

ISSN 0386-5878
土研資料 第1922号

氾濫シミュレーション

—氾濫原の合理的な土地利用を目指して—
治水研究〔5〕

昭和58年2月

建設省土木研究所
河川部総合治水研究室

ま え が き

河川行政に何が求められているか。これは、先達の河川技術者が絶えず模索し続けてきた命題であり、社会状況の変化した今日においても、議論されねばならない課題であろう。

治水と言えば、ダム・堤防と反射的に連想する様に、現在までの治水対策は、とかく自然の持つ破壊力に対する人間の抵抗力の増強策であった。しかし、自然の脅威は想像以上に強大なものであり、昨今は、自然に対して「剛」の姿勢だけでは対処しきれないといった思想の転換期を迎えている。所謂、ソフトな防災対策とでも言おうか、構造物以外のものによる治水対策が研究され始めてきた。

氾濫シミュレーションは、この様なソフトな防災対策へアプローチする手法であり、氾濫現象を再現する方法としては、模型実験に比べて汎用性が高く、航空写真による氾濫現象の解析に比べて身近に操作できるという利点を有している。

本稿では、この様な利点を有する氾濫シミュレーションモデルの内容を紹介するにあたり、その内容・目的・問題点を網羅し、更に小貝川をケース・スタディの対象として、氾濫解析を行なった。

最後に、本論文が、今後のモデルの発展・改良に役立つと共に、実践的な防災対策への礎となれば、幸いである。

昭和 58 年 2 月

建設省土木研究所

総合治水研究室長 山 本 晃 一

目 次

ま え が き	
第1章 氾濫シミュレーションの位置付け	1
第2章 氾濫シミュレーションの目的	5
2-1 洪水被害の軽減にあたって	5
2-2 土地利用規制	6
2-3 治水投資の経済効果	8
2-4 水防活動	8
2-5 建築物の耐水化のための基準	11
第3章 氾濫シミュレーションモデルの特徴	12
3-1 1次元モデル	12
3-2 2次元モデル(平面タンクモデル)	12
3-3 その他のモデル	13
第4章 氾濫シミュレーションモデルの問題点とその検討	14
4-1 1次元モデルの問題点とその検討	14
4-2 2次元モデルの問題点とその検討	14
第5章 ケース・スタディ	19
5-1 小貝川(利根川支川)の概要	19
5-2 1981年8月洪水	19
5-3 シミュレーションモデルの適用	25
5-4 計算結果と考察	25
5-5 今後の課題	26
あ と が き	33
参 考 文 献	34
参 考 資 料	35
1. 航空写真による氾濫流解析	37
2. 氾濫原情報の整理手順	44

図・表リスト

図- 1. 洪水被害の変遷	4
2. 被害密度の変遷	4
3. 洪水被害の拡大要因	6
4. 流量係数と h/L との関係	16
5. 堤体形状の諸元	17
6. 小貝川・利根川流域図	20
7. 小貝川流域の人口動態	22
8. 台風15号の経路図	22
9. 氾濫原分割図	23
10. タンク境界特性	24
11～15. 浸水深の時間的变化	28
表- 1. 氾濫予測手法	2
2. 浸水実績図公表河川	9
3. 既往氾濫シミュレーションモデル	18
4. 小貝川水害年表	21

第1章 氾濫シミュレーションの位置付け

「災害は進化する」という字句に代表される様に、最近では河川改修事業の進捗により、水害による死者・行方不明者数、浸水面積は横ばいの傾向にある(図-1参照)にも拘らず、流域の高度利用、人工的地形改変、地覆の整備等によって、新たな災害が発生してきており、水害による被害密度(=一般資産等被害額/浸水面積)は、むしろ増加傾向にあることが伺える(図-2参照)¹⁾。

洪水による被害を軽減する為には、河道に関しては、河道内を整備し、連続堤を完成させ、安定した水の流れを維持するのと並行して、流域に関しては、内水排除用の排水システム(排水路・揚水機場)を建設する事が要件である事は言うまでもない。しかし、日本の様に河道ネットワークが高密度かつ急峻で、流域人口密度が世界平均の10倍もある過密化を伴う場合、主要河川だけを完全に整備するにも、まだ相当の歳月・コストを要する為、河川が氾濫した状況を想定して、それに対する対応策を樹てておく必要があると思われる。そうした氾濫現象を予測する一手法が氾濫シミュレーションである。

従来、氾濫予測の手法としては、大別して

- ① 現地水害調査による洪水危険区域の把握
- ② 既往の氾濫実績・地形・地質等から氾濫流況を類推する方法
- ③ 水理模型実験

の3通りがあり、それらの中にも、更に種々の手法がある。各氾濫予測手法(①、②)の概要・問題点を一覧表にしたのが、表-1²⁾である。その他、洪水危険地図には

- ・ 利根川、荒川洪水状況図……………地理調査所発行
- ・ 沿岸海域土地条件図……………国土地理院 "
- ・ 浸水危険図、浸水頻度図……………東京都 "

などがある。

これらの予測手法に対して、氾濫シミュレーションは、河道情報・流域の地形情報・降雨情報等をデータとしてインプットして、予め想定した氾濫モデルを使った計算により、氾濫水理諸量(浸水深・浸水範囲・氾濫流向)をアウトプットするものである。

シミュレーションは、モデル・定数の変更が容易で、再現計算に非常に有利である。現在、使われているシミュレーションは、適合性が良い事が利点とされているが、適合性を追求する余り、数学モデルが複雑化し、また、不確定要素が入り込む為に、実際の現象のメカニズムから乖離して信頼性が損なわれる場合がある。しかし、数値実験に依る定量解析は、1950年前半の高速コンピューターの出現により開始され⁴⁾まだ歴史が浅く、モデル・パラメータ・係数に改良の余地が残されており、今後共、更に改良・発展する可能性を秘めていると言えよう。

表-1. 氾 濫

	タ イ ト ル	機 関	概 要
現 地 水 害 調 査 に よ る 洪 水 危 険 区 域 の 把 握	濃尾平野南部の洪水・被害状況図及び洪水型	地理調査所 ($S=1/5$ 万)	伊勢湾台風($S. 34$)による洪水を対象として氾濫流況・浸水時間・最大湛水深・高潮到達限界を調査したもの。
	浸水実績図	建 設 省 ($S=1/5$ 万) (or $1/2.5$ 万)	主要出水により浸水した区域を航空写真・聞き込み等により調査作成したもの。 (昭和57年12月1日現在, 53河川について公表)
	洪水氾濫予想区域図	東 京 都 建 設 省 ($S=1/2.5$ 万)	他の洪水危険地図とは手法が異なり, 流量を合理式から計算し, これに対応した河道水位を等流計算によって算出し, これと等しい地盤高を有する地点まで浸水するとして作図する。氾濫が予想される場合は, 貯留計算により流量を低減させる。
既 往 の 氾 濫 実 績 ・ 地 形 ・ 地 質 等 を 類 推 す る 方 法	水害地形分類図 ⁴⁾	科学技術庁 資源調査会 ($S=1/5$ 万)	G.H.Q. 天然資源局の勧告で設立された資源調査会が, 木曽川下流の濃尾平野水害地形分類図($S. 31$)を作成したのが始まり。地形要素と洪水危険区域とが対応することに鑑み, 流域を扇状地・デルタ・旧河道……に分類した地形図で, 日本の大河川(木曾, 筑後, 石狩川)・東南アジアの河川(メコン, ジャムナ川)などについて作成されている。
	土地条件図	国土地理院 ($S=1/1$ 万) (or $1/2.5$ 万) (or $1/5$ 万)	伊勢湾台風($S. 34$)を契機として, 作成され始めた洪水危険図で, 航空写真・現地聞込を基にして, 主要出水に伴う浸水図の他, 地形分類・河川状態・地盤高の変動・崖崩れ危険地域を記入したもの。
	治水地形分類図	国土地理院 ($S=1/2.5$ 万)	長良川決潰($S. 51$)を契機として, 直轄河川について調査が進められ, 主に河川工事の基礎資料, 即ち, 河川堤防の立地する地盤条件の把握の他, 氾濫域の土地状況とその変化, 地盤高などを明らかにするべく作成された。

