

高潮ハザードマップと避難に関する二・三の検討

武田 誠*・井上和也**・戸田圭一***・川池健司****

1. はじめに

従来の高潮対策では、市街地の浸水を防ぐことに主眼がおかれている。つまり、設計論的には計画台風によって発生する高潮に対し、防潮堤などの天端高がある基準に従って定められてきたが、その設計を超過した高潮が発生し、浸水・氾濫が生じる場合はあまり考えてこられなかったといえる。そのような超過高潮のすべてに対し、構造的対策を講ずることは、財政や生活質などの面からみて適切とはいえず、したがって構造的（ハード的）対策と併せて避難などの非構造的（ソフト的）対策を充実させておくことが今日的な課題といえる。

洪水災害に関しては、浸水予測図におおまかな避難経路を重ね合わせた洪水ハザードマップが整備されつつある。本研究では、この考えを湾域都市部の高潮氾濫災害に応用することを試みる。まず、想定浸水深を包絡した浸水予測図（高潮ハザードマップ）を提示する。その後、ソフト的対策としての避難システムに関し、避難行動を最短経路問題とするモデル化によりシミュレーションを実施し、避難対策の重要な要因について考察する。

2. 高潮の氾濫解析法

高潮の解析には浅水方程式を用いる。また、気圧場、風速場および開境界条件は以下のように取り扱う。気圧場には Schloemer の式を用い、風速場は台風の移動に伴って発生する風と、気圧傾度による傾度風とのベクトル和によって算出し、開境界条件には、陸域からの反射を考慮した二段階の高潮解析手順を用いる（武田ら、1996）。

また、氾濫の解析にも浅水方程式を用い、解析手法には岩佐・井上・水鳥の方法（1980）を踏襲している。氾濫は破堤によるものとし、越流量は本間の越流公式を用いて算出する。

これらの離散化は武田ら（1996）と同様である。

3. 計算領域と計算条件

本研究の計算領域は、高潮計算を行う計算領域Ⅰ（ $\Delta x=1431.25\text{ m}$, $\Delta y=1153.125\text{ m}$ ）と氾濫計算も同時に行う計算領域Ⅱ（ $\Delta x=286.25\text{ m}$, $\Delta y=230.625\text{ m}$ ）および計算領域Ⅲ（ $\Delta x=57.25\text{ m}$, $\Delta y=46.125\text{ m}$ ）である（図-1）。計算は、まず計算領域Ⅰで行い、次に計算領域Ⅱ、Ⅲと逐次進行する。この際、計算領域Ⅰの開境界値には高潮解析手順で得られた値を用いるが、計算領域Ⅱでの開境界値には、計算領域Ⅰの計算において算出した計算領域Ⅱの開境界部に相当する水理量を用いる。計算領域Ⅲでの開境界値も同様にして計算領域Ⅱの結果より求める。

本研究では、主に計算領域Ⅲ（大阪市の港区と西区を中心とした領域）を用いて検討を進める。また、対象とした台風は大阪の計画台風（室戸台風コース、伊勢湾台風規模）であり、大阪における最大潮位偏差の発生時刻

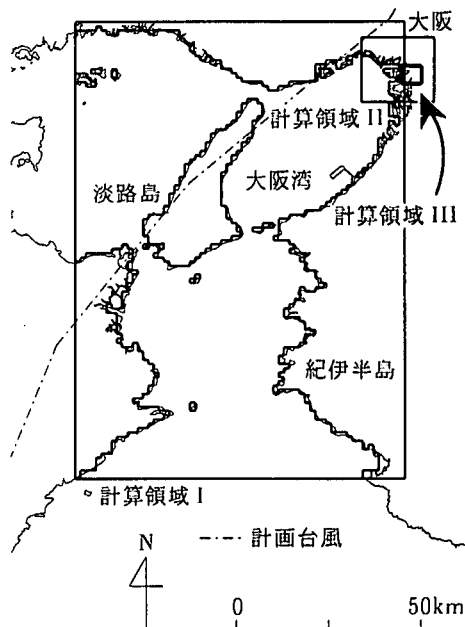


図-1 計算領域

* 正会員 工博 中部大学助手
 ** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所
 *** 正会員 Ph.D. 京都大学助教授 防災研究所
 **** 学生会員 京都大学大学院 工学研究科

