

計画降雨を入力した都市浸水害 発生予測タンクモデルについて

ON THE INUNDATION PREDICTION TANK MODEL INPUT BY THE
DESIGN RAIN.

阿部清明¹・塩月善晴²

Kiyoaki ABE and Yoshiharu SHIOTSUKI

¹学生会員 工修 山口大学工学部 システム工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²正会員 理博 山口大学工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

It is important for the precaution activity of inhabitants to know how much rain will cause the urban inundation in their city. We discussed in our previous paper the possibility of prediction in case of Ube city using Tank model and point rain prediction method. The Tank structure, Tank parameters and critical occurrence level of residual water in Tank were determined to separate clearly the inundation occurrence cases and the non-occurrence cases in the past rains. We call the critical occurrence level D line. In this paper, we examine how the Tank water level reaches the criterion level (D line) in case of Ube city, inputting the design rain into Tank instead of real 10minute rainfall data.

Key Words : *Urban Inundation Prediction, Tank Model, The Criterion Tank Water Level, Design Rain*

1. はじめに

今日の日本における都市低地部には人口や資産は集中しており, ひとたび大水害が起きるとかなりの被害が出ることが考えられる. 都市または低地部において内水氾濫による被害は毎年のように起きている. 小規模であってもそのたびたび起きている水害を調査し, この都市ではどれだけ雨が降れば浸水害が起きるかと言うことを把握することは重要である. 大河川などでは流量の観測が行われそれを元に解析を行い計画がなされる. しかし, 都市部の排水路で浸水害が起きているところでは流量の観測はなされておらず実際の値を解析に反映させることは難しい.

著者らは都市流域の浸水害発生限界を知るために過去の浸水害発生, 非発生の降雨を元にタンクモデルにより発生限界Dラインを決定した. そして, タンクモデルと短時間雨量予測方式(PRFM)を組み合わせ浸水害発生予測モデルを構築した. その結果, 数10分から1時間程度早く浸水害の発生が予測できるようになった.

都市低地部に降った雨は, 大きな河川から海に流れて行く. しかし, そこで起きる内水氾濫などは大きな河川に流れる前に雨水排水路から溢水してしま

い床下浸水などの浸水被害となってしまう. 雨水排水路を整備するときに, 対象となる地域の計画降雨を設定しどれだけの雨水を排水するべきか流量の計算がなされる.

本研究では, 宇部市の雨水排水路の計画降雨波形を浸水害発生解析タンクモデルに入力し計算された水位が浸水発生限界Dラインに対してどのくらいまで達しているか比較検討する. そしてこれらの比較から流域が水害発生に対してどのような状態であるか考察を行う.

2. 都市浸水害発生予測タンクモデルの決定

(1) 降雨, 浸水害データ

宇部市の地勢は, 南北に細長く, 市の南部は埋め立て地で東西に長くまとまった沿岸平野をなし, 中部北部は標高50m~100mの丘陵地で, 最も高い山でも平原岳の395.1mとなる. 1994年から1998年に宇部市において浸水害が起きたところは図-1の黒丸の部分である. その特徴は雨水排水路が溢水することにより床下浸水などの浸水被害がでている地域である. 本研究において, 浸水害の発生は床下浸水, 床上浸水による浸水家屋が発生した場合をさす.

雨量データは宇部市の南東部に位置する下関地方

表-1 降雨データ

番号	日付	R10(mm)	R60(mm)	R180(mm)	浸水家屋軒数(軒)	降雨システム
1	1995/7/2*	11.5	29	49	—	梅雨前線
2	1995/7/2**	7.5	34.6	68.5	75	梅雨前線
3	1995/7/3	13.5	51.5	92.5		梅雨前線
4	1995/7/22	11	55.2	119	59	梅雨前線
5	1995/9/24	19	81.3	133.5	1,219	台風
6	1996/6/24	10	30.5	48	4	梅雨前線
7	1996/8/14	10	51	75.5	195	台風
8	1997/5/8	7	26.5	67.5	—	低気圧
9	1997/7/9	5.5	9.5	12.5	4	梅雨前線
10	1997/7/11	10	27	47	—	梅雨前線
11	1997/9/7	24	37.5	59	11	停滞前線
12	1998/10/17	9	39	64	1	低気圧

