 2.2 台風の工率と死亡リスクとの関係

亡リスクと台風の工率の比の経年変化から、前述した結果がより明らかになるとともに、1970年代以降、この比が再び大きくなることに気がつく。これは台風の工率が減少する割合に比例して死亡リスクが小さくならないことに起因しており、最近の台風災害の特徴ともいえる。この原因としては、倉嶋らも指摘したように、都市化現象が広範囲に進んでいく中での台風災害の突発性、意外性、局地・小規模・激じん性および群発性によるものであろう。したがって、現状ではわが国の至るところで台風災害が発生する危険性が再び高まりつつあるといってよく、自然環境と社会環境の変化に応じた有効な防災情報システムの開発などが課題となっている。

### 2.3. 高潮災害の死亡リスクの変遷

台風による死亡リスクの中で、とくに高潮災害による死者・行方不明者数を取り出し、3年間の移動平均値で死亡リスクを示したものが図- 2.3である。このうち、死亡リスクが $10^{-8}$ 以下の値は $10^{-8}$ としてある。なお、計算に際して、対象人口数をどのようにとるかは大いに問題となるところであるが、ここでは「日本高潮資料<sup>6)</sup>」を参考にして、過去に5回以上高潮が来襲した16都府県の当該年の合計人口を用いた。これから、高潮による死亡者数が判明している1948年以降、1950年のジェーン台風、1951年のルース台風および1959年の伊勢湾台風による高潮災害が大きく、台風による死亡リスクを上まわっている。もちろん、高潮災害の発生は沿岸部付近に限られるので、その死亡リスクは図中の値より数倍以上大きくなることは必定であり、上記の台風以外の年に台風の死亡リスクに匹敵するかそれ以上になる場

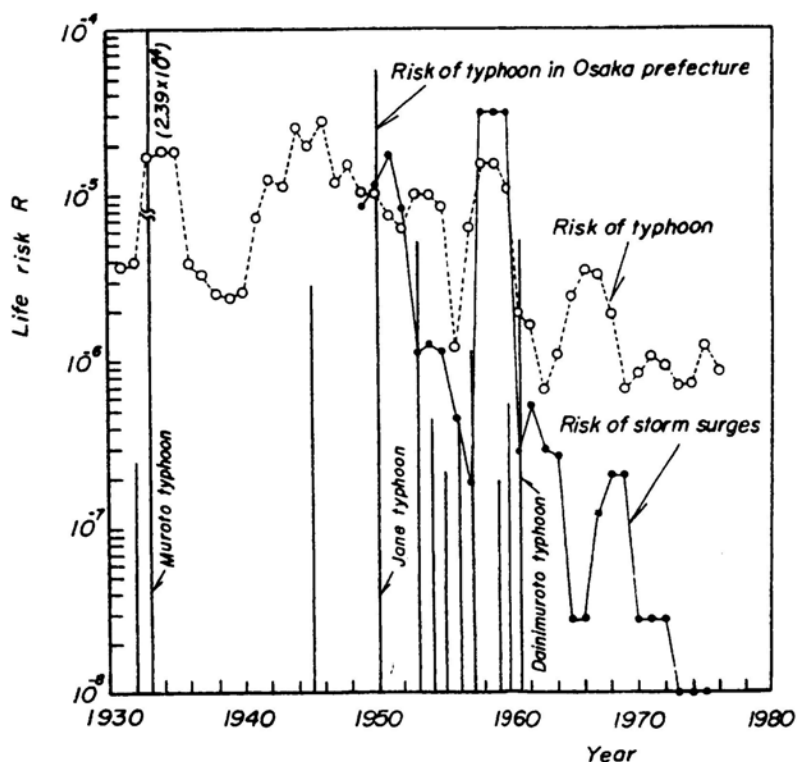


図- 2.3 高潮による死亡リスクの経年変化

合もあることが十分考えられる。また、1961年の第2室戸台風以降、高潮を伴う大台風が直撃していないので、必然的に高潮による死亡リスクの減少がみられる。図中には参考のために大阪を対象とした台風の死亡リスクと高潮災害の死亡リスクを示したが、全国平均に比べて台風の死亡リスクは小さくなっているが、室戸、ジェーンおよび第2室戸台風による高潮災害の死亡リスクは逆に大きく出ていることから、大阪では高潮による人的被害が極めて甚大であることが特徴として見出される。

### 3. 大阪湾沿岸の高潮災害の変遷

前章では1年間を対象として風水害・高潮災害の死亡リスクの変遷について述べたが、ここでは大阪湾沿岸とくに大阪における個々の台風に伴う死亡リスクと高潮防御のための防潮堤などのハードウェアの整備、あるいは避難情報などのソフトウェアの充実との関係について、少し詳しく検討することにした。

#### 3.1. 高潮の来襲頻度

大阪は大阪湾の最奥部に位置し、古来より幾度となく高潮災害を蒙ってきた。とくに、昭和年代に入ってから、室戸、ジェーンおよび第2室戸のいわゆる3大台風によって高潮が発生し、その都度甚

大な被害を受けてきた。この原因としては、もちろん強い台風が高潮の発生にとって最悪に近い進路をとったことや、第2室戸台風以前の予報技術や災害情報の伝達方法などに問題があったことは周知の通りである。その後、数次にわたる高潮対策事業が施工され、現在では当初の目標をほぼ達成し、所定の成果を収めてきた。

さて、近畿地方とくに大阪付近に來襲した高潮の記録は、過去約1,300年にわたって残っているが、記録の精粗や人口と被災地の立地条件、文化水準および時代的背景などがそれぞれの年代で相違することをまず念頭に入れておかねばならない。また、高潮の規模を表わすものとして、最高潮位、最低潮位あるいは最大偏差が代表的であるが、観測の歴史は長期的な記録が残っているものとして、たとえばイギリスのSheerness(1819-)、ドイツのCuxhaven(1813-)、わが国の神戸(1926-)の例からもわかるように、たかだか150年程度であり、それ以前の高潮についてはいずれの諸量も不明あるいは不正確であるので、外力の大きさとの関係で議論できない制約がある。

図-3.1は西暦700年以降現在に至るまで、各10年ごとの大阪付近における高潮災害の発生数を示したものであり、この期間で89回発生している。これから、とくに、1700年代と1900年代に高潮が群発し、それに伴って死亡者数も多いことがわかる。なお、1000年から1400年にかけては高潮災害が発生していないことになるが、これはその前後の発生状況から考えて不自然であって、当時の政治情勢の混乱などが原因して記録に残っていないことによるものと推察される。また、比較的資料の整っている1900年以降昨年に至るまで日本各地に來襲した高潮は約100回程度であるが、そのうち潮位偏差が2m以上に達したものは、表-3.1に示した10例だけであり、実に5例が大阪で発生しており、1m以上のものについては17例が同地で記録されている。