予 測 手 法

備	考
① 氾濫流況と微地形との相関性を認め、浸水域における地形調査の必要性を明らかにすると共に、空中写真による判読の有用性を示した。	
② 洪水型を扇状地・海岸平野・後背湿地……の10タイプに分類し、洪水・被害状況図では、湛水期間を9段階で図中に表示している。	
③ カスリーン台風の際にも、同様の実態調査（利根川・荒川洪水状況図）が行なわれた。	
① 土地利用の適正化、家屋の建築、緊急時の水防・避難の便に資するためのソフトな治水対策である。	
② 流域住民に対して、水害の危険性を視覚的に説得できる。	
③ 降雨状況、土地利用状況の変化に対応した浸水域が予測できない。	
④ 総合治水対策特定河川（11河川について公表）に加えて、都市河川全般について公表すべきである。	
① 降雨は、降雨強度30, 50, 75mm/hrの君島型（ $i = b/t^a + a$ ）を用い、降雨波形状は中央集中型とする。	
② 流量計算に合理式を使う為に、平坦で流域面積が小さい流域（遅滞時間が短い流域）に対象が限定される。	
③ 氾濫水位の低減を考慮できないので、最大氾濫区域を想定することになり、安全側の洪水危険表示ではあるが浸水域の時間的拡がり表現できない。	
① 24種類の地形要素に分けられ、特に、扇状地が詳細に分類されている。	
② 添付された報告書には、洪水氾濫の実態・解析だけでなく、河川改修と土地開発の歴史、地形発達史が記述され、水害が多面的に捉えられている。	
③ 内水氾濫発生場所・原因の予測、ならびに流域の三地域区分に利用できる。	
④ 地形要素に応じて、湛水しやすい地形、冠水しても排水良好な地形などに分類されており、水害の影響を受ける地域が視覚的に把握できる。	
⑤ 名古屋市南部では、洪水状況図と共に、建物に関する水防・土地利用規制に利用された。	
⑥ 氾濫流況は、地形図とも照らし合わせて、予測することが必要である。	
① 高潮に関して、高潮到達限界と地形との関係、湛水深、湛水日数が調査されており、ゼロメートルに位置する大都市、例えば、名古屋市では洪水危険区域の指定に利用された他、京浜地域、中川・荒川流域、大阪平野、京都など全国的に土地条件図が完成している。	
② 地形要素は46種類に分類されており、特に人工地形・変形地が詳細に分類されている。	
③ 地盤沈下の著しい地域などでは、地盤高の変動が激しい為、土地条件の変化状況を絶えず把握しておかねばならない。	
④ 土地条件は地形・地盤高・施設を三要素としているが、平野部における市街化の程度、山地部における土石流危険区域も表示することが望ましいと思われる。	
① 地形要素は49種類に分類されており、特に段丘・干拓地が詳細に分類されている。	
② 地形・河道に応じた排水機場の決定の他、種々の河川計画に利用され始めている。	
③ 流域単位としての特性、上中流域と下流域との関係の解析が可能となった。	
④ ダムの建設、農地・森林の開発によって水害形態が変化するので、開発に応じた分類図の修正が必要である。	

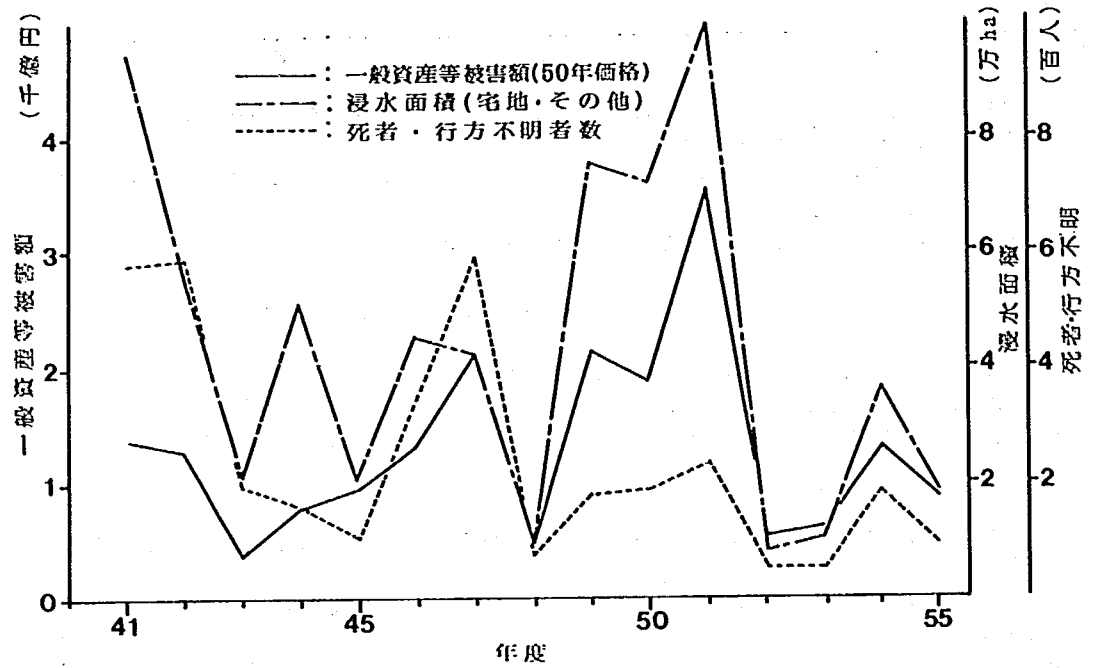


図-1 洪水被害の変遷

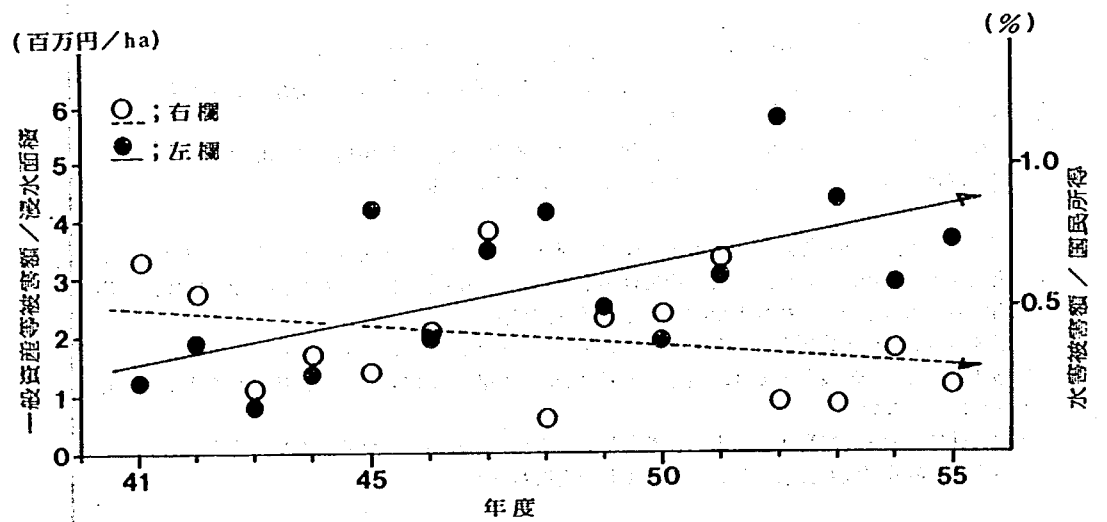
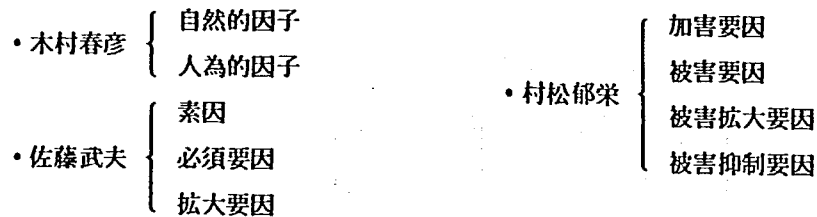


図-2 被害密度の変遷

第2章 氾濫シミュレーションの目的

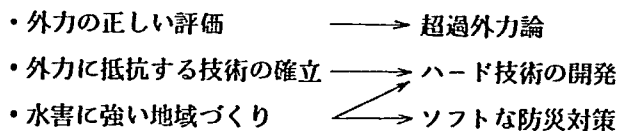
2-1 洪水被害の軽減にあたって

水害の発生要因を探ってみると、従来は以下に示す3パターンに分類されてきた。⁵⁾



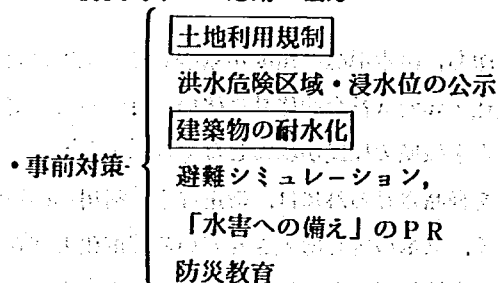
ここで、著者は氾濫シミュレーション手法の立場に立って、水害の発生プロセスより、要因を誘発要因・直接要因・拡大要因の3要因に分類することにする。誘発要因とは、インプットされたインパクトのことで、予想を超えた豪雨(外力)などを言う。直接要因とは、誘発要因に誘発された水害を発生させる契機のこと、堤防の決潰・地入り・崖崩れなどを言う。これらの要因に対して、最後に書いた拡大要因こそが、昨今水害形態に変化を与え、治水対策を複雑にしている最大の要因で、上流域の森林開発、洪水危険区域における宅地開発、堤内地における地覆の整備などのことを言っている。拡大要因の生起経路をフローチャートで示すと、図-3のようになる。

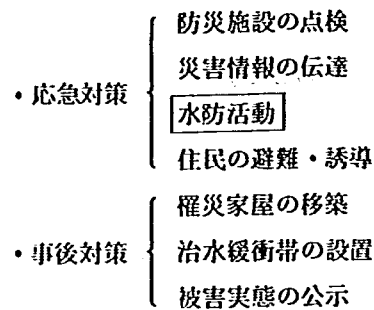
次に、拡大要因による洪水被害の軽減対策を考えると、



などが掲げられる。このうち、前二者の対策は、従来より研究されてきた確率統計論や工学論に準拠した対処の仕方である。一方、今後、積極的に推進されねばならない対策として、ソフトな防災対策がある。そして、ソフトな防災対策こそが、氾濫シミュレーションとタイ・アップして、洪水被害軽減の旗頭になることができる強い味方である。以下、個々のソフトな防災対策を箇条書きし、代表的なものについて、氾濫シミュレーションの活用のを考えてみる。