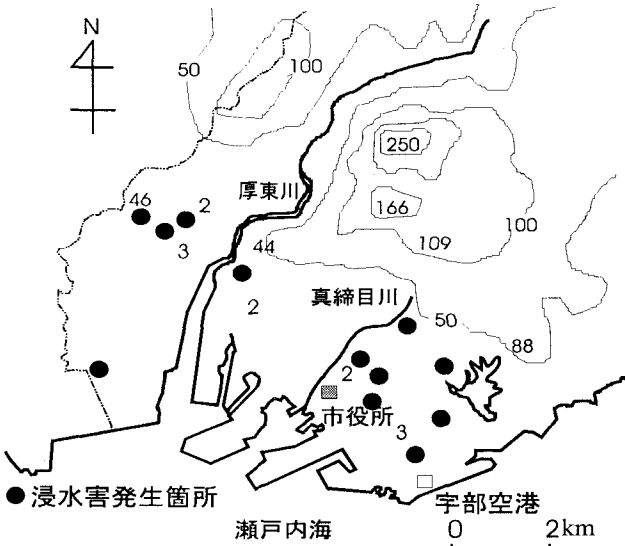


図-1 宇部市の概要図

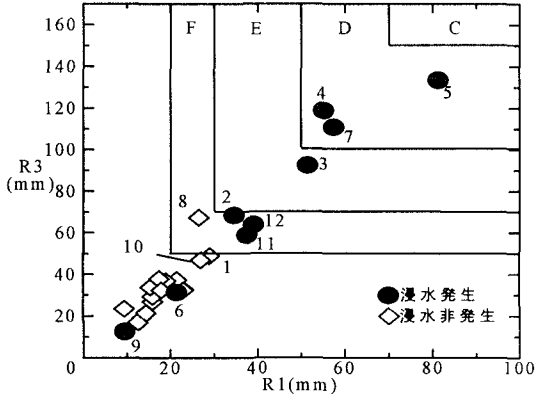


図-2 宇部市降雨の(R1, R3)分布

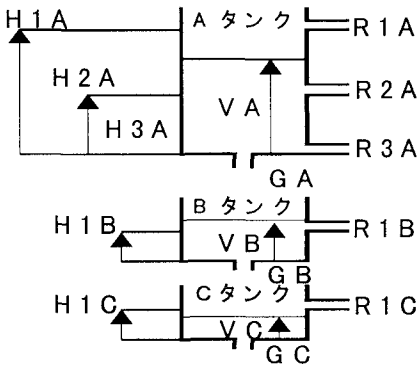


図-3 直列貯留型タンクモデル

気象台山口宇部空港出張所のものである。解析は、宇部市で1994年から1998年で浸水害が発生した日などの雨量の多い25例により行う。特に特徴的な降雨のデータを表-1に示す。表にはそれぞれの番号の降雨の日付け、最大10分雨量(R10)、最大1時間雨量(R60)、最大3時間雨量(R180)、浸水家屋が発生した軒数、豪雨をもたらした降雨システムを示している。1994年から1998年において最大10分雨量(R10)の最大値は1997年7月9日の24mm、最大一時間雨量(R60)と最大三時間雨量(R180)の最大値はともに1995年9月24日の81.3mmと133.5mmである。

いずれの場合も浸水被害は起きている。表中の*は、1日に2つの一雨があった場合で1995年7月2日の5時から雨(*), 1995年7月2日の19時から雨(**)という意味である。

気象庁が定めた豪雨階級基準⁹⁾は最大一時間雨量と最大三時間雨量により決められている。解析で使用する降雨を豪雨階級基準により浸水害発生、非発生の検討を行うと、Fランク以上になると浸水害の可能性が高いと判断できる。(図-2)