このように、大阪湾沿岸は高潮の発生頻度が高く、したがって高潮災害を蒙る危険性がとくに高いことがわかる。この事実は東京、名古屋および大阪の各地での高潮の再現期間の推定結果からも確認できる。すなわち、表-3.2によれば、潮位偏差が大きくなるほど大阪における高潮の再現期間は名古屋に比べて短くなっており、また前述した來襲頻度とかなり対応していることが見出される。

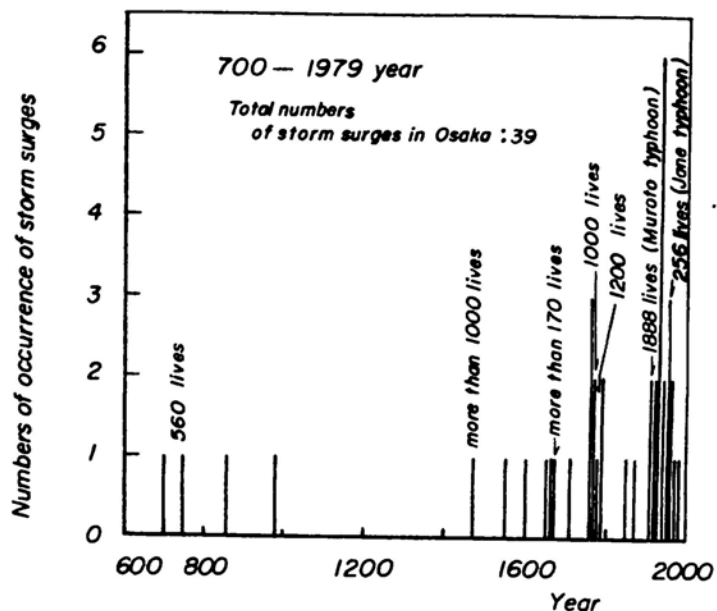


図-3.1 大阪に來襲した高潮災害と死者数

表- 3.1 日本沿岸のおもな高潮 (1900 年以降)<sup>7)</sup>

発 年	生 月	日	高潮の発生 した海域	最大偏差 (m)	最高潮位 (T.P. 上 m)	備 考
1917	10	1	東京湾	2.1	3.0	台風
1930	7	18	有明海	2.5	—	台風
1934	9	21	大阪湾	2.9	3.1	室戸台風
1950	9	3	大阪湾	2.4	2.7	ジェーン台風
1956	8	17	有明海	2.2	4.2	5609 台風
1959	9	26	伊勢湾	3.4	3.9	伊勢湾台風
1961	9	16	大阪湾	2.5	3.0	第2室戸台風
1964	9	25	大阪湾	2.1	2.6	20 号台風
1965	9	10	大阪湾	2.3	1.9	23 号台風
1970	8	21	土佐湾	2.4	3.5	10 号台風

表- 3.2 高潮の再現期間<sup>7)</sup>

偏差 地点	0.5	1.0	1.5	2.0
東京	1.0 年	8 年	23 年	35 年
名古屋	0.6	3	8	15
大阪	0.7	3	7	10

### 3.2. 高潮災害の実態

昭和年代に大阪湾に来襲した3大台風とそれに伴う高潮の詳細については、各災害の調査報告書<sup>8),9),10)</sup>あるいは専門書<sup>11),12)</sup>ですでに記述されているので、ここではごく概要を示すことにする。表- 3.3はそれ

表- 3.3 大阪における3大高潮災害の概要

項 目	室戸台風	ジェーン台風	第2室戸台風
来襲年月日	1934年9月9日	1950年9月3日	1961年9月16日
大阪の最低気圧	954.3 mb	970.3	937.3
進行速度	60 km/hr	58	50
最大風速	42.0 m/s	28.1	33.3
瞬間最大風速	60 m/s 以上	44.7	50.6
最高潮位 (O. P. +)	4.20 m	3.85	4.12
総雨量	22.3 mm	62.2	44.2
潮位偏差	2.92 m	2.37	2.45



それぞれの台風とそれに伴う高潮の規模を示す。これから、高潮の最高潮位と最大偏差は室戸，第2室戸およびジェーン台風の順に小さくなっていることがわかる。さて、これらの台風に伴う死者・行方不明者数と大阪市における死亡リスクを図-3.2に表わした。図中には大阪府と大阪市のそれぞれの死者・行方不明者数を示したが、このうち、室戸およびジェーン台風では高潮による人的被害が圧倒的に多いのに対し、第2室戸台風による大阪市の死者はすべて高潮以外の原因で発生している。また、これらの数字から、室戸台風時には大阪湾全域で人的被害が生じているのに対し、ジェーン台風時にはそれがとくに大阪市に集中していることが見出される。一方、大阪市について浸水域の常住人口数を用いて死亡リスクを計算すれば、室戸台風時には浸水域で千人に1人の割合で死者・行方不明者数が出ているが、第2室戸台風では高潮の規模が室戸台風の場合とあまり相違しないにもかかわらず10万人に1人と急減している。

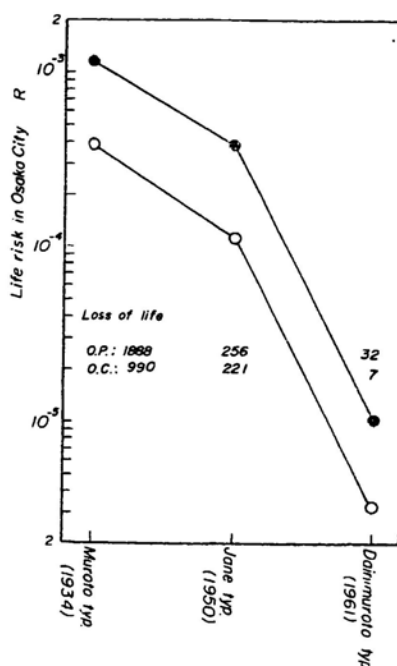


図-3.2 3大高潮による死亡リスク

図-3.3は大阪市内における建物被害の比較を示し、図-3.4は浸水域図である。まず、床上浸水家屋数は高潮の規模と対応しているのに対し、床下浸水家屋数は第2室戸台風時に一番多くなっていることが認められる。後者の原因は後述するように地盤沈下が東大阪の家屋密集地区でも臨海部に匹敵する程累積したため、図-3.4に示すように、内水による浸水が発生したためといわれている。つぎに、家屋の全・半壊および流失数については、ジェーン台風時のものが他の台風時に比べて非常に多いことに気づく。ジェーン台風当時の大阪市の常住人口が1934年の室戸台風時よりも約100万人も減少しており、それに比例して当然家屋数が減っていると考えられるので、なおさらにこの現象が特異にうつる。この第1の原因は第2次世界大戦直後のため、住環境が劣悪であったことによるものであろう。これは、全・半壊および流失家屋数と床上浸水家屋数がほぼ等しいことから確かめられる。一方、第2室戸台風時には浸水家屋数に比べて壊れたり流された家屋はきわめて