ソフトな防災対策への応用の仕方





※ 次項で個別論として説明する対策を で表わした。

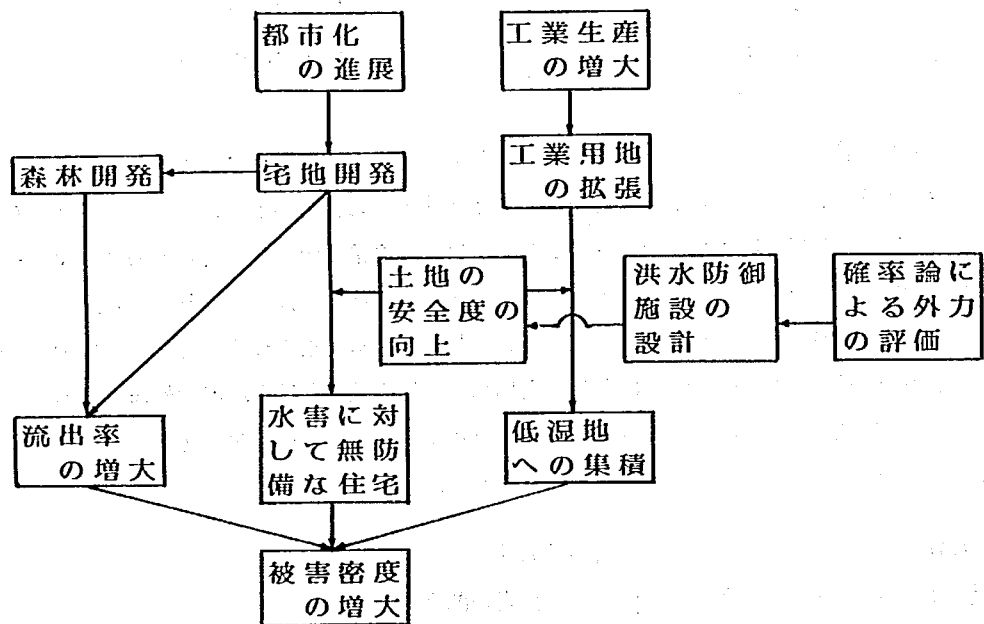


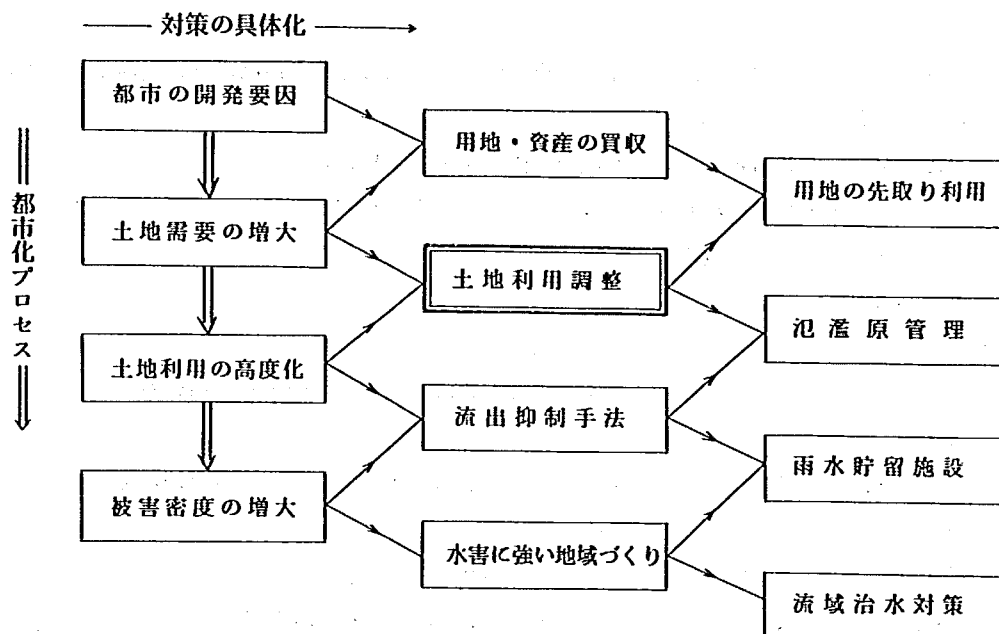
図-3 洪水被害の拡大要因

2-2 土地利用規制

水害による被害ポテンシャルが減少しないのは、何故であろうか。それは、次の2点に集約される。即ち、

- (1) 河川改修工事の結果、洪水氾濫の頻度が減少し、河川周辺域の土地利用が高度化するに伴い、氾濫を許容していた後背湿地へも宅地開発が進められるようになってきた。こうした絶えざる流域開発が、国土面積の1割にすぎない洪水想定氾濫区域に、人口の5割、資産の7割を集積させるという結果を招いた。
- (2) 水害に対する住民の意識が低下してきた。即ち、洪水氾濫の頻度が減少して、水害に対する危機意識が薄れてきたばかりでなく、核家族化・頻繁な社会的移動に伴い、生活を営んでいる土地が水害を受けやすい性格を有していることを流域の住民が認識しなくなってきた。

ことなどに起因している。換言すれば、洪水被害を軽減させる為には、適正な土地利用への誘導が必要条件になってきたことを意味している。ここで、洪水被害を増大させている都市化のプロセスとそれに対応した水害軽減対策のフローチャートで土地利用調整を位置付けると、次の様になる。



氾濫シミュレーションにより、氾濫水の拡散状況を把握し、洪水氾濫の影響範囲がゾーニングできれば、これを利用した治水計画・水防計画・流域土地利用計画が樹てられ、洪水危険区域における被害ポテンシャルを減少させることが可能となる。そのためには、水害の影響を考慮した法律^{※6)}を土地利用計画に十分反映させ、かつ、土地利用計画と治水事業計画とを整合させて、流域の秩序ある開発・保全に努めなければならない。

土地利用に関する法制度としては、憲法・国土利用計画法・都市計画法・土地区画整理法・建築基準法・都市再開発法……がある。

以下、土地利用の調整（誘導）に関連した法律として、国土総合開発法を取り上げ、そこに盛り込まれている土地利用基本計画について考えることにする。

～ 土地利用基本計画 ～

土地利用基本計画では、土地利用を政令により、都市・農業・森林・自然公園・自然保全の5地域に分類し、各々の地域に関して、開発・整備・保全の方針を決め、都市地域は、更に市街化区域・市街化調整区域に区分されている。

土地利用基本計画は、それまで個々の立場から土地利用を規制していた都市計画法・農地法・森林法に対して、国土総合開発法の土地利用基本法の趣旨に即して諸法が規定していた地域の指定を総合的に再調整したものである。即ち、土地取引規制・開発行為の規制・遊休地に関する措置等を実施するための体系的な基本計画となっている。

a) 土地取引規制

従来、土地の処分に関して、規制はあまり行なわれていなかったが、国土総合開発法により、許可制度（許可を受けずに行なった土地の売買契約は効力が生じない）が導入され、公有地の拡大に関する法律による従来の土地の先買い制度に対して、先買いの全国への適用という措置が取られる様になったことは、乱開発・土地ブームに伴う地価高騰・土地の投機といった当時の事情を鑑みれば

画期的な事である。

今後は、洪水危険区域に対して、浸水頻度・湛水時間等によって、3段階程度の危険度ランク付けを行ない、ランクに応じて、例えば

- | | | |
|---|--|--|
| { | ・ A ランク……非常に浸水頻度が高い（生起確率 $W=1/3$ ） | |
| | ・ B " ……時々、浸水する （ " $W=1/10$ ） | |
| | ・ C " ……あまり浸水しない （ " $W=1/30$ ） | |

A ランクの場合

宅地開発する際には、耐水性建築物を奨励する。

工場立地に際しては、なるべく盛土を避けると共に、敷地内に雨水貯留施設を設置する様に行政指導する。

ビルの建築に対しては、建ぺい率を小さく、容積率を大きく取って、雨水貯留のためのオープンスペースを確保させる。

等々の対策を講じて、適正な土地利用に導くことが必要であると同時に、治水事業計画との調整を計り、また、保水・遊水機能を保持しつつ、懸案となっている大都市周辺への宅地供給との調整も行なう必要がある。

b) 開発行為の規制

都市計画区域では、市街化区域内で大規模開発を行なう場合、また、市街化調整区域内では、種々の開発を行なう場合、都道府県知事の許可が必要であるが、更に洪水危険区域では、国土利用計画法第10条を強化して、関係行政機関の長に土地利用の権限を持たせると共に、そうした一連の開発行為を規制するだけでなく、一定規模以上の開発を行なう際には、それに付随して流出抑制対策を講じさせる必要がある。

2-3 治水投資の経済効果

現在の改修システムは、一定の計画規模を定めて、河川改修工事を実施することであり、諸施設は、如何なる洪水に対しても安全である訳ではない。一旦、予想を超えた超過外力が生起すると、氾濫原の土地利用が高度である為に、大惨事に波及する可能性が大きい。

従って、氾濫シミュレーションの結果と治水経済要綱を利用して算定された氾濫被害額と氾濫被害を減少させる為の河道改修事業、ならびに、氾濫原の土地利用による開発効果とを照らし合わせた費用便益分析によって、洪水被害を軽減するための最適な河道改修計画を策定することが可能となるであろう。