(2) 解析方法

本研究で使用するタンクモデルは、直列貯留型タンクモデルで、構造は三段タンクである。流出孔は一段目(Aタンク)で3個、二段目(Bタンク)に1個、三段目(Cタンク)に1個とした(図-3)。タンクモデルの解析では観測雨量と観測流量のデータがあると、計算流量と観測流量が合うようにタンクモデルのパラメータを決定されるが、宇部市においては浸水発生地域の観測流量がなかったので通常の解析はできなかった。

本研究では、都市部の内水氾濫という豪雨時に河川に流れきれないで流域に溜まっている水のことを考えている。よって、河川の流出解析の時には入力

表-2 決定された浸水解析用タンクパラメータ

H1A	60	R1A	0.2	GA	0.1
H2A	30	R2A	0.15		
H3A	5	R3A	0.2		
H1B	10	R1B	0.18	GB	0.04
H1C	5	R1C	0.05	GC	0.03

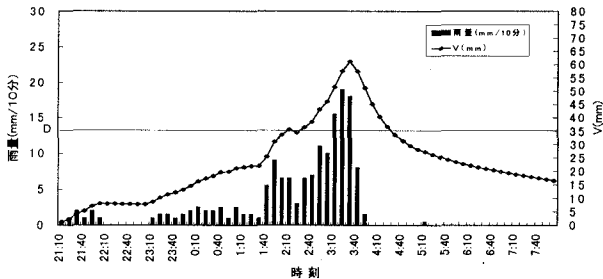


図-4-1 1995年9月24日（浸水害発生）

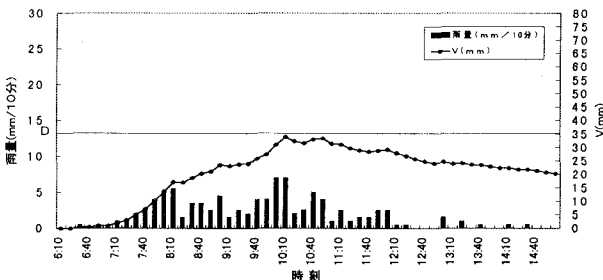


図-4-2 1997年5月8日（浸水害非発生）

と出力を（雨量）→（流量）としたのを今回の浸水解析では（雨量）→（水位）→（浸水発生，非発生）とする。タンクの流出孔からは，河川，海，湖，などに流れるものとし，浸透孔からは地下浸透に流れていくものとイメージしてタンクモデルを考えた。解析時間単位は10分である。10分雨量は雨の降り方を細かく表しているので急速な水位の変化を表すのに適している。

浸水害は，流域に溜まる水と想定されるタンク内残留量が限界を超えると起こると考えられ，本研究では様々な組み合わせによる解析の結果タンク A，B，C の残留量の合計値 $V(\text{mm})$ が実際の水位と対応していると判断した。

$$V = VA + VB + VC \quad (1)$$

三段タンクモデルは地表面付近の水環境を表していると考え，各タンクの初期残留量は0で始める。都市浸水害は地表面の水の動きが影響していると考えられるので V の中には地下水貯留分は考慮されない。詳しいタンクモデルの計算過程は菅原の流出解析法³⁾もしくは阿部，塩月^{1),2)}を参照いただきたい。

(3) 解析結果

解析においてタンクパラメータは，過去の10分単位におけるタンクモデルのパラメータを参考にし浸水害発生，非発生が判断されるようタンクパラメータを試行錯誤に計算することにより得られる。解析