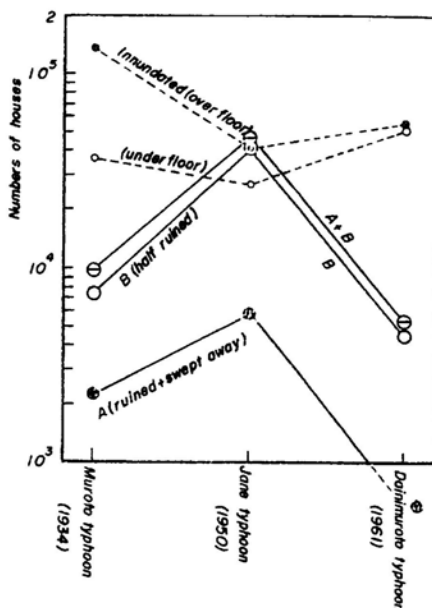


図-3.3 3大高潮による建物被害

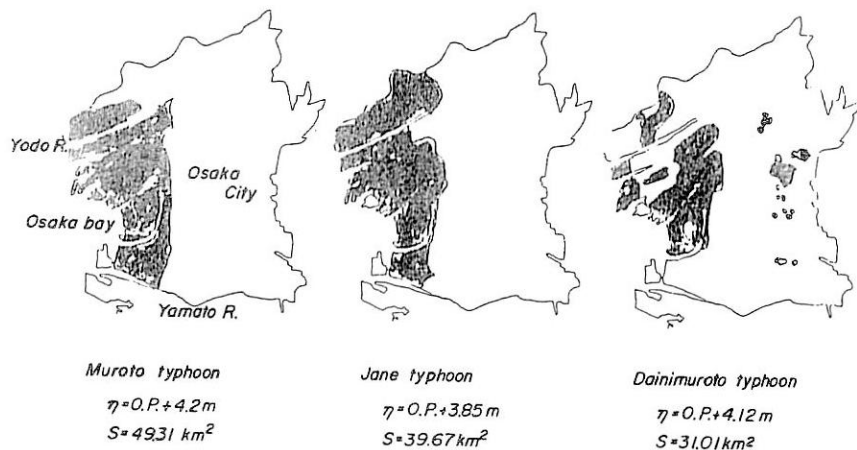


図 - 3. 4 浸 水 域 図

少くなっている。この理由は浸水が防潮堤や都市河川の護岸の欠陥によるものよりは、むしろ越流と内水氾濫によると指摘できよう。いずれにしても、高潮による人的被害がほとんどの場合、家屋の倒壊や流失によってもたらされていることから、高潮防潮堤などのハードウェアによってある程度制御された高潮の外力の大きさは、家屋の全・半壊および流失数に関係するものと考えてよいであろう。

さて、図 - 3. 5 は高潮の人的および物的被害に直接影響する地盤沈下について、1935 年から 1976 年の約 40 年間の累積等沈下量図である。大阪市域については、現在年間沈下量は地下水の使用規制が効を奏して、ほとんど無視できる量まで減少するかあるいは零になっているが、過去約 40 年間にひどいところでは 2.8 m も沈下していることがわかる。図 - 3. 4 で示した各高潮の最高潮位から考えても、また台風期（7, 8, 9 月）の朔望平均満潮位が O. P. + 2.2 m であり、図中の O. P. + 3.0 m 以下の市域の広さから判断しても、ひとたび過去の 3 大高潮に匹敵する高潮が発生して市内域に

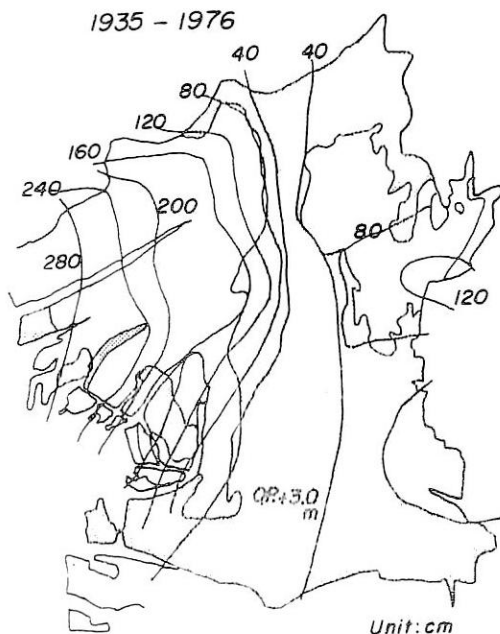


図 - 3. 5 累積等沈下量図

浸入すれば、その被害面積が当時とは比較しようもない程拡大することが明らかである。

### 3.3. 高潮による死亡リスクの変遷

高潮による死亡リスクの値は防潮堤や防潮水門などのハードウェアと台風情報や避難情報などのソフトウェアの充実によって低くなるが、そのいずれか一方が死亡リスクの低下にどの程度寄与しているかを定量的に求めることは一般に困難といえる。しかし、いま対象としている大阪における3大高潮の場合には、一応ハードウェアによる高潮防御施設によって、外力の大きさは図-3.3に示した順序に従うものと考えてよいであろう。逆にいえば、災害情報などのソフトウェアが時代とともに充実しなければ、人的被害の大きさは外力の大きさに一義的に決定してしまうことになる。たとえば、図-3.6は堤防、護岸の高潮防御能力を基準として、高潮による死亡リスクを求めたものである。図中の横軸は高潮の最高潮位とそれらの平均天端高の差であり、対象住民数は過去の浸水資料から、高潮による浸水地域の常住人口の推定値とした。なお、第2室戸台風時には高潮対策事業が継続中であり、かつ地盤沈下が進行していたので、土佐堀川の越流時の平均水深を大阪市における堤防、護岸の仮の天端高とした。計算結果にはかなりの誤差が含まれると思われるが、高潮の越流水深が大きくなると、浸水流域および流速がともに大きくなり、死亡リスクは極めて増加することが見出され、その傾向に大きな地域差は認められない。こ

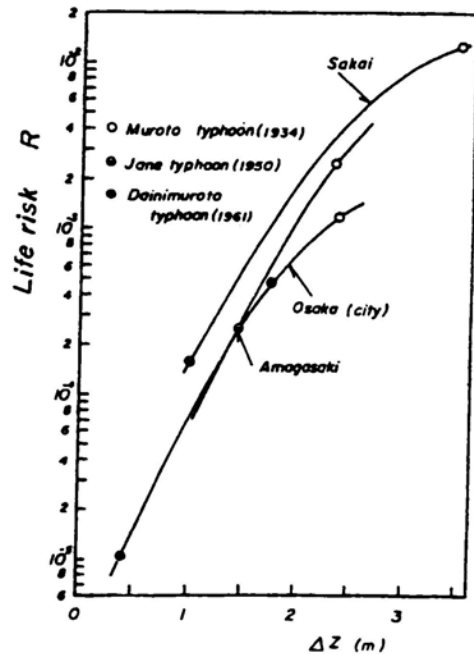


図-3.6 高潮の越流水深と死亡リスクとの関係

の図は、室戸台風時の堺市では実に100人に1人の割合で死亡しているの、いかに悲惨な災害であったかをうったえる恰好のものではあるが、これから、防潮堤や護岸の天端高を高くさえすれば死亡リスクは減少すると単純に考えるならば、それは大きな誤りであろう。なぜなら、図-3.5と比較すれば容易に理解できるように、図-3.6には災害情報などのソフトウェアの充実による減災の効果が含まれているからである。そこで、つぎに少し詳しく個々の死亡リスクの内容を検討してみよう。