2-4 水防活動

現在、行なわれている水防活動をより積極的、より効率的な活動にするため、改善すべき点は、

- ・ 水防現場への交通路、資器材の運搬路の確保
- ・ 浸水時の避難路の確保
- ・ 公共施設を利用した避難所の指定

(避難計画の具体化)

などである。氾濫シミュレーションにより得られた氾濫流況・浸水深は、過去の浸水実態調査から推定され、現在53河川について公表されている浸水実績図⁷⁾(表-2)と同様に、洪水時において適切な水防活動を実施するのに役立つであろう。即ち、浸水程度の少ない交通路・避難所を明確にできる。

表-2 浸水実績図公表河川
(S57.12.1 現在)

河川名	都道府県	流域面積 (km ²)	対象洪水 (年・月)	公表日 年 月 日	備考
伏籠川	北海道	161.1	50. 8	57. 9. 1	総合治水
新川	北海道	182.0	56. 8	10. 1	
大野川	北海道	134.4	"	"	
土淵川	青森県	31.1	52. 8	9. 1	
七北田川	宮城県	199.3	51. 9	"	
草生津川	秋田県	18.6	54. 6	9. 30	
			56. 7	"	
新城川	秋田県	74.0	"		
藤原川	福島県	105.9	52. 9	10. 1	
			54. 10	"	
仁井田川	福島県	82.9	52. 9	"	
藤右衛門川	埼玉県	18.0	56. 10	9. 1	総合治水
新河岸川	埼玉県		33. 9	"	
	東京都	411.0	41. 6	"	"
中川・綾瀬川	埼玉県			"	
	東京都	986.7	33. 9	"	"
残堀川	東京都	34.7	41. 6	"	
			52. 8	"	"
鶴見川	東京都	235.0	41. 6	"	
	神奈川県		51. 9	"	"
引地川	神奈川県	67.0	41. 6	"	
			51. 9	"	"
境川	神奈川県	211.0	41. 6	"	
			49. 7	"	"
目久尻川	神奈川県	35.6	51. 9	"	
能代川	新潟県	141.4	42. 8	9. 24	
			53. 6	"	
鶴川	新潟県	108.7	"	"	
下条川	新潟県	34.4	39. 7	9. 1	
伏見川	石川県	56.2	49. 7	"	
四分川	山梨県	4.8	51. 9	10. 1	
			52. 8	"	
洪川	山梨県	7.9	52. 8	"	
境川	岐阜県	62.2	51. 9	9. 1	
水門川	岐阜県	21.0	"	"	
荒田川	岐阜県	19.4	"	"	総合治水
巴川	静岡県	104.8	49. 7	"	
新川	愛知県	259.0	"	"	
			51. 9	"	

河川名	都道府県	流域面積 (km ²)	対象洪水 (年・月)	公表日 年 月 日	備 考
猪 名 川	大阪府	383.0	28. 9	57. 9. 1	総合治水
新 湊 川	兵庫県		35. 8	"	
妙 法 寺 川	兵庫県		42. 7	12. 1	
千 森 川	兵庫県		"	"	
土 入 川	兵庫県		"	"	
和 歌 川	和歌山県	25.4	51. 9	10. 1	
亀ノ川	和歌山県	83.3	"	"	
		21.5	"	"	
狐 川	鳥取県	2.7	51. 9	9. 1	
			54. 10	"	
朝 酌 川	島根県	32.4	56. 6	9. 6	
平 田 船 川	島根県	49.1	"	"	
千 田 川	岡山県	48.6	47. 7	9. 1	
			51. 9	"	
砂 川	岡山県	120.8	"	"	
			54. 10	"	
千 野 川	岡山県	39.0	47. 7	"	
			51. 9	"	
相 引 川	香川県	10.3	"	"	
佐 賀 江 川	佐賀県	95.8	55. 8	"	
新 川	佐賀県	10.9	"	"	
巨 勢 川	佐賀県	33.0	"	"	
本 庄 江	佐賀県	25.2	"	"	
八 田 江	佐賀県	30.3	"	"	
佐 世 保 川	長崎県	14.7	"	"	
坪 井 川	熊本県	141.7	"	"	
住 吉 川	大分県	11.0	49. 9	"	
七 歩 川	大分県	3.9	"	"	
国 場 川	沖縄県	43.1	57. 6	"	
報 得 川	沖縄県	18.7	"	"	

以上 53 河 川

次に、氾濫実績から破堤ポイントが、又、治水地形分類図・水害地形分類図等から浸水を起こしやすいゾーンが推測できれば、逆に流域内の安全エリアが図示され、地域住民を安全に避難誘導することができるようになる。

※ 水害の影響を考慮した法律

制定年次	法 律
明治 2 9 年	旧河川法
3 0	砂防法
3 3	旧下水道法
昭和 2 2 年	国家賠償法
2 3	消防法
2 4	水防法, 水害予防組合法
2 6	森林法
2 7	気象業務法
3 1	旧砂利採取法
3 3	下水道法, 地すべり等防止法
3 5	治山治水緊急措置法
3 6	災害対策基本法, 宅地造成等規制法
3 9	河川法
4 3	砂利採取法
4 4	急傾斜地の崩壊による災害の防止に関する法律

2-5 建築物の耐水化のための基準

洪水防御に関する研究が進むと、其の一方で水害に対して安全だといった誤った感覚が生じ、水害に脆弱な建物が建てられる様になり、都市開発によって、その土地の有している抵抗力が弱まるのと相まって、ダメージ・ポテンシャルが増大することになる。

これに対して、建築基準法・都市計画法では、「出水のおそれの多い土地では、盛土・地盤改良・擁壁の設置などの必要な措置を取る」べきであると記載されている。これらの措置の具体的な指標となるものが、氾濫シミュレーションによって予測された最大浸水深であり、特に、現在各地で総合治水対策の一環として建設されているピロティ式建築物・防水ゲートなどの設置基準・費用算定基準として、大いに活用されるべきであろう。

第3章 氾濫シミュレーションモデルの特徴⁹⁾

3-1 1次元モデル

(a) 貯留型

従来から利用されていた解析手法で、輪中堤や堰などで囲まれた閉鎖流域に適用される。浸水面は、水平を保ったまま上下運動すると仮定しているため、基礎式には貯水池モデルの連続式を用いる。

<連続式>

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta V}{\Delta H} \frac{\Delta H}{\Delta t} = F(H) \frac{\Delta H}{\Delta t} = Q_{in} - Q_{out}$$

ただし、 $F(H)$: 任意水深に対する水表面積

Q_{in} : 流域への流入量

Q_{out} : 流域からの流出量

(b) 流下型(谷底平野型)

氾濫原を河道と分離せずに、氾濫原の流れも河道と同様の一方向性の流れとして取り扱うモデルで、谷底平野を流れる河川流域などに適用される。

基礎式は、連続式と運動方程式とから構成され、運動方程式には、等流または不等流計算式を用いる。

3-2 2次元モデル(平面タンクモデル)

氾濫原に多数のタンクを置き、タンク同士の境界特性(越流・直結など)で地形特性を表現するもので、タンクからタンクへの氾濫水の伝播現象で、氾濫流況を代表させる手法である。

(a) 管路型⁹⁾

1次元モデルと違って、流況の平面的な拡がり、ならびにその時間的な変化が把握でき、現象を視覚的に理解できる、また、計算が簡便なうえ、地形特性を厳密に反映できる。

<連続式>

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = F(H) \frac{\Delta H}{\Delta t} = \sum Q_i + Q_{in}$$

<運動式>

$$\frac{L}{gA} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = -\Delta H - \Delta S - L\alpha |Q|Q$$

ただし、 Q_i : タンク境界流量

Q_{in} : 横流入量

L : タンク中心間距離

A : タンク境界の通水断面積

S : 流域の地盤高

$$\alpha \doteq n^2(h^{10/3} \cdot b^2)$$

(b) 開水路型

概略的には、管路型と同じであるが、管路型と比較して地形条件のモデルへの組み込みが容易で、タンク間を開水路・越流堤・樋門などで結合（重複可）して、シミュレートを行なうものである。氾濫流の水位や流速変化が緩慢であれば、取扱いは管路型と同様のものとなる。

<連続式>

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = F(H) \frac{\Delta H}{\Delta t} = \sum Q_i + Q_{in}$$

<運動式>

$$\frac{L}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t} = -\Delta H - \Delta S - L \frac{n^2 |v'| v}{h^{4/3}}$$

3-3 その他のモデル

(a) 3次元モデル

基礎式として、厳密な3次元非定常流式を用いるので、氾濫流況を忠実に再現できるが、解析するのが非常に困難である。基礎式としては、連続式にオイラー式、運動方程式にナビヤ・ストークス方程式を使う。

<連続式>

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} + \frac{\Delta v}{\Delta y} + \frac{\Delta w}{\Delta z} = 0$$

<運動式>

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} + u \frac{\Delta u}{\Delta x} + v \frac{\Delta u}{\Delta y} + w \frac{\Delta u}{\Delta z} = -\frac{\Delta}{\Delta x} \left(Q + \frac{P}{\rho} \right)$$

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} + u \frac{\Delta v}{\Delta x} + v \frac{\Delta v}{\Delta y} + w \frac{\Delta v}{\Delta z} = -\frac{\Delta}{\Delta y} \left(Q + \frac{P}{\rho} \right)$$

$$\frac{\Delta w}{\Delta t} + u \frac{\Delta w}{\Delta x} + v \frac{\Delta w}{\Delta y} + w \frac{\Delta w}{\Delta z} = -\frac{\Delta}{\Delta z} \left(Q + \frac{P}{\rho} \right)$$