と満潮時とが一致するように設定する。

4. 高潮ハザードマップの構築

建設省が示した洪水ハザードマップの作成要項(1994)によれば、その定義は、「破堤、氾濫等の水害時における被害を最小限に食い止めることを目的として、浸水情報、避難情報等の各種情報を分かりやすく図面などに表示したもの」とされている。本章では、避難情報は考えず、浸水情報のみに限って、洪水ハザードマップの考えを高潮災害に適用する。

ハザードマップ作成の計算においては、まず、計算領域に存在する防潮堤が、ほぼ等間隔に 18 カ所において破堤すると想定する (18 カ所同時に破堤するのではなく、

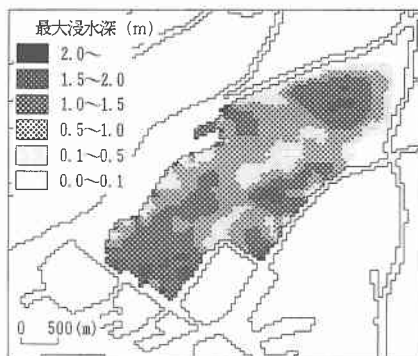


図-3 高潮ハザードマップ

1 カ所の破堤ごとに一回の氾濫解析を行う)。そして、その結果から、それぞれの破堤においての氾濫特性を検討するとともに、得られた 18 ケースの最大浸水深を包絡して高潮ハザードマップとする。

計算結果の例として、図-2 に 2 つのケースの最大浸水深図を示す (破堤想定位置の番号とケースの番号は一致させている)。ケース 14 では、破堤点が大湾寄りであるにもかかわらず、取り扱った領域の北端付近まで氾濫が広がっている。また、ケース 18 では、氾濫は地盤高が低い北方へ広がっており、その面積はケース 14 と比べて小さい。このように、氾濫の状況は破堤箇所によりずいぶん異なることが分かる。

すべてのケースの最大の浸水深を包絡した最大浸水深図が図-3 であり、高潮浸水に関するハザードマップである。この図から、危険な箇所が面的に把握でき、高潮対策の構築にとって有用な情報を得ることができよう。

5. 避難行動のモデル化

井上ら (1996) にならって高潮氾濫時の住民の避難行動をモデル化する。

5.1 避難行動モデル

ここで、以下の仮定を設ける (図-4 参照)。

- ・住区内の住民をさらに細分割した住民の集団 (以下、住民ユニット) を考える。住民ユニットは 20 人程度の規模である。この住民ユニットを避難行動モデルにおける最小単位とみなし、避難行動は住民ユニットの点的な移動であるとする。なお、住区は要避難地域内の住民の居住の最小単位である (ここでは、行政的な町丁の細分割を住区と考えている。また、住区の図心は後述するノードの一つであり、ここに複数の住民ユニットが配置されていると考える)。