#### 3.3.1. 家屋の被災と死亡リスク

図-3.7は室戸台風およびジェーン台風による各区分の家屋全壊率 $N_f$ と死亡リスク $R$ を示したものである。ただし、 $N_f = (\text{全壊} + \text{流失家屋数}) / \text{世帯数}$ であり、また臨海区と内陸区に分けて図示した。(a)および(b)を比較すれば、まず家屋の全壊率の最大値がジェーン台風では最大0.1程度にもなり、この点に関して室戸台風の場合より家屋の全壊率が大きかったといえるが、同一の家屋全壊率に対して死亡リスクはジェーン台風の場合が1オーダー低くなっていることがわかる。すなわち、ジェーン台風の場合の方が室戸台風の場合に比べて死亡する危険が高かったにもかかわらず、むしろ後者の方が結果的には死亡リスクが大きくなり、実際には危険であったといえる。また、室戸台風の場合には家屋全壊率によ

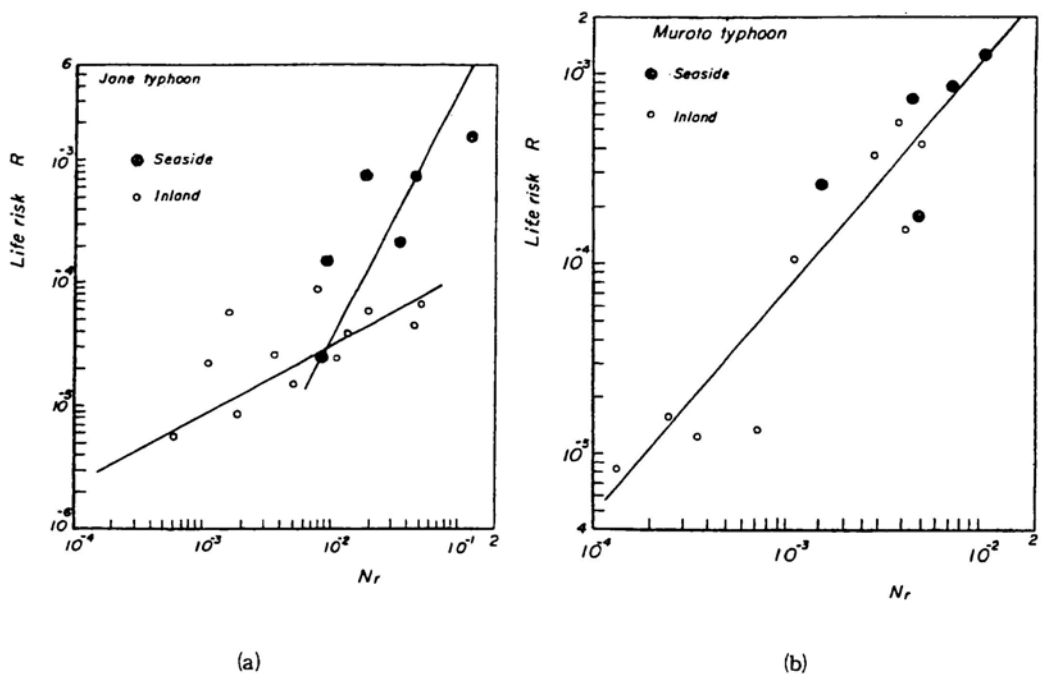


図-3.7 家屋全壊率と死亡リスクとの関係

る死亡リスクの変化に臨海区と内陸区の差がみられないのに対し、ジェーン台風の場合には両者に明らかな差が認められる。この原因としては、両台風による高潮の浸水過程が相違することが挙げられよう。すなわち、室戸台風当時の記録には、大正年代の初期から約20年以上も高潮による大きな被害がなかったことや臨港地区では活発な荷役を円滑にすすめるために、自然堤防や簡易護岸が随所で切りとられていたことが記載されており、高潮による浸水は潮位の上昇とともにほぼ同時に臨海区で発生し、それが内陸区へ伝播したと考えられる。一方、ジェーン台風当時には、高潮対策事業が戦争で中断を余儀なくされ、戦後再開されたものの極端な物資不足のため、当時の市内河川の一部の区間にしかコンクリート護岸はなく、あとは石炭ガラや土などの簡易材料で築堤し、天端高をかううじてそろえたことが報告されている。したがって、ジェーン台風の場合にはこれらの防潮堤、護岸である程度の潮位までは高潮の浸入を防御できたと思われるが、さらにそれ以上になって越流あるいは越波が発生するとひとたまりもなく約45箇所にわたって破堤してしまったと想像することは容易であろう。この浸水過程はそれから9年後の伊勢湾台風の高潮においても再現されるが、一時の破堤による大規模かつ高速の海水の堤内地への流入は臨海区で激甚な人的被害を発生させたのであろう。

そこで、このことをさらに明らかにするため、家屋の全壊率と破堤との関係を調べた結果を図-3.8に示した。ここに、縦軸の $l_i$ は防潮堤、護岸の破堤部総延長であり、 $h_i$ は臨海区のそれぞれの平均浸水深であって、両者の積は海水の流入量を表わすものと考えてよいであろう。これから、室戸台風の高潮

については、 $N_r$ と $l_i \times h_i$ の間には明確な関係が見出せないのに対し、ジェーン台風の場合は両者に良好な相関性が認められる。したがって、上述したような室戸台風とジェーン台風による高潮災害時の浸水過程の相違がかなり裏付けされたといえよう。

さて、前述したように、第2室戸台風では大阪市内で高潮によって死亡した人は零であり、死亡リスクは評価できないので、いわゆるハードウェアとソフトウェアの防災・減災の効果をいずれも議論できない。そこで、ここでは負傷者を含めたリスクを定義することにした。すなわち、死者・行方不明者に重、軽傷者を加えてリスクを計算する方法である。図-3.9は室戸、ジェーンおよび第2室戸台風の高潮による死亡・負傷リスク $R_d$ と家屋被害率 $N_d$ との関係を表わしたものである。

ただし、 $N_d = (\text{全壊} + \text{流失} + \text{半壊家屋数}) / \text{世帯数}$ である。この図から、まず、同一の家屋被害率に対して室戸台風の負傷・死亡リスクがほかの場合に比べてかなり大きく、しかも