ただし、 $Q = g z_*$

z_* : 基準面からの高さ

(b) 水理模型実験

数値解析手法には、種々の仮定・モデル・パラメータが含まれているので、氾濫メカニズムが現象の再現に反映されない恐れがある。従って、水理模型実験を行なうことにより、複雑な地形には対応できないが、簡単な条件下での氾濫現象を把握でき、拡散状況を一般化した実験式を作ることができる。

第4章 氾濫シミュレーションモデルの問題点とその検討

本章ではモデルの概要を受けて、既往の氾濫計算の問題点を探り、その改善策を提示すると共に2次元モデルでは、この計算にあたってのガイドラインを示すことにする。

4-1 1次元モデルの問題点とその検討

(a) 貯留型

貯留型モデルの問題点は

- ・適用される流域が、輪中堤や堰で囲まれた閉鎖流域に限定される。
- ・流域の地形特性が反映できず、氾濫水位が一様になる。
- ・水表面積を水深の関数で表現しなければならない。

ので、流域の地形が複雑で勾配が大きい場合には、氾濫水位の低減を表現できない、また、任意水深の水表面積を内挿法で計算して大きな誤差がでない程度に、氾濫域における地盤の起伏（ $H-F$ 曲線）を詳細に調査する必要がある……等々の難点がある。シミュレーションは、最大氾濫区域を想定し一応安全側の結果が得られる。

(b) 流下型

流下型では、氾濫原と河道を一方方向の流れとして取扱っている為、運動方程式の粗度には合成粗度を採用しなければならない。合成粗度係数の算定には、アインシュタインの式とロッターの式の2通りがある。アインシュタインの式は、実用上成り立つ事が足立¹⁰⁾によって研究されているが、分割した断面の流速が等しいという仮定で粗度係数を算定する為、河道と比較して通水幅の広い氾濫原では、厳密には仮定が成り立たず、分割断面の流量の和=総流量という仮定に基づいたロッターの式の方が計算に適していると思われる。

・ロッターの式
$$n = SR^{5/3} / \sum \frac{S_i R_i^{5/3}}{n_i}$$

・アインシュタインの式
$$n = \{ \sum S_i n_i^{3/2} / S \}^{2/3}$$

ただし、 n_i : 分割断面の粗度

S_i : " 潤辺

R_i : " 径深

n : 合成粗度係数

S : $S = \sum S_i$

R : $R = \sum R_i$

4-2 2次元モデルの問題点とその検討

1. 流域を分割する際に考慮すべき事柄の優先順位は？

(1) 障害物（自然堤防・道路・鉄道などの連続盛土施設）

——→ 障害物とタンク境界に囲まれた小ブロックは、隣接ブロックへ面積を振分ける。

(2) 実績氾濫流況

——→ 実績流況に対応するものとするが、一般的には、破堤点付近は河道法線に垂直に、流下に伴い、河道法線に平行にブロックを設定する。

(3) 地形勾配

——→ 流下特性上、破堤点付近・急勾配流域は細かく（タンク面積 $S > \frac{1}{4} \text{km}^2$ ）、緩勾配流域は大きく（ $S > 1 \text{km}^2$ ）分割する。

2. 何を氾濫原粗度のパラメータとするか？

(1) 土地利用（地目）：水田，畑，市街地

——→ ホルトン¹¹⁾によれば

石のない締った裸地（水田に相当） $n = 0.1$

普通の草地（市街地に相当） $n = 0.4$

(2) 水深：パルマー，ホルトンの実験結果¹²⁾の考察

——→ パルマーに従って、水深により、粗度係数を3段階程度線形変化させる（管路型）

(3) 流域で一律の数値を採用する

——→ 土地利用が流域ではほぼ一樣な場合は良いが、場所によって変化する場合は適合しない。

＊航空写真分析（水深・流速）から求めた粗度係数は、氾濫流速として表面流速を使っている為に、粗度係数は過小評価されており（平均流速で換算すると、 $h = 1 \text{m}$ で n は4割増し）、その値に拘わるべきではない。

3. 最適ブロック面積は？

(1) 分割したブロックにおいては、浸水位が一樣になるという欠点を補填する為、河川周辺流域は細かくブロック分割する。

(2) 氾濫原の地形情報（特に $H-F$ 曲線，境界地盤高）には制約があり，計算労力上からも $S > 1 \text{km}^2$ にするのが良いと思われる。氾濫原が小さい場合には，一考を案ずる。

4. 境界特性が直接結合のタンク境界流量を算定する際，氾濫原勾配に応じて，運動方程式はどの様に簡略化できるか？

(1) 氾濫原勾配 $i > 1/1000$ の範囲で，慣性項は十分無視できる。

(2) 加速度項は， $i > 1/1000$ の範囲では，抵抗項と慣性項との中間の値を取るなので，概して無視することも，可能であるが，緩勾配斜面・氾濫水深が小さな薄層流では無視できない値である。

5. 開水路型モデルでは，タンク間の越流量を本間公式により算定しているが，計算に一律の越流係数を採用しても良いか？

(1) 本間公式 $\mu = a \frac{h}{W} + b$ によって計算した値と比較して大差ないかどうかをチェックする。

(2) $h/L \geq 0.4$ の場合，Govinda Rao の実験式[＊]により越流係数を変化させる。¹³⁾（図-4 参照）

ただし， h ：越流水深， W ：堰高， L ：天端幅

6. 破堤に関するデータを入手できなかったとき、破堤条件（破堤幅、越流水深、基部の残り方）を如何に推定するか？

(1) 破堤幅は、何をパラメータに採るか疑問の残る所であるが、川幅をパラメータにとると、概して、以下の様に予想される。

・ $B \leq 50\text{m}$ のとき、 $B_b \leq 2B$

・ $B > 50\text{m}$ のとき、 $B_b \leq B + 50$

B : 川幅, B_b : 破堤幅 (共に m)

(2) 破堤幅は、破堤直後は氾濫ボリュームから逆算した氾濫流量と破堤時の外水位とから、本間公式により推定する。そして、ある時間範囲で、最終的な破堤幅まで線形変化させるものとする。

(3) 越流水位は、流量観測により得られた外水位を用いる。

(4) 破堤に伴う基部の損壊は、既往の破堤データより、破堤のほぼ7割が基部まで洗掘されることが判っているから、破堤時の状況が把握できなかった場合には、基部はなかったものとして越流計算を行なう。

7. 氾濫水先端部は、段波として取扱わなくても良いか？

先端部は土砂を巻き込んだ濁水であり、水面は多少突起状になるが、氾濫流として重要なのは水深の大きな後続部なので、先端部急変流は、運動方程式中の加速度項により表現されているものとする。