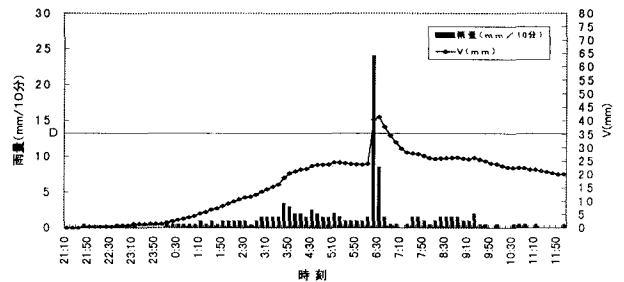


図-4-3 1997年9月7日（浸水害発生）

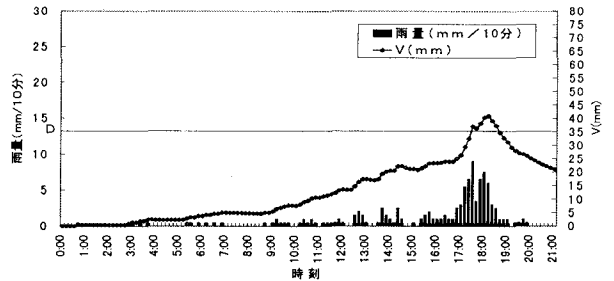


図-4-4 1998年10月17日（浸水害発生）

の結果，浸水発生限界（Dライン）を $V=35(\text{mm})$ と設定することにより浸水害発生，非発生を精度よく判別することができ，タンクパラメータは表-2のようになった。また，本手法は，同規模の山口県下の都市においてDライン35ミリを固定してパラメータを調整した場合とパラメータを固定してDラインを変化させることにより適応可能となり汎用性が確かめられている²⁾。

図-4-1は1995年9月24日に浸水害発生が発生したときの解析図である。横軸は時間，縦軸は左に雨量の目盛りを，右に水位 V の目盛りを示した。10分雨量は棒グラフで，計算により得られた水位は実線で示している。図-4-1より水位はDラインを超えている。図-4-2は1997年5月8日に浸水害が発生していないときの解析図である。水位はDラインを超えていない。図-4-3は1997年9月7日に浸水害が発生したときの解析図である。水位はDラインを超えている。図-4-4は1998年10月17日に浸水害発生が発生したときの解析図である。水位はDラインを超えている。このようにDラインを境に浸水害発生，非発生が判断される。分母をデータ数，分子をタンクモデルによる解析のDラインで判別可能だったものとする，浸水害の発生が7/9，非発生16/16，全体で23/25の判別結果となった。

3. 計画降雨を浸水害発生予測タンクモデルに入力したとき

(1) 降雨強度公式

一雨の降り始めからの10分雨量の時間変化が図-5の通りであったとする。r1がピーク10分雨量であり，その前後に大きさ順に2，3，4番目の10分雨量がも

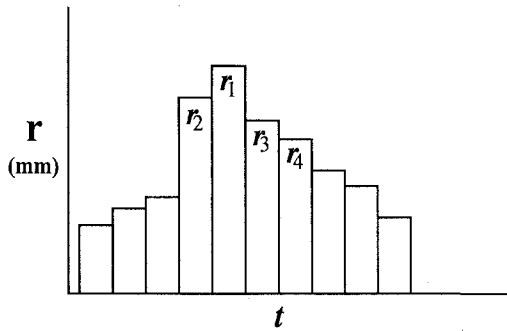


図-5 観測10分雨量

たらされたとする．一雨での最大10分雨量（R10）は r_1 mmとなり，最大20分雨量（R20）は (r_1+r_2) mm，最大30分雨量（R30）は $(r_1+r_2+r_3)$ mm，最大40分雨量（R40）は $(r_1+r_2+r_3+r_4)$ mmとなる．それぞれを雨量強度値（mm/hr）になおし横軸に降雨継続時間 T （min）をとって，R10，R20，R30，R40と並びかえたのが図-6(a)であり降雨強度曲線（ R_T 曲線）と呼ばれている．例えばタルボット式の場合以下の(1)式のようなになる