臨海区と内陸区でその傾向が異なることがわかる。これは、室戸台風当時、高潮防御施設や台風情報などが不満足なものであって、いわば不意打を食った形で災害が発生したことによるほか、この台風の猛烈な暴風による学校の校舎、家屋の倒壊や半壊によるところも大きい。すなわち、大阪市内における死亡・負傷者4,986名中、校舎の全・半壊で257名死亡、1,076名負傷し、合計2796にも及んでおり、家屋の半壊による負傷者が非常に多いことと合わせて大きな特徴となっている。一方、ジェーン台風と第2室戸台風の場合には、

家屋被害率による死亡・負傷リスクの特性がかなり接続する傾向を示すが、ある程度台風情報や高潮情報が適確に出された前者の場合に

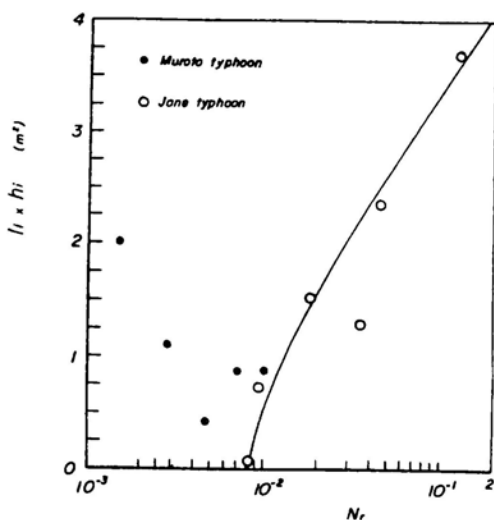


図-3.8 家屋の全壊率と破堤との関係

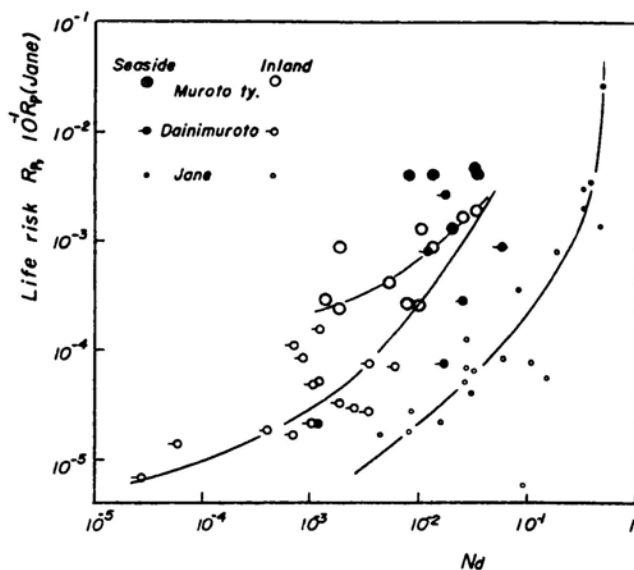


図-3.9 家屋被害率と死亡・負傷リスクとの関係

も、とくに臨海区で死亡・負傷リスクが際立って大きくなっていることが目立つ。その原因として考えられることは、前述の防潮堤などのハードウェアの不完全さ、堅固な避難所が少なかったことおよび地盤沈下のため高潮の平均浸水深が、室戸台風の場合 1.59 m であるのに比べて 1.97 m にも達したことが挙げられる。ちなみに、第 2 室戸台風の場合には、地盤沈下がさらに進行していたにもかかわらず、臨海区の平均浸水深は 0.73 m であって、適切な台風情報や避難情報のほかに、防潮堤・護岸と内水排除施設が効果的に防災・減災のために働いたといえる。したがって、ジェーン台風当時、ハードウェアの問題はもちろんあるが、とくに避難情報の質・量がともに不十分であったために、死亡・負傷リスクの頭打ち傾向がみられず、このような悲惨な結果になったのであろう。

### 3.3.2. 台風・避難情報と死亡リスク

すでに、3.3.1.において、高潮による被害規模はハードウェアのみならず、台風・避難情報などのソフトウェアの充実によって小さくなることを示した。ここでは、とくに後者の効果を取り出すことを試みる。

図-3.10 は高潮によって浸水した区の、平均浸水深と浸水率（浸水面積／全面積）の積と死亡リスクの関係を示したものであり、横軸の値は浸水量に対応している。同一の  $h \times S$  に対して、臨海区ではハードウェアとソフトウェアおよび内陸区ではソフトウェアの程度の差が死亡リスクに影響するが、近似的にはソフトウェアの影響の方が顕著に表われると考えられる。図から、室戸台風とジェーン台風の場合では両者に明らかな相違がみられる。台風情報に関して、室戸台風当時、予報技術および伝達方法などに大きな問題点があったことはすでに指摘されているが、それ以外につきのような原因が挙げられる。すなわち、台風が大阪に最接近したのは午前 8 時 5 分頃であり、高潮情報としては当日午前 2 時に、「午前 4 時 55 分の満潮時に約 3 尺の高潮の来襲の恐れがある」という簡単なものであった。実際の最大偏差がその約 3

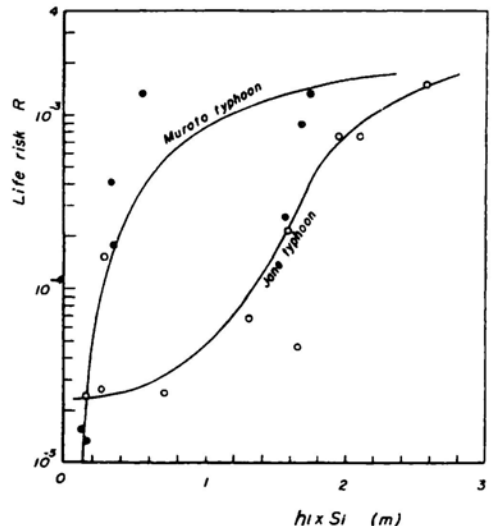


図- 3.10 浸水量と死亡リスクとの関係

倍であったという情報の不正確さはともかくとして、停電のため、第 2 回目以降の放送は自家発電によりニュースの時間帯だけ行っただけであり、まして深夜の停電時に一般の家庭で情報を手に入れることは不可能であったといえよう。これに輪をかけたように、ラジオの普及率が低く（推定 40 %）、学校の登校時と台風の接近が重なりかつそれ以前の約 20 年以上も大高潮の経験がなく、災害時の心構えもできていなかったために、このような大災害になったのであろう。一方、ジェーン台風の場合には、午前 7 時に暴風雨警報、同 10 時 35 分に高潮特報が発令され、午後 12 時 30 分に台風が大阪に最接近した。この間、台風情報が 4 回発表され、NHK から合計 7 回のラジオ放送が行われた。このように、台風情報に関してはかなり充実していたが、高潮とそれに伴う避難情報が台風の最接近時前後に相ついで出された