- ・住民ユニットは、避難開始決定モデルによって避難を開始するものとし、開始後は速やかに指定の避難所に向かって移動する。

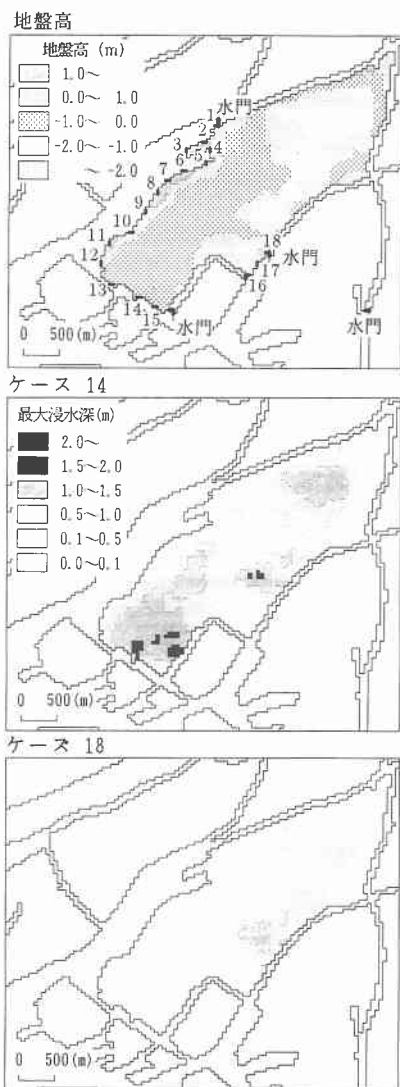


図-2 地盤高と最大浸水深

- ・移動は徒歩によるものとし、西原 (1983) に従い浸水深と避難経路の混雑に応じた移動能力の低下を考える。
- ・避難経路は指定避難所に向かう最短経路とする。
- ・住民が指定避難所に到達した時点でその住民ユニットの避難は完了したと定義し、それ以後の移動は考えない。
- ・住民ユニットの存在地点の浸水深が1mを越えた時点で、その住民ユニットは避難できなくなった(避難失敗)と定義し、それ以後の移動は考えない。

つぎに、避難行動モデルを構成するサブモデルを述べる。なお、破堤時刻を時間の基準としているので、避難情報発令時刻は破堤時刻との時差(避難情報発令時差とする)として取り扱う。

a) 避難開始決定モデル

住民ユニットの避難の開始には、強制避難と自主避難の二つの動機を考える。ただし、強制避難とは、避難勧告や避難命令(これらをすべて避難情報とよぶ)によって行われる避難と定義する。また、自主避難とは、避難情報からではなく、住区における浸水深の増加を認知することによって行われる避難と定義する。

強制避難では、避難開始率 R は、避難情報発令時差を、 t_{ord} 、避難開始時差を Δt_{hag} 、強制避難指数を R_{ord} とすると、時間 t の関数として次式で定義する。

$$R(t)=\begin{cases} 0 & (t < t_{ord}) \\ \frac{t-t_{ord}}{\Delta t_{hag}} \cdot R_{ord} & (t_{ord} \leq t < t_{ord} + \Delta t_{hag}) \cdots (1) \\ R_{ord} & (t \geq t_{ord} + \Delta t_{hag}) \end{cases}$$

ここでは対象領域全域に一斉に時刻 t_{ord} に何らかの命令・情報が発令され、伝達されるものと考ええる。また、 t_{ord} は避難情報の発令者である行政に依存するパラメータであるが、 Δt_{hag} は、情報を受け取ってから住民が実際に避難行動を開始するまでの時間と考えており、住民に依存するパラメータである。 R_{ord} は、 $t \geq t_{ord} + \Delta t_{hag}$ における避難開始率であって、住民に避難情報が伝わる割合や災害に対する啓蒙の程度そして住民の災害意識により変化すると考えられ、住民、行政のいずれにも依存するパラメータである。

自主避難では、避難開始率 R は、自主避難指数を R_{sp} とすると、浸水深 $h(m)$ の関数として次式で定義する。

$$R(h)=\begin{cases} \frac{h}{h_0} \cdot R_{sp} & (h < h_0 m) \\ R_{sp} & (h \geq h_0 m) \end{cases} \cdots (2)$$

R_{sp} は浸水深が h_0 になったときの避難開始率である。 h_0 は $R=R_{sp}$ になる水深(自主避難水深とよぶ)であり、ここでは h_0 に0.5mという値を採用する。本モデルの適用では、自主避難水深が0.5mより小さい場合についても検討するために、便宜的に R_{sp} を1.00以上にすることも行っている。例えば、 R_{sp} を2.00としたとき、式(2)