$$R_T = \frac{a}{T+b} \quad (1)$$

（ R_T ；mm/hr， T ；min， a, b はパラメータ）

雨水排水路（分流式）のときの計画降雨を求めるための降雨強度公式については，宇部市の場合10年確率のタルボット型で以下の式のようにになっている．

$$\text{降雨強度公式(10年確率)} \quad R_T = \frac{4,675}{T+25} \quad (2)$$

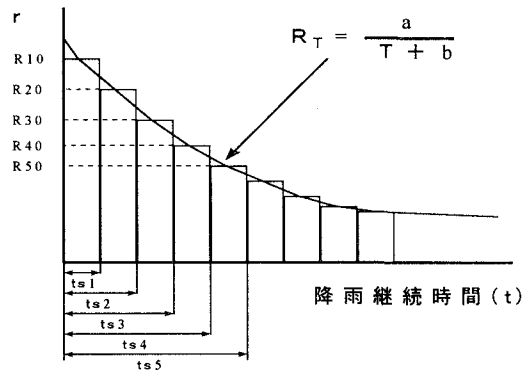
尚，上式の時間降雨量を求めると55.0mm/hrとなる．

(2) 計画降雨波形No1の作成について

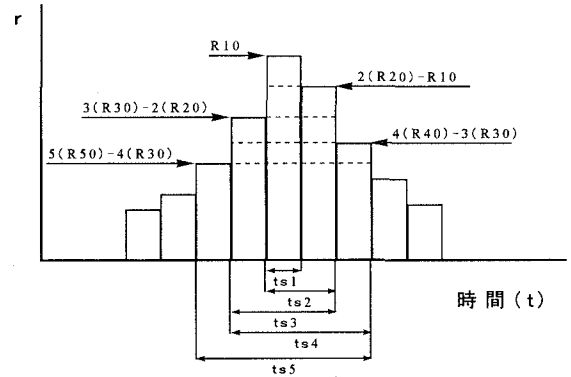
計画降雨波形の降雨継続時間は24時間とし，降雨のピークは中央集中型と仮定する．図-6(b)に示すように降雨継続時間の中心を原点とし，ここに降雨のピークをとる．そして，雨の降り始めからピークまでとピークから降り終わりまでの時間について，降雨継続時間毎に強度を決めるもので，図-6(b)中の計算式のようにいずれの継続時間に対しても，平均降雨強度曲線の値を満足するように定める．主にこの方法で雨水排水路などの設計のとき，流達時間を降雨継続時間として合理式によりピーク流量の計算を行う．本論文で用いてるタンクモデルは10分単位で計算しているのでハイトグラフは10分間隔に作成し，その結果ハイトグラフは図-7の棒グラフのようになった．

(3) 計画降雨波形No1をタンクに入力したとき

(2)で求めたハイトグラフを2章で決定したタンクモデルに入力した．結果は図-7の実線のようになり水位のピークは39.3mmとなった．これは計画降雨が現状より高く設定されていると考えられる．



(a) 降雨強度曲線



(b) ハイトグラフ

図-6 中央集中形ハイトグラフの作り方

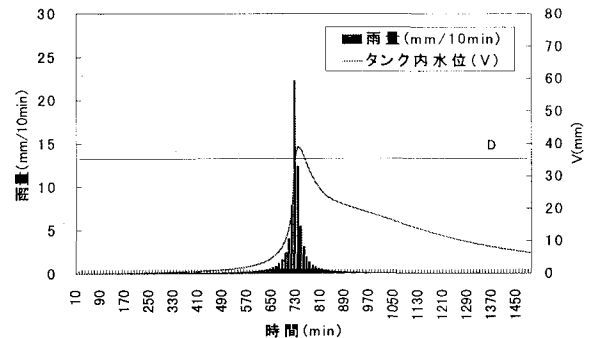


図-7 計画降雨波形No1による解析結果

(4) 計画降雨波形No2の作成について

(1)式より図-5の r_1, r_2, r_3, r_4 に相当する10分雨量の大きさの順の値（mm単位）は次式で再現できる．但し n は自然数，

$$r(n) = \frac{n \times 10}{60} R_{n \times 10} - \frac{(n \times 10 - 10)}{60} R_{n \times 10 - 10} \\ = \frac{n \times 10}{60} \times \frac{a}{(n \times 10) + b} - \frac{(n \times 10 - 10)}{60} \times \frac{a}{(n \times 10 - 10) + b} \quad (2)$$