ため、全市的に午前11時には停電していたことも重なって、避難は必ずしも適切に行われなかったと想像される。こうした台風時の表-3.4に示した避難情報のランク（情報内容の質）と死亡リスクとの関係<sup>18)</sup>について、土屋・安田は伊勢湾台風に伴う高潮災害を対象として図-3.11の結果を得ている。これから、情報の質が高く、かつ避難を徹底した場合ほど死亡リスクが2桁以上減少することがわかる。もちろん、この場合ランクAの地域の最高潮位がランクCおよびDに比べて平均的に低いので、外力の大きさの影響もこの中に当然入っている。

表-3.4 避難情報のランク<sup>18)</sup>

ランク	避難情報の内容
A	危険地域に対して避難命令を発令し、避難を完了した市町村
B	避難命令を発令したが、その時期・方法が適切でなく、避難が不完全であった市町村
C	避難命令は出さなかったけれども、状況に応じて警察・水防団体などによって危険地域住民の避難誘導を行った市町村
D	避難命令は出さず、住民の自由的行動に任せた市町村

さて、図-3.12は第2室戸台風時の最大風速の発生時刻を基準として、避難勧告・命令を発令した時刻と死亡・負傷リスクとの関係を、浸水深をパラメータとして示してある。この図からもわかるように、避難勧告・命令が早く発令されるほど死亡・負傷リスクが小さくなっていることが認められる。

第2室戸台風では幸いにして避難情報が時宜を得て発令かつ徹底されたため、死亡者数が高潮の規模の割に極端に少くなっている。したがって、死亡リスクを用いた解析は十分とはいえなかったが、伊勢湾台風の場合の検討結果と合わせて、災害情報の充実が防災・減災に非常に有効に働くことがわかる。

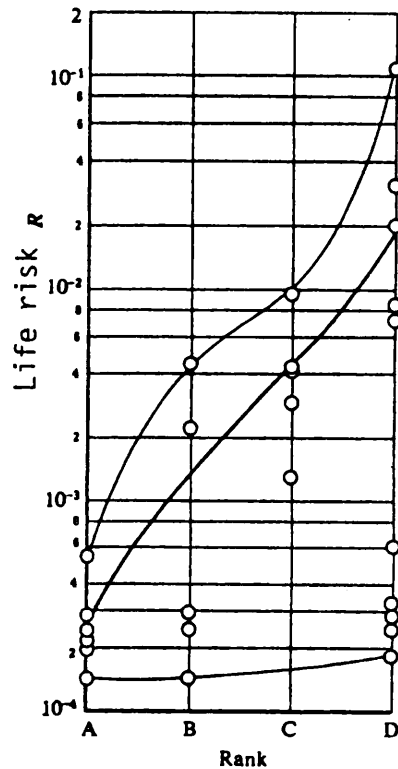


図-3.11 死亡リスクと避難情報のランクとの関係<sup>18)</sup>

#### 4. 統計解析による高潮の将来予測上の問題点

高潮防潮堤や防潮水門などの高潮防御施設いわゆるハードウェアの設計では、当然のことながら計画潮位を決定する必要がある。従来より高潮の統計解析が実施されてきた。その場合、計画潮位の再現期間に比べて実測潮位の取得期間が短いので、外挿によって求めることによる信頼性や、統計量としての潮位の独立性が必ずしも確認されていなかった。さらに、過去20年間の東京湾、伊勢湾および

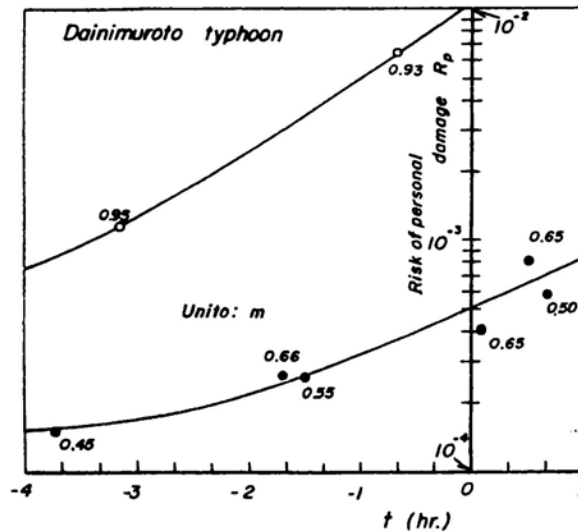


図- 3.12 避難勧告・命令の発令時間と死亡・負傷リスクとの関係

大阪湾沿岸における大規模な埋立てのために自然環境が変化し、潮位もこの影響を受けて従来の特性と変っている恐れが十分にあることが問題点としてクローズアップされてきた。そこで、本章では大阪における従来の高潮統計の解析結果を要約したあと、その解析上の2、3の問題点を指摘することにする。

#### 4.1. 従来の高潮統計

すでに述べたように、高潮対策事業を進める場合には、まず、高潮の生起確率を推定することが第1であって、各種のハードウェアの能力はこの精度のいかんにかかっている。既往の潮位資料から高潮の再現期間を推定し、これに基づく計画潮位の決定方法には、つぎの4つがあるといわれている。<sup>14)</sup>

- (i) 既往最高潮位あるいはこれに若干の余裕高を見込む。
- (ii) 期望平均満潮位に既往の最大偏差あるいはモデル高潮の潮位偏差を加える。
- (iii) 既往の最高潮位の生起確率を求め、外挿によってある再現期間にそれより高い潮位が1回起こるような潮位を決める。
- (iv) 最高潮位の生起確率と各潮位に対する後背地の被害額および高潮対策施設の建設費を勘案し、経済的に決定する。

いずれの方法を採用すべきかは、種々意見がわかれるところであろうが、(i)あるいは(ii)を用いるにしても、高潮の極値統計解析をまず行わねばならない。

すでに、大阪に來襲する高潮については、近藤が<sup>15)</sup>1900年から1951年までの、また那智が<sup>16)</sup>1928年から1969年までの潮位資料をそれぞれ用いて、統計解析を実施している。現在の大阪港の計画基準潮位 O. P. + 5.20 m は後者の成果に負っており、それはつぎのようにして求められている。すなわち、伊勢湾台風が室戸台風のコースを通過して來襲するという最悪のケースを想定し、1レベルモデルで数値計算した結果、最大偏差は3.16 m になるが、ジェーン台風による計算結果と実測値との差を考慮してこれを2.93 m と修正した。したがって、これらの考察結果から、伊勢湾台風級が大阪に來襲しても、最大偏



差の規模はおおむね室戸台風と同程度であると判断し、既往最大の思想に準拠して計画潮位をつぎのよ  
うに決めた。

$$\begin{array}{lcl} \text{台風期(7, 8, 9月)朔望満潮位} & \text{室戸台風の偏差(推定値を含む)} & \text{計 画 潮 位} \\ \text{O. P. + 2.20 m} & + & 3.00 \text{ m} \\ & & = \text{O. P. + 5.20 m} \end{array}$$