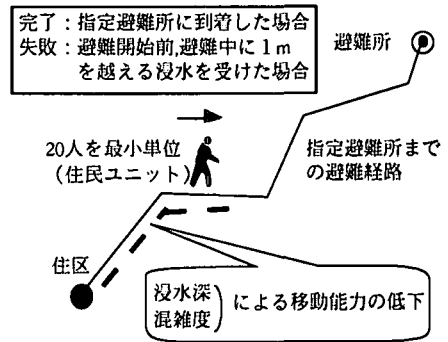


図-4 避難行動モデル

によれば、自主避難水深は実質的に0.25mと変更できる。ただし、 $R(h) > 1.00$ の場合には、 $R(h) = 1.00$ とする。

解析では、全ての住民ユニットに避難動機(強制、自主)別にあらかじめ乱数値(RD1, RD2)を与え、それらが避難開始率より小さければ避難を開始するとしている。

b) 最短経路問題としての避難経路

避難経路には指定避難所への最短経路がとられるとする。最短経路は、Warshall-Floyd法によって求める。

5.2 避難ネットワーク

計算に用いた避難ネットワークを図-5に示す。避難ネットワークは、411の住区と22個所の避難所および571カ所の交差点をそれぞれノードとし、948本の主要道路と住区あるいは避難所と交差点を結ぶ細道路をリンクとして構成する。主要道路の幅員は、1/2500の地図から読みとっている。ただし、細街路の幅員はすべて4mとする。なお、上記の避難所は大阪市の地域防災計画で指定されている施設である。また、ここで対象としている領域(大阪市の港区・西区)は都市化が進んでおり、高層住宅の居住率が高い。したがって、簡単のため高層住宅に住む人は要避難者には含めないことにした。さらに、

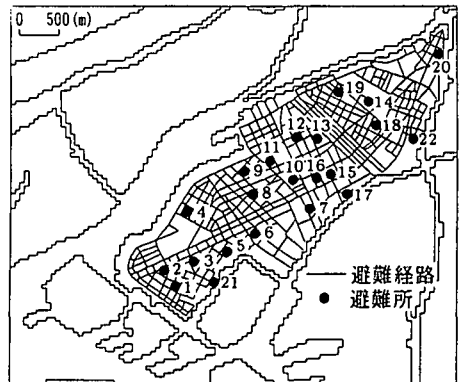


図-5 避難ネットワーク

避難所を指定するときは、地区（おおむね町丁単位で、複数の住区からなる）ごとに指定されるものとする。

6. 避難所指定の検討

まず、避難所指定の効果について若干の検討を行う。検討手順は、始めに、避難所指定の適当な初期案を設定し、以下に示す原則に従って指定の更新を行う。

- ・避難所の収容者数はその収容人数を超えない。
- ・同じ避難所に指定された地区の間で、避難距離に著しい不均衡が生じない。
- ・平均避難距離をできるだけ短くする。

住区から避難所までの距離には最短経路から算出された値を用い、避難所の収容人数には、大阪市地域防災計画の一時避難可能人員を使用する。

以上の過程より、収束したと判断できるものを指定避難所とした。この場合の避難所ごとの避難者数、避難距離の平均値をまとめたのが図-6(a)である。比較のため、避難所の指定がなく、最短距離の避難所へ避難すると仮定した場合の同様の結果が図-6(b)である。両者を比較すると、避難所指定の場合には、最短避難所の場合より避難距離が平均で200 m以上長くなることが分かる。しかし、最短避難所の場合、特定の避難所に避難者が集中し、収容人数を越す場合のあることも分かる。収容人数の制限および経路の混雑を考えると、避難所の指定は、避難対策のなかでも、とくに徹底して周知しておくべき項目であろう。