R_T 曲線から直接得られるものはここまでで， $r(1), r(2), r(3), r(4) \dots$ が図-5の， r_1, r_2, r_3, r_4 のように，どのように配列されているかはわからない．しかし，ピークの発生時点，降り始めから任意時点までの雨量データがあれば，降雨全体の時間的な変化曲線を推定することができる．再現された図-6(b)に相当するものはハイトグラフ（連続降雨曲線）と呼ばれている．ハイトグラフの詳しい作成方法については水文学の教科書（例えば岩井・

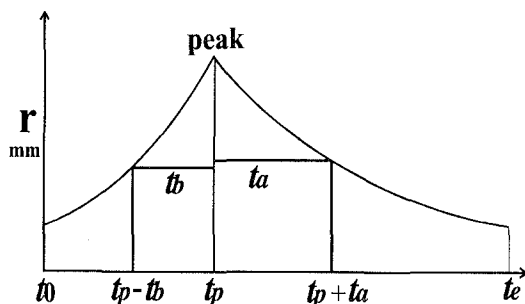


図-8 本文参照

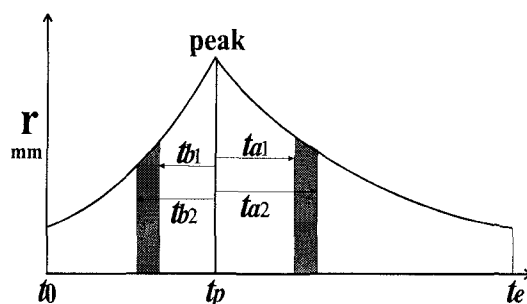


図-9 本文参照

石黒, 1970) を参照されたい. ここでは R_T 曲線のパラメータ a, b , ピーク発生位置がわかっている時の計算式だけを紹介するとともに、図-8のように、降雨開始時刻を t_0 , 降雨終了時刻を t_e , ピーク発生時刻を t_p とする.

$$m = \frac{t_p - t_0}{t_e - t_0} \quad (3)$$

とおく. ピーク時から t_b 分以前の時刻 $t_p - t_b$ における雨量強度を $r(t_p - t_b)$ とする. ピーク時から t_a 分以降の時刻 $t_p + t_a$ における雨量強度 $r(t_p + t_a)$ とする. いま (1) 式を使って (2) 式を一般化すると次のようになる. ピーク雨量時を中心とした前後 T 分 $\sim T + dT$ 分の間の降雨強度は

$$r(T) = \frac{d}{dT} (T \times R_T) = \frac{ab}{(T + b)^2} \quad (2)'$$

となる. T の代わりに (3) 式を使うと,

$$r(t_p - t_b) = \frac{ab}{\{(t_b / m) + b\}^2} \quad (4)$$

$$r(t_p + t_a) = \frac{ab}{\{(t_a / (1 - m)) + b\}^2} \quad (5)$$

となる. (4) 式はピーク時を原点として, t_b 分さかのぼった時点での雨量強度値, (5) 式は t_a 分経過した時点での雨量強度値を与える. (4) 式, (5) 式を積分すると, 図-9 ようにピーク時から t_{b2} , t_{b1} 分さかのぼった時点の積算雨量 $r|_{t_{b2}}^{t_{b1}}$, ピーク時から t_{a1} , t_{a2} 分経過した時点間の積算雨量 $r|_{t_{a1}}^{t_{a2}}$ はそれぞれ,

$$r|_{t_{b2}}^{t_{b1}} = abm^2 \left(\frac{1}{t_{b1} + bm} - \frac{1}{t_{b2} + bm} \right) \quad (6)$$

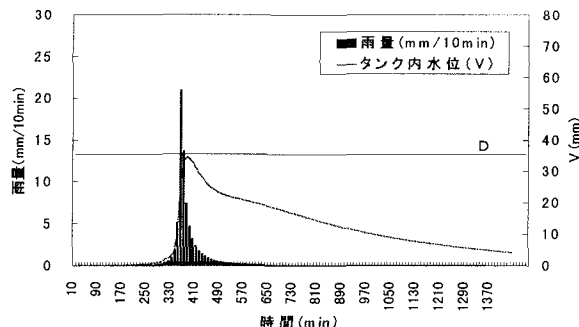
$$r|_{t_{a1}}^{t_{a2}} = ab(1 - m)^2 \left(\frac{1}{t_{a1} + b(1 - m)} - \frac{1}{t_{a2} + b(1 - m)} \right) \quad (7)$$