この値は表－4.1に示した再現期間の推定値と比較して、最高潮位は180～290年、最大偏差は47～60年に相当することがわかる。以上のように高潮位および潮位偏差の再現期間が大きく相違するが、統計的には後者を統計量として取り扱う方が合理的であるとされている。

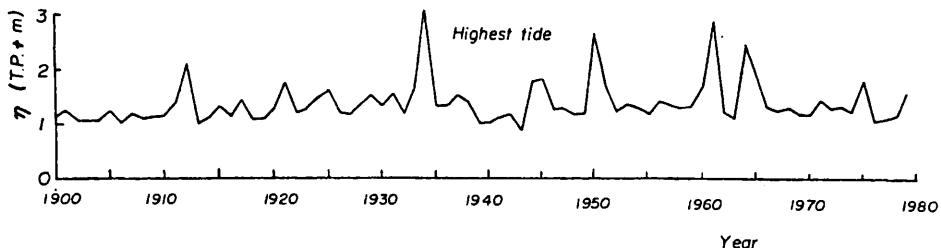
表－4.1 高潮の再現期間<sup>15)</sup>

極 値	Gumbel 分布	岩 井 法	指数 分布
最 高 潮 位 (O. P. + 5.2m)	278 年	270 年	178 年
最 大 偏 差 (3 m)	49	47	60

#### 4.2. 高潮の統計解析上の問題点

高潮の統計解析では統計量である潮位にあまり注意を払わず、いきなり具体的な解析をすすめている例が多い。従来より種々の確率分布式による再現期間の推定では、実測値の棄却・検定をやるまでもなく、その適合度はきわめて良くないことがわかる。このような点も含めて、ここでは統計量としての潮位のもつ特性とそれに及ぼす影響因子について述べてみることにする。

(1) 潮位記録の信頼性：統計解析をすすめるためには、潮位記録の精度が十分保証されていなければならない。たとえば、図－4.1で示した大阪港の潮位記録はO. P. 原標の移設、空襲による観測井戸の破壊および地盤沈下の影響を極力補正するよう努力した結果であり、同様の補正が神戸港の潮位記録に対しても実施されている。ただし、とくに大阪港の戦前の潮位計は精度が落ちると言われており、これについての補正はいまのところ不可能である。



図－4.1 大阪の最高潮位の経年変化

(2) 統計量としての独立性：いうまでもなく、統計解析する高潮の極値は統計量として独立であることが必須である。しかしながら、図-4.1からもうかがわれるようにトレンドが存在し、最大偏差についてもこれが認められた。前者のトレンド指数は2.08であり、標本集団全体では潮位の増加傾向が見出された。イギリスの東海岸の各地でもこうしたトレンドが見出されているが、その成因は気象学的なもの<sup>17)</sup>のほかとくに埋立などに伴う人為的な自然環境の変化が挙げられる。したがって、解析に先立ってこれを除去する必要がある。

一方、高潮が台風や温帯低気圧などによってもたらされるので、毎年最高潮位などの極値は独立性を保証されているように考えられる。しかしながら、図-4.2に示した最高潮位のビリオドグラムやコレ

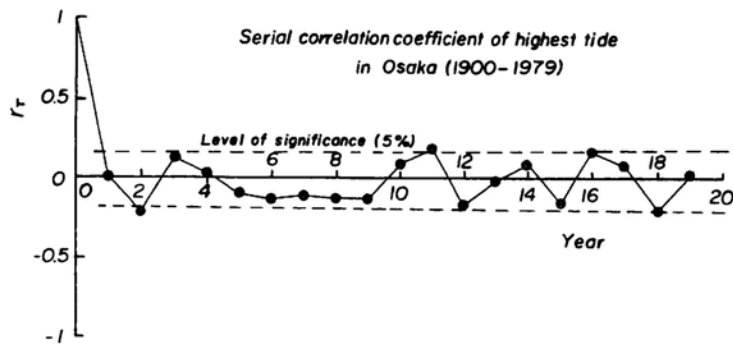


図-4.2 大阪の最高潮位のコレログラム

ログラムからは明らかに潮位の周期性が見出される。

図-4.3は大阪における極値確率紙上の毎年最高潮位と5年間最高潮位の比較である。前者は非常に適合度は悪いが、後者はある程度改善されることがわかる。これと同じ解析結果が最近ドイツ<sup>17)</sup>の最高潮位について得られており、大体5年間以上の期間の最高潮位を対象とすれば、100年確率の潮位は一定値に収束することが示されている。

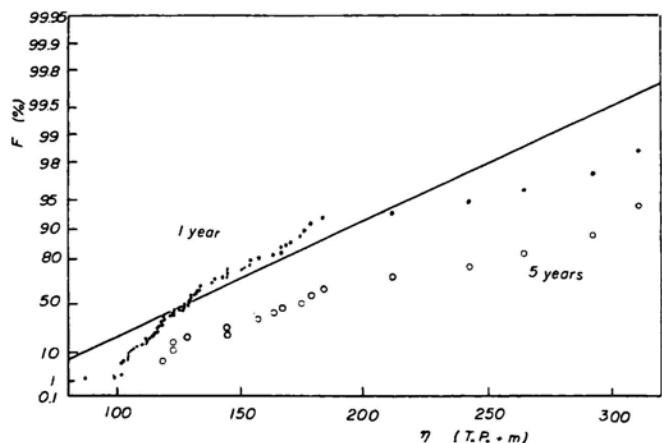


図-4.3 大阪の最高潮位の極値分布

(3) 朔望平均満潮位の周期的変動：前述したように、大阪の計画潮位の決定の基礎には、台風期（7, 8, 9 月）の朔望満潮位が O. P. + 2.2 m ということがまず念頭に置かれている。確かに、図- 4.4 から

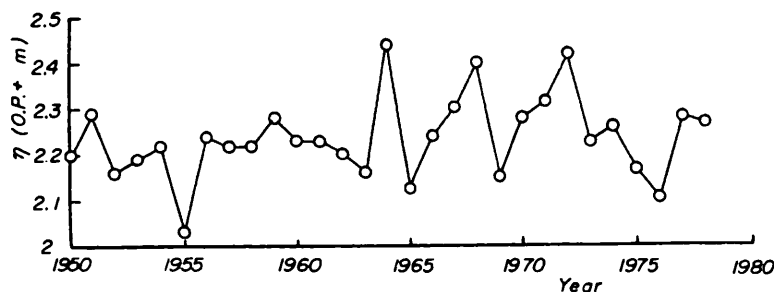


図- 4.4 台風期の朔望平均満潮位

も1963年頃まではこの値がほぼ一定であったことがわかる。しかし、その後、朔望満潮位に波状性的変動が認められる。この特性は神戸においても見出される。もちろん、黒潮の紀伊水道への接近に伴う異常潮位や第2室戸台風以後の台風による影響を考慮しても、この波状性が認められる。この原因は現在のところよくわからないが、図- 4.5 に示した大阪湾沿岸の大規模な埋立と時期的に符合することから、この影響が何らかの形で入っている恐れがあるが、なぜ波状性を示すかはやはり明らかではない。この点に関して神戸では10年程前から朔望期の満潮位付近で、潮位記録が平坦化する現象が報告されており、やはり埋立の影響が看過できないと考えられる。