* Govinda Raoの実験式¹⁴⁾

$$Q = \mu B h \sqrt{2gh}$$

(i) $0 < h/L \leq 0.1$: $\mu = 0.371 (h/L)^{0.022}$

(ii) $0.1 \leq h/L \leq 0.4$: $\mu = 0.351 + 0.019 (h/L)$

(iii) $0.4 \leq h/L \leq (1.5 \sim 1.9)$: $\mu = 0.326 + 0.080 (h/L)$

(iv) $(1.5 \sim 1.9) \leq h/L$: $\mu = 0.403 + 0.054 (h/L)$

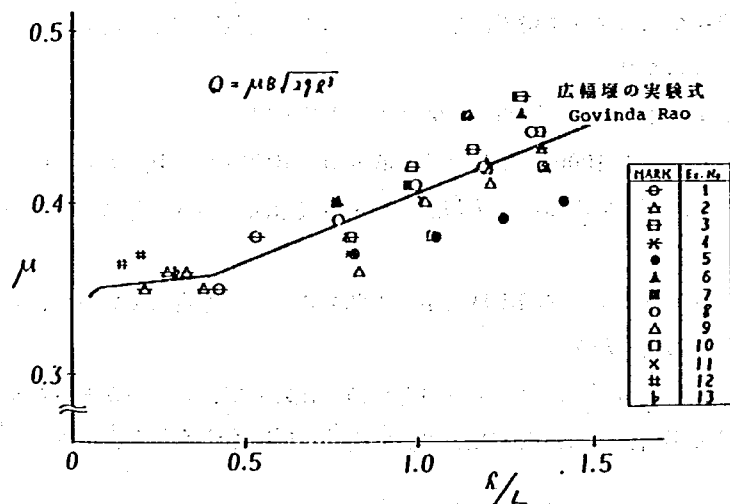
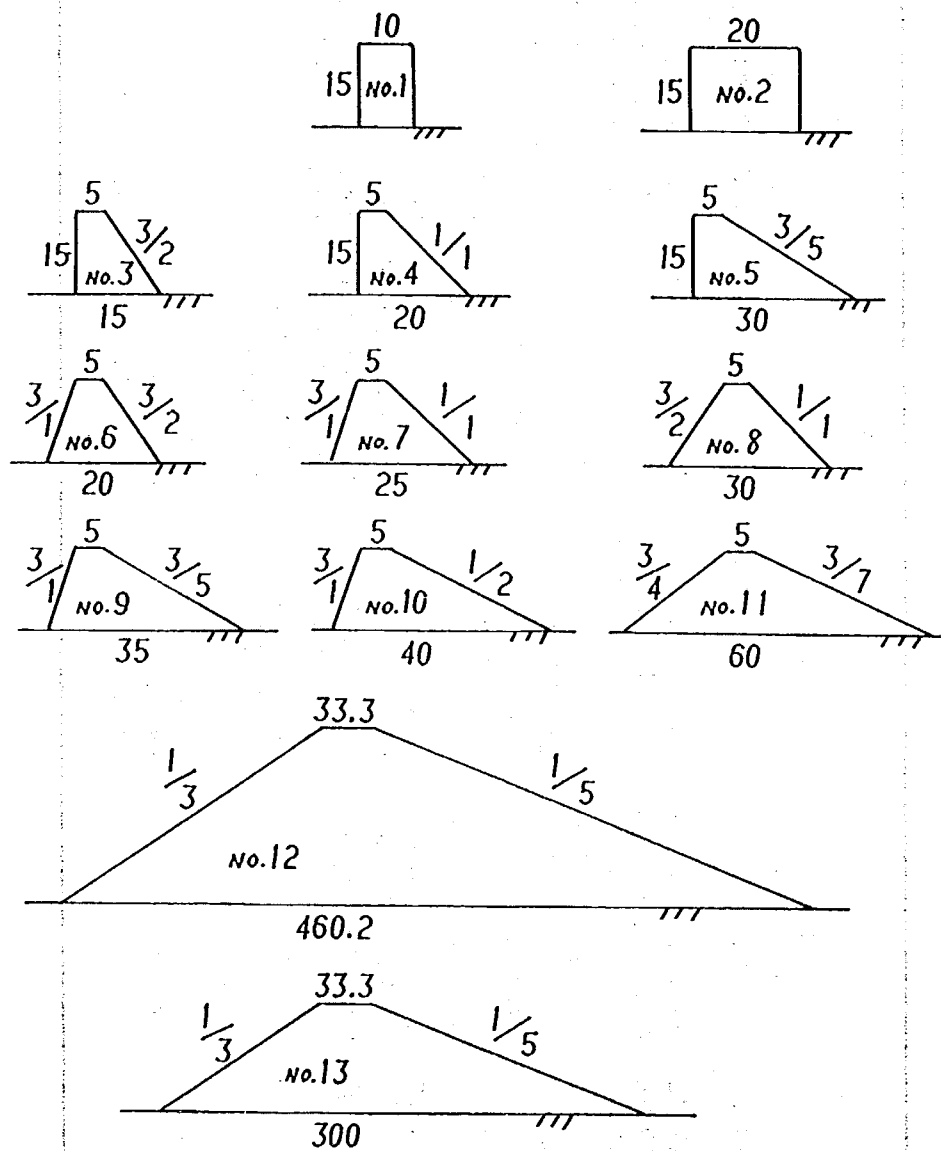


図-4 流量係数と h/L との関係



(単位は, cmである)

図-5 堤体形状の諸元

表-3 既往の氾濫シミュレーションモデル⁹⁾

1. 河川名	石 符 川	中 川	庄 内 川	淀 川	白 川
2. 年 度	5 4	5 6	5 4	5 5	5 7
3. 計 算 手 法	開水路型平面タンク法	一次元不定流	管路型平面タンク法	二次元平面流	開水路型平面タンク法
4. ブロック分割方法 (ブロック面積)	メッシュは矩形を原則とするが、地形の起伏を考慮して適宜、不定形とする。 ($S=1.1 \times 1.1 \text{ km}$)	地形特性(流域界、排水系統、有堤、無堤、洪水による湛水、流下特性)と流出特性との対応を考慮してブロック分割する。 ($S=20 \text{ km}^2$)	矩形メッシュを構造物(鉄道・道路)、河川等により面積の振分を行なう。 氾濫流況は考慮に入れない。 ($S=1 \times 1 \text{ km}$)	河川局の「治水経済調査要綱」に基づいて、格子状に分割する。 水路、盛土はブロックの境界に配置する。 ($S=230 \times 280 \text{ m}$)	昭和28年洪水の氾濫状況より、氾濫水の挙動が地形特性と対応する事が判った為、地形特性・氾濫水の流向等を考慮してブロック分割した。 ($S=1 \times 1 \text{ km}$)
5. 境界特性 (運動式)	運動方程式は非定常項を無視する。 破堤溢流量は、本間公式により計算する。	地表勾配が $i > 1/3,000$ であることより、運動方程式は慣性項・加速度項を無視する。	2種類 ・盛土堤 ・その他…抵抗係数に相当するエネルギー損失係数により、タンク間の水理現象を表現する。	モデルに汎用性を持たせる為、メッシュ境界を特性で区分せず、連続式(オイラー式)・運動式($N-S$ 式)で氾濫原の水理現象を表現する。	7種類 ・直接結合 ・盛土堤 ・水路 ・樋門 ・ポンプ ・直立壁 ・破堤
6. 氾濫原粗度	粗度係数は用いていない。	一律 $n = 0.2$	$n = f(h)$ ・ $h > 50 \text{ cm}$: 0.05 ・ $h \leq 10 \text{ cm}$: 0.4	地目別 ・水田 : 0.025 ・宅地 : 0.04 ・山林 : 0.06	市街化別 ・市街地 : 0.3 ・其の他 : 0.1

第5章 ケース・スタディ

5-1 小貝川（利根川支川）の概要

小貝川は、那珂川と鬼怒川に挟まれた丘陵地に源を発する川で、栃木県を経て茨城県を南下し、利根町の押付本田（利根川 79 km 地点）で利根川本川に合流している。小貝川は、利根川水系では鬼怒川に次いで流路延長の長い支川で

- ・総流路延長 $l = 111.8 \text{ km}$
- ・総流域面積 $A = 1043.1 \text{ km}^2$

の流域特性を有する。

小貝川流域の特徴を列記すれば

- (1) 平地面積率が 85.5% で、他の流域（平均面積率 19.4%）と比較して、かなり平地が広い。¹⁵⁾
- (2) 鬼怒川が蛇行していた際の旧河道とそれに沿ってあまり発達していない自然堤防が、流域に広く分布している。
- (3) 昔は内湾に面して三角州が発達していた為に、シルト・細砂が厚く堆積した軟弱層であったが、現在はその上を上流から運搬されてきた土砂がうすく覆っている。

などである。この様に、小貝川流域は、著しく蛇行した旧河道と自然堤防に代表される。そして、四方を筑波・結城・猿島・北相馬台地群によって囲まれた低湿地（沖積地）を流下する典型的な緩流河川である。（図-6 参照）

表-4 を見ても判る様に、過去、小貝川は度々破堤等により被害を被ってきた。特に問題となっているのは、高水時に利根川本川から逆流が生じ、その影響が岡堰（小貝川筋約 17 km）付近まで及ぶことによって生起する自然堤防沿いの後背湿地における内水氾濫である。この問題は、小貝川流域（取手市、竜ヶ崎市、藤代町）における都市化の進展（図-7 参照）と絡んで、洪水被害を相乗的に増幅させており、今後とも市街化が進展することを鑑みれば、総合的な治水対策を施すことが必要であろう。

5-2 1981 年 8 月洪水¹⁹⁾

1981 年 8 月 23 日午前 4 時、関東地方に上陸した台風 15 号は、東北地方を縦断して北上するという、利根川にとって最も危険なコースを辿って北海道沖へぬけていった。

この台風は、吾妻川、渡良瀬川、鬼怒川の上流域に 200~500mm の多量の雨をもたらした為、昭和 34 年 8 月以来、実に 22 年ぶりに利根川流域の支川に洪水警報が発令された。茨城県の水戸気象台からも、台風上陸前夜の 22 日 20 時に大雨洪水波浪警報が発令されたが、23 日中には雨もあがり洪水も収束するかに思えた。事実、気象庁などでは、23 日の夜から 24 日にかけて、洪水警報・注意報を解除していった。しかし、本川の逆流によって、小貝川筋および合流点付近の水位は、24 日 2 時にピーク（高須水位観測所で、ピーク水位 8.70m を記録）となり、皮肉にも、気象庁が洪水警報