(mm/hr)

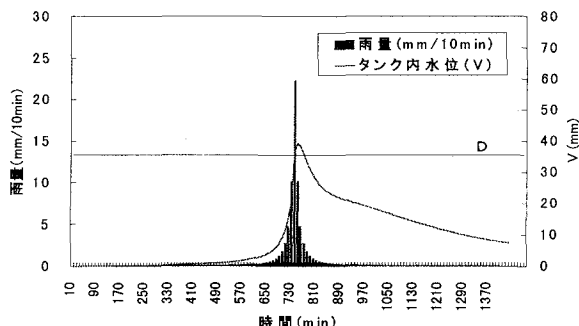
で表される. m でピーク発生位置を与え, $t_{b2} - t_{b1} = t_{a2} - t_{a1} = 10$ 分とすれば, R_T 曲線のパラメータ a, b より 10 分間の降雨強度が求められて, 10 分雨量のハイトグラフを作成できる.

(5) 計画降雨波形No2をタンクに入力したとき

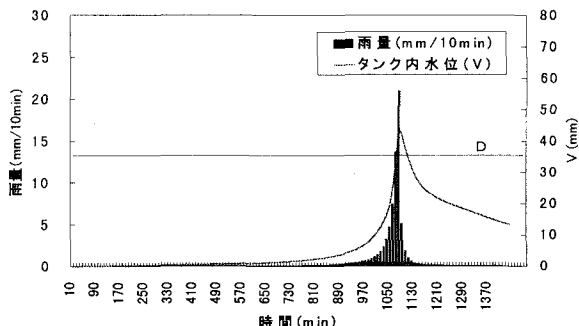
同じ降雨強度でも降雨のピークの発生位置を変化させて, タンクモデルに入力すると, 水位がど



(a) $m=0.25$ のとき



(b) $m=0.5$ のとき



(c) $m=0.75$ のとき

図-10 計画降雨波形No2による解析結果

のような値を示すか検討を行う. 検討を行うケースは, ピークが前方にある場合 ($m=0.25$ のとき), ピークが中央にある場合 ($m=0.5$ のとき), ピークが後方にある場合 ($m=0.75$ のとき) の 3 ケースである.

(a) $m=0.25$ のとき

図-11 (a) は計画降雨波形の雨のピークが前方に来たときの解析結果である. 水位は 34.6mm のところに来ている.

(b) $m=0.5$ のとき

図-11 (b) は計画降雨波形の雨のピークが中央

に來たときの解析結果である。水位は39.3mmとなった。

この時は中央集中型である計画降雨波形No1とほぼ同じ結果となっている。

(c) $m=0.75$ のとき

図-11 (c) は計画降雨波形の雨のピークが後方に來たときの解析結果である。水位は44.3mmまで達している。

(6) 計画降雨の浸水害発生に関する検討

宇部市では排水路の設計のとき計画降雨を中央集中型とし流量の計算がなされている。本研究では降雨強度式より10分単位の計画降雨は計を作成し、浸水害発生予測タンクモデルに入力した。計画降雨波形No1の方法でを入力すると、宇部市において過去の災害より得られた浸水発生限界Dライン35mmより大きい値39.3mmを示した。計画降雨が現状の災害の危険ラインより高く設定されていると考えられる。このことは、計画降雨波形No2で降雨のピークが中心にくる $m=0.5$ のときでも同じ結果が得られた。

図-11より降雨強度が同じでも雨のピークの位置が前のとき ($m=0.25$ のとき) が $V=35.5\text{mm}$ 、中央のとき ($m=0.5$ のとき) が $V=39.3\text{mm}$ 、後ろのとき ($m=0.75$ のとき) が $V=43.0\text{mm}$ とピークの位置が遅れるほど水位が上昇している。このことは、同じ降雨強度の雨でも降雨のピークが後ろに行くほど、水位のピークが大きくなることを示している。