7. 浸水があるときの避難

ここでは、設定された避難ネットワークおよび指定避難所をもとに、浸水が堤内地に及んでいるとしたときの避難対策について考察する。避難シミュレーションに用

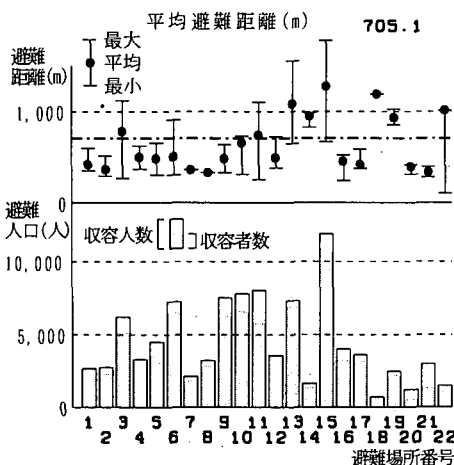


図-6(a) 避難先の収容状況（避難先指定）

表-1 計算条件

	パラメータ					
破堤時刻	0					
破堤箇所	CASE 14					
t_{ord}	-30分	-20分	-10分	0分	10分	20分 30分
Δt_{lag}	0分	5分	10分	20分	30分	
R_{ord}	1.0	0.75	0.5	0.25	0.0	
R_{sp}	2.0	1.0	0.75	0.5	0.25	0.0

いたパラメータおよび計算条件を表-1に示す。

計算は、氾濫解析と同時にっており、想定破堤点には4章の検討結果からケース14を選定している。その他のパラメータに関しては、表に示した値を組み合わせ、約1015通り（すべての組み合わせのうち、 $R_{ord}=0.00$ かつ $R_{sp}=0.00$ のときを除いた組み合わせ）の解析を行う。

7.1 避難状況に関する検討

詳細に検討するために、すべての避難シミュレーションの結果に林の数量化理論I類を適用し多変量解析を行った。この理論は、ある外的に存在する基準（外的基準）に関して、複数の属性に依存した従属変数（個体）の値をそれらの属性から予測するものであり、また、所定の属性に関して得られたカテゴリースコアの最大値と最小値の差（レンジ）を比較すれば外的基準の決定に関わる要因の影響度を知ることができる。

表-2は、外的基準として避難完了率（要避難者に対する避難完了者の割合）をとったときの結果である。要因の大きさは強制避難指数、自主避難指数、避難情報発令時差、避難開始時差の順となり、強制避難指数の影響が大きい。これらの結果から、避難完了率を向上させるに

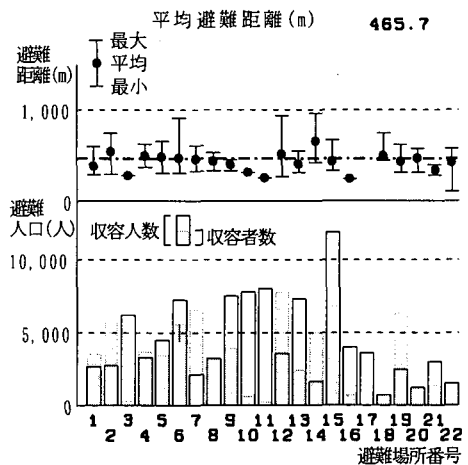
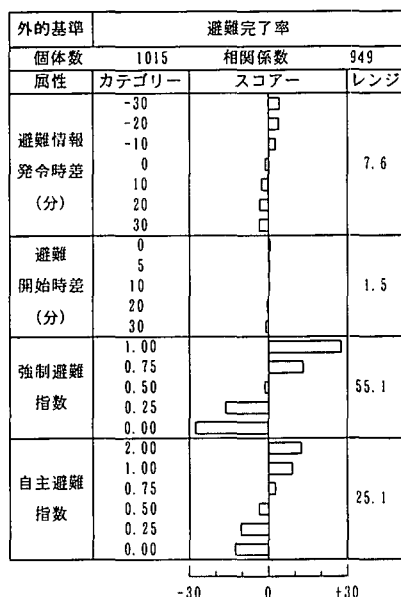