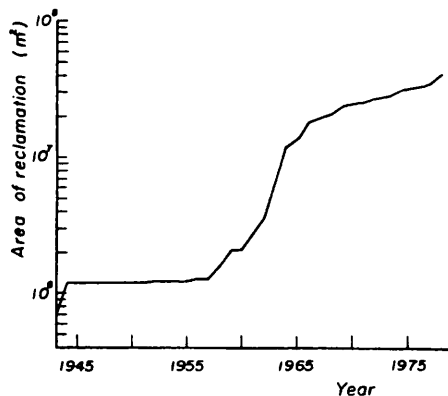
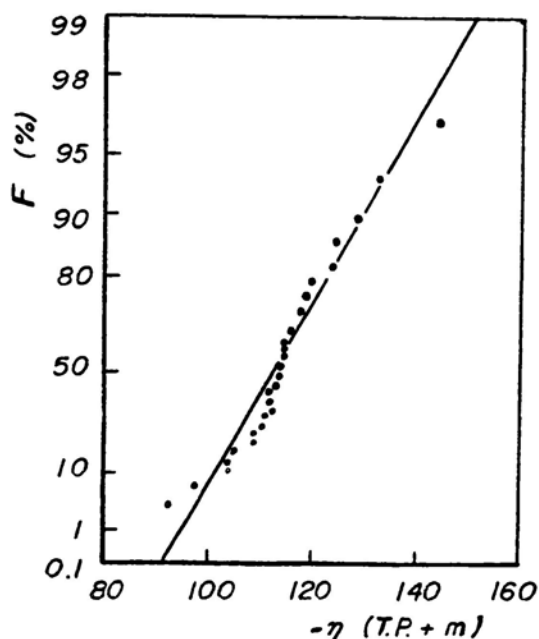


図- 4.5 大阪湾沿岸の埋立地面積の推移

(4) 最低潮位の統計解析の欠如：これまで、高潮の極値といえはほとんどの場合、最高潮位と最大偏差のみであって最低潮位がとり上げられることはなかった。しかし、図- 4.6 からわかるよう

に、大阪では過去に O. P. - 0.15 m の最低潮位が記録されており、これはつぎのような問題をもたらししている。すなわち、高潮防御施設の設計条件はほとんどの場合、外水位である潮位の最高値を基準として与えられるが、近年防潮水門や防潮壁によって高潮時に内水の自然排除が防げられ内水位は非常に高くなる可能性が大きい。高潮の潮位記録からもわかるように、ピーク通過後に resurgence が発生し、水位の極端な低下、いわゆる揺れ戻しが生ずる。このため、これらの高潮防御施設に大きな負圧がかか



図－4.6 大阪における最低潮位

ることが考えられる。したがって、最低潮位についても早急に統計解析を行うべきであろう。

## 5. 結 語

以上、大阪を中心として高潮災害の変遷と将来予測上の問題点について述べた。当初、将来予測については解析結果も記述するつもりであったが、頁数の都合と再度慎重な取り扱いをする必要上、これについては別の機会に譲ることにした。大型の台風が直撃しないこともあって、高潮の常襲地帯では過去の悲惨な経験がともすれば忘れ去られようとしている。現在、公共土木事業には必ずといってよい程、環境評価を行う義務が課せられているが、これと併行して是非とも Risk assessment（防災評価）をやるべきだと考えている。寺田寅彦博士の言によれば、「災害は忘れた頃にやってくる」ということであるので、高潮災害の比較的少ない現在、防災・減災のためのソフトウェアに関する研究を従来のハードウェアの研究と同程度かそれ以上やることが望まれる。ここで述べた手法の適用は京都大学防災研究所土屋義人教授の示唆によるものであり、その後先生との協同研究の成果を中心として本論文をまとめさせていただいたことに感謝したい。

最後に資料提供に御協力いただいた関係諸官庁に感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) United States Nuclear Regulatory Commission : An assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants, WASH-1400, p. 94, 1975.
- 2) 都甲泰正 : 安全評価と確率論, 原子力工業, 第 20 巻第 3 号, pp. 24 - 28, 1974.
- 3) 高橋浩一郎 : 台風のエネルギ-について, 中央気象台彙報, 第 85 巻, pp. 268 - 283, 1951.
- 4) 柳田邦男 : 災害情報を考える, 日本放送出版協会, p. 220, 1978.
- 5) 倉嶋 厚・原 達也 : 死者数からみた気象災害の変遷について, 気象庁研究時報, 第 24 巻, pp. 317 - 332, 1972.
- 6) 日本高潮史料, 荒川秀俊・石田祐一・伊藤忠士編, 吉川弘文館, p. 272, 1961.
- 7) 宮崎正衛 : 津波・高潮・海洋災害 ; 和達消夫編, 共立出版, pp. 209 - 215, 1970.
- 8) 室戸台風調査報告, 中央気象台彙報, 第 9 冊, p. 606, 1935.
- 9) ジェ-ン台風報告, 大阪管区気象研究報告, 第 3 号, p. 281, 1951.
- 10) 第 2 室戸台風報告, 大阪管区異常気象調査報告, 第 9 巻, 第 3 号, p. 191, 1962.
- 11) 黒田静夫・石綿知治 : 防災工学, 山海堂, p. 453, 1960.
- 12) 稲見悦治 : 都市の自然災害, 古今事院, p. 260, 1976.
- 13) Tsuchiya, Y. and T. Yasuda : High tide and life risk, refuge warning in relation to the Ise bay typhoon, Jour. Natural Disas. Sci., Vol. 2, No. 2, pp. 27 - 61, 1980.
- 14) 運輸省港湾局 : 港湾構造物設計基準, 日本港湾協会, p. 2 - 5 - 1, 1967.
- 15) 近藤市三郎 : 大阪市内における防潮対策に関する研究, 京都大学学位論文, 1960.
- 16) 那智俊雄 : 防潮対策に関連する大阪市内河川の水工計画上の諸問題, 京都大学学位論文, 1972.
- 17) Graff, J. : Concerning the recurrence of abnormal sea levels, Coastal Engg., Vol. 2, pp. 177 - 187, 1979.
- 18) Führeböter, A. : Frequencies and probabilities of extreme storm surges, Proc. 16 th Conf. on Coastal Engg., pp. 949 - 964, 1978.