4. 解析結果のまとめと考察

宇部市において決めた浸水害発生予測解析タンクモデルに下水道の雨水排水路計画に使用されている計画降雨を入力すると中央集中型のとき $V=39.3\text{mm}$ となり、既往の研究で得られた宇部市の浸水発生限界Dライン35mmより大きい値が得られた。これは計画降雨が現状の災害の危険ラインより高く設定されていると考えられる。計画降雨波形と同じ雨が降ったらDラインが35mmである宇部市では浸水害発生の可能性があるかと判断できる。過去の災害例から決めたDライン(35mm)と計画降雨による水位(39.3mm)に差があることは以下の点が考えられる。

- 1) 計画降雨では雨は一雨で計算されるが、実際は前の雨の影響や連続して雨が降ったりと様々なので、雨の降り方により流域に水が溜まってしまい浸水害が発生した。
- 2) 排水路にゴミや木などが溜まっていたため、通水能力が減少したために浸水害が発生した。
- 3) 雨水排水路の整備は年々行われているが、一度に全部行うことは不可能なので、まだ完全に整備が終わっていないために、計画降雨だけの雨が流せずに浸水害が発生した。
- 4) 宇部市を流れる真締目川、厚東川は感潮河川で

満潮時には水位がかなり高くなりポンプによる排水だけでは追いつかず浸水害が発生した。

このように排水路が年々整備されたり、雨や流出が自然現象であるために、そのときそのときに違う状況を作り出すので、Dラインより計画降雨による水位の方が大きいという結果が得られたのだと考えられる。

3. (4) において計画降雨のピーク位置について前方 ($m=0.25$ のとき)、中央 ($m=0.5$ のとき)、後方 ($m=0.75$ のとき) についての検討を行った。計画降雨において同じ降雨強度のとき降雨のピーク位置が後方に行くほど水位のピークが上昇することが示された。

実際の降雨を入れた解析結果を見ると図-4-3のようにある程度雨が降ったあとに突然10分雨量が20mm以上の雨が降りそのときDラインを超えたものや、図-4-4ではゆっくり降って徐々に雨が強くなったりと様々である。実際の防災対策としては浸水害が発生するまでにどれだけ雨が降っているか、今どのような雨が降っているか注意し水位がどのくらいまで来ているか現状を把握しておくことが重要であると考えられる。

5. おわりに

これまで都市低地部で頻繁に起きている浸水害を、過去の浸水害の発生、非発生をもとにタンクモデルにより都市の浸水害発生予測を行ってきた。今回地域の計画降雨をそのタンクモデルに入力することにより現状と計画との差が見られた。このように本論の方法により地域の浸水害に対する現状を把握できるのではないかと考えられる。また、今後の課題として、どんな対策がこの差を効果的に縮めることができるか研究を進めていきたい。

謝辞：データ収集の際、宇部市役所下水道課 庶務課防災室、下関地方気象台山口宇部空港出張所の方々の協力を頂きました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 阿部清明、芝崎一也、塩月善晴：タンクモデルによる都市浸水発生予測、土木学会論文集、No. 600 / II-44, pp.1~10, 1998.
- 2) 阿部清明、塩月善晴：山口県の都市浸水害発生予測に関する研究、土木学会論文集、No. 628 / II-48, pp.55~64, 1999.
- 3) 菅原正巳：流出解析法、共立出版、p. 257, 1972
- 4) 越智彊：昭和47年の7月豪雨の特徴と過去の集中豪雨との比較について、気象研究ノート、No.117, pp.153~162, 1973
- 5) 塩月善晴：ハイエトグラフを利用した短時間雨量予測法の試み、天気、36, pp. 449~459, 1989
- 6) 岩井重久、石黒政儀：応用水文統計学、森北出版、1970

(1999. 9. 30受付)