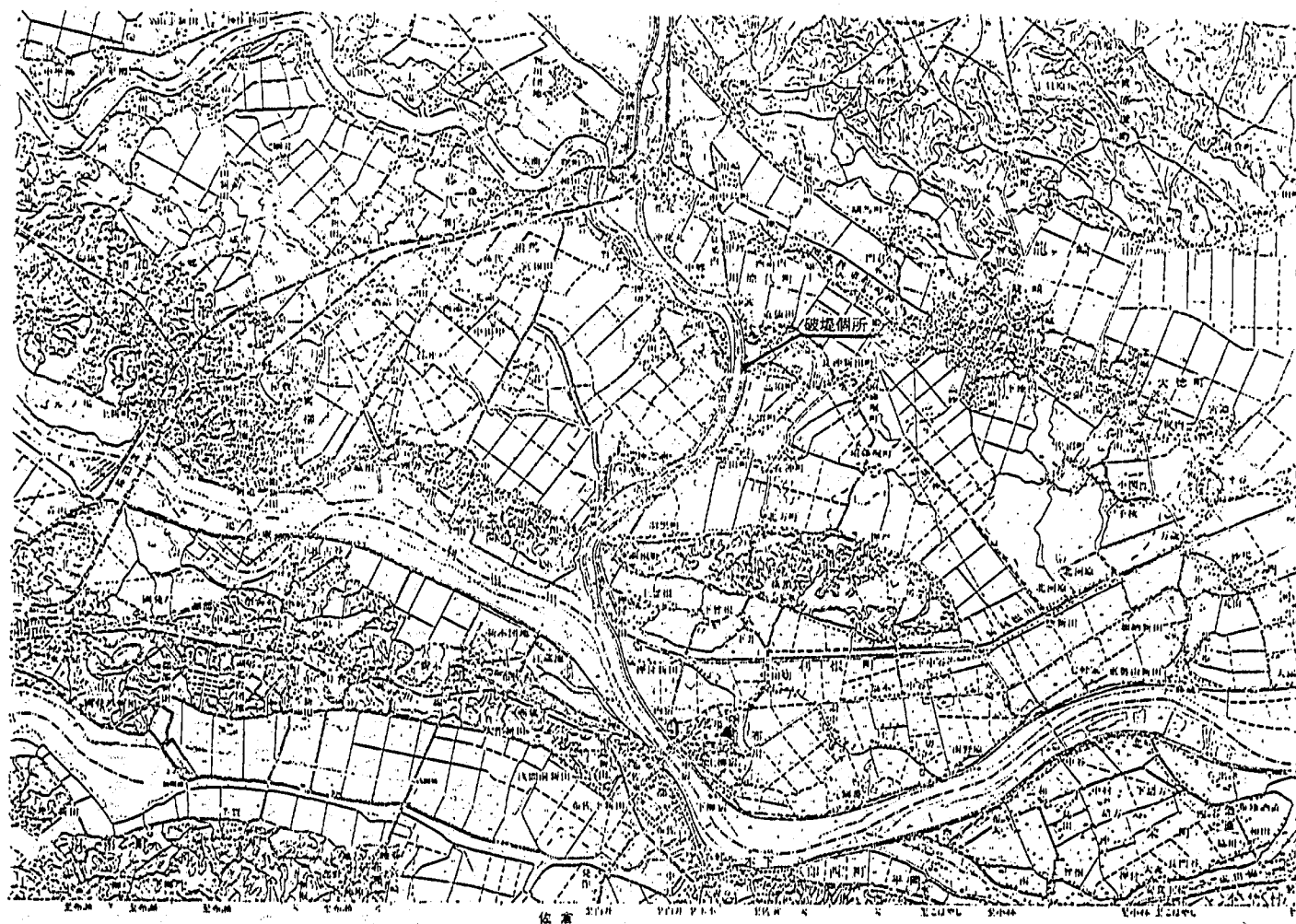


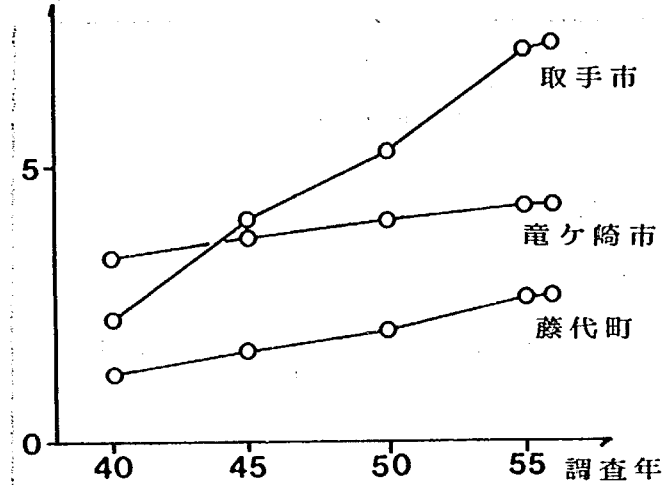
図 - 6 小貝川・利根川流域図

表-4 小貝川水害年表^{16),17)}

年 月 日	年 号	破 堤 地 点	
		町 村 名	地 名
1631. 9	寛 永 8		
1709. 7	宝 永 元	文 村	押 付
21. 9	享 保 6		
24	" 9		
42. 7	寛 保 2	" "	押 付, 豊 田
45	延 享 2	文 間 村	
62	宝 暦 12	文 村	上 曾 根
64	明 和 元		
75	安 永 4	" "	" "
86. 7	天 明 6	" "	押 付
		北 文 間 村	豊 田
1812	文 化 9	" "	長 沖
24	文 政 7	" "	" "
46. 6. 24	弘 化 3	" "	豊 田
58. 9. 10	安 政 5	" "	" 根 野
80. 7	明 治 13	文 村	羽
96. 9. 11	" 29	北 文 間 村	豊 田
98. 9. 8	" 31	川 原 代 村	花 田
		高 須 村	押 切
1901	" 34		
02. 8. 10	" 35		
07. 8. 26	" 40	北 文 間 村	豊 田
10. 8. 11	" 43	" "	" "
10. 9	" "	川 原 代 村	太 田
20	" "	高 須 村	太 留
35. 9. 26	大 正 9		
38. 6. 13	昭 和 10	" "	高 須 橋 下
41. 7. 23	" 13	馴 柴 村	立 羽, 豊 田
	" 16	川 原 代 村	常 磐 線 沿
	" "	里 子 村	騰 羽 の
50. 8. 7	" 25	高 須 村	神 江 浦
58. 9	" 33		
81. 8. 24	" 56	川 原 代 町	高 須 橋 上 流

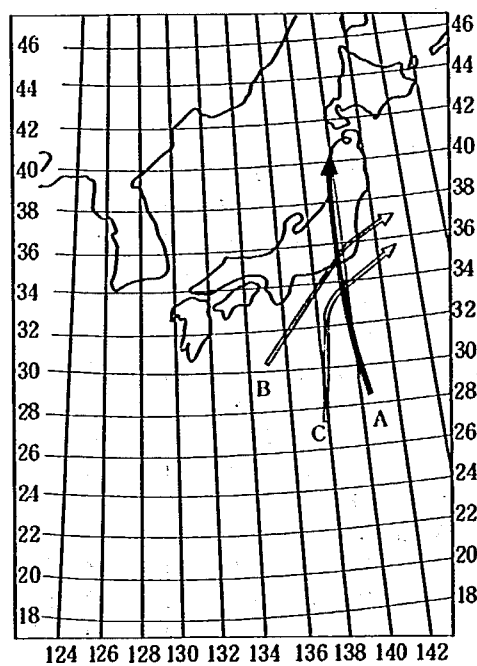
* 利根川水系に大洪水が発生。

人口(万人)