図-6(b) 避難先の収容状況（最短の避難所）

表一 数量化理論Ⅰ類による解析結果 (避難完了率)



は、まず強制避難指数を高める必要があるといえる。強制避難指数は住民の避難情報を受ける割合や受け取った場合の避難行動を開始する割合からなると考えられるため、強制避難指数を高めるには、避難情報の確実な伝達や住民の災害意識の向上を図らなければならないことが分かる。また、浸水してから避難情報の発令（避難情報発令時差が正の場合）は、避難成功率を減少させている。ここでは示さなかったが、外的基準に避難失敗率をとった場合、避難情報発令時差は要因の大きさが強制避難指数に次いで2番目となり、浸水してから避難情報の発令は、避難失敗率を増加させていた。これらのことから、浸水を見てからの避難は総じて危険であることが知られる。

7.2 避難アンケートとの比較

今本ら (1983, 1989) は、1982 年の長崎水害および大和川水害、1988 年の島根・広島水害について、被災地の住民を対象にほぼ同一様式のアンケート調査を実施し、避難行動の実態を分析している。ここではそれらをもとに、本研究の避難行動モデルとの定性的な比較を行う。

まず、強制避難指数に相当する記述を抽出すると、今本らは「避難率が増加した原因についてみると、避難命令による避難の貢献が最も大きく、勧誘避難のものがこれに次いでいる (1983)」ことなどを見いだしており、これは強制避難指数が避難状況に最も影響を及ぼすとする

本研究の結果に相当している。

また、情報伝達に関する記述には、今本らは「危険地内の住民を水害が発生する前に避難させるには、避難命令を早期に伝達することが最も重要であって、平常時の防災活動により水害への危険性を周知徹底させることも必要である (1989)」ことなどを指摘しており、本研究で得られた避難情報の早期伝達が重要であるという見解と一致する。

このように、避難解析による結論とアンケート調査の結果は、いずれも当然のこととはいえ定性的に一致している。むしろ、このような当たり前のことが、ややもすれば等閑に付されていることが大きな問題であると言えよう。

8. おわりに

得られた知見をまとめると、以下のようである。

1) 洪水ハザードマップの概念を高潮氾濫に適用し、浸水予測図としての高潮ハザードマップを作成した。また、氾濫特性についても考察を行い、破堤箇所の相違により、氾濫の様相がかなり異なることが知られた。

2) 高潮氾濫と避難行動を同時に解析する数学モデルを作成し、避難対策の検討を行った。その結果、避難場所以指定の有用性、避難情報の迅速かつ確実な伝達や防災意識の向上の重要性、浸水後避難の危険性などが示された。

参考文献

- 武田 誠・上塚哲彦・井上和也・戸田圭一・林 秀樹 (1996): 大阪湾域部の高潮氾濫解析—計算モデルの検証と高潮対策の有効性—, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 256-260.
- 岩佐義朗・井上和也・水島雅文 (1980): 氾濫水の水利の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号 B-2, pp. 305-317.
- 建設省河川局治水課 (1994): 洪水ハザードマップ作成要項及び解説書.
- 井上和也・戸田圭一・栗原 哲・武田 誠・谷野知伸 (1996): 洪水ハザードマップの作成についての一考察, 京都大学防災研究所年報, 第39号 B-2, pp. 459-482.
- 西原 巧 (1983): 氾濫解析に基づく避難システムの河川工学的研究, 京都大学学位論文, 1983.
- 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄 (1983): 昭和57.8大和川水害における住民の避難行動について, 京都大学防災研究所年報, 第26号 B-2, pp. 139-149.
- 今本博健・石垣泰輔・大年邦雄 (1989): 水害時の災害情報と避難行動に関する研究, 昭和63年科学研究費補助金(重点領域(1))研究成果報告書, 災害情報と避難行動に関する研究, pp. 47-62.