ただし、取手市は昭和45年に市制を施行

図-7 小貝川流域の人口動態¹⁸⁾



A：台風15号（昭和56年8月）

B：狩野川台風（昭和33年9月）

C：カスリーン（昭和22年9月）

図-8 台風15号の経路図

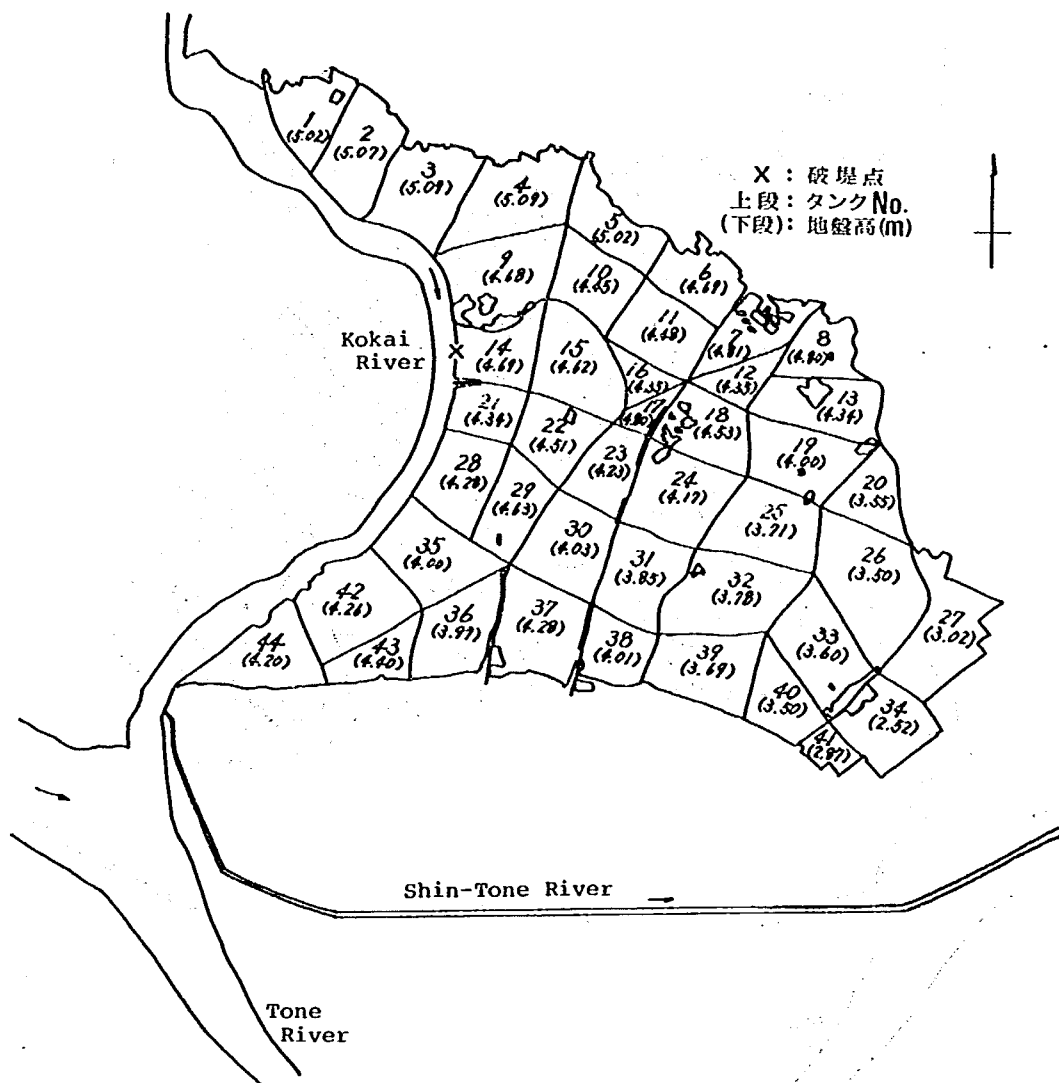


図-9 氾濫原分割図

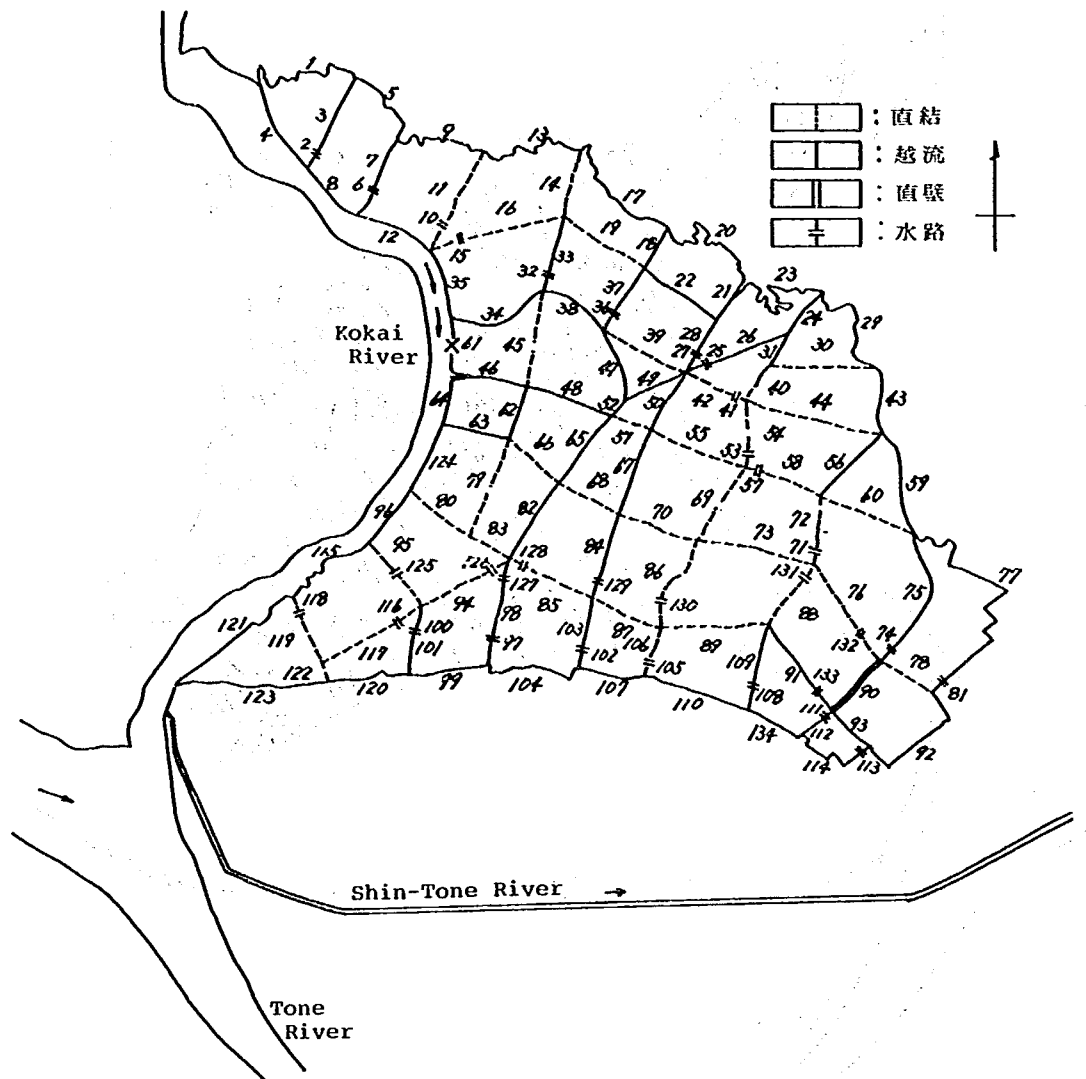


図-10 タンク境界特性

を解除した直後の24日2時12分頃に、竜ヶ崎地先の小貝川左岸堤防（合流点より、3.75 km 上流）が決壊したのである。破堤幅は、当初20m程度であったが、濁水の異常増水のために、8時間後には約60mまで拡幅し、竜ヶ崎地先付近の被害は

- ・床上浸水 1569戸
- ・床下浸水 1501戸
- ・浸水面積 3300 ha

で、その範囲は竜ヶ崎市、藤代町、利根町、河内村、新利根村の1市2町2村にまで及んだ。

5-3 シミュレーションモデルの適用

小貝川流域は、地形勾配 1/3,000 程度の緩勾配流域であるが、旧河道・自然堤防・市街地などが複雑に交錯した地形特性を呈している。

この為、解析手法としては、一連の地形特性を反映でき、かつ、氾濫流の平面的な拡がりを観察できる開水路型平面タンクモデルを採用した。用いた基礎式は、下記の連続式と境界特性毎の運動方程式から成る。

<連続式>

$$\Delta h = (\sum Q_i + Q_{in}) \frac{\Delta t}{F}$$

<運動式>

・直接結合 ; $\Delta v = \left(\frac{\Delta h}{\Delta x} - \frac{n^2 v |v'|}{h^{4/3}} \right) g \Delta t$

・越流堤 $\begin{cases} \text{完全越流 ; } Q = \mu B h_u \sqrt{2gh_u} \\ \text{もぐり堰 ; } Q = \mu' B h_d \sqrt{2g(h_u - h_d)} \end{cases}$

・水路 ; $v = \frac{1}{n} h^{2/3} i^{1/2}$

・直立壁 ; $v = 0$

h_u ; 堤頂から計測した上流側水深

h_d ; " 下 "

尚、氾濫原は既往の氾濫流況、地形特性（旧河道・自然堤防・台地）、主要幹線道路等を考慮して分割を行なった。又、計算流域は航空写真による破堤10時間後の浸水域²⁰⁾とした。

5-4 計算結果と考察

氾濫の再現対象を破堤何時間後のどの水理量に求めるかは、依然未解決の課題である。今回の計算では、航空写真より、破堤 6 hr および 10 hr 後の浸水深が得られているので、浸水深を再現対象として方程式の諸係数を決定した。その結果は以下の通りである。

・氾濫流量 : $Q = 350 \text{ m}^3/\text{s} = \text{const.}$

・越流係数 : $\mu = 0.3$

・氾濫原粗度係数 : $n' = 0.3$

・河床粗度係数 : $n = 0.045$

(論所排水)

上記の諸係数を用いて行なったシミュレーションの結果を図-11~15に示す。シミュレーションによって計算された浸水深と、航空写真より得られた浸水深とを比較すると、次の様な事が伺える。

- | | |
|--|-------------|
| 1. 浸水範囲に差異が見られる。 | } 破堤 6 hr 後 |
| 2. シミュレーションの方が、計算流域周縁部への氾濫水の到達が早い。 | |
| 3. 破堤点付近の浸水深がかなり違う。 | |
| 4. 共に、幹線道路 (A-A') による浸水防御効果を表現している。 | } 破堤 10hr 後 |
| 5. 破堤点付近は、B-B' を境界にして湛水状況が異なっている。 | |
| 6. シミュレーションにおいて、周縁部 (No. 22, 34, 44 ブロック) の浸水深がかなり大きい。 | |
| 7. 計算流域中央部分は良く適合している。 | |

これらのうち、両結果が適合しなかった根拠は、以下に掲げる通りである。

・ 氾濫水の挙動が早い (相違点 1, 2, 3)

氾濫原の粗度係数等に変化を加えたものの、特に境界特性が直接結合の場合に、タンク間流量が過大になって、氾濫水の挙動が早くなってしまった。これは、タンク間の水位差が小さい場合に、不定流式の抵抗項が過大になって、氾濫流速を早くした事に依るものである。

・ 湛水状況が異なっている (相違点 5)

氾濫水の挙動は、氾濫原における地形の起伏と連続した盛土に強く左右される。今回計算を行なった小貝川流域は、地形の起伏は小さかったが、特に破堤点付近は旧河道・自然堤防・灌木群などが交錯していた。計算結果が合わなかったのは、B-B' 上に位置していた灌木群を計算条件に入れていなかったためであろう。やはり、地形情報を正確に把握しておくことが重要である。

・ 周縁部の浸水深が大きい (相違点 6)

タンクモデルでは、計算流域内のみの氾濫水の挙動を見る為、周縁部のタンクは、概して、流入するのみでタンク内の貯留量が大きくなる傾向にある。今回の計算では、こうした矛盾を解決すべく、計算流域外に仮想のタンクを設けて強制排水させたが、それでも、依然貯留効果が大きい様である。

5-5 今後の課題

(I) 氾濫原のブロック分割

(氾濫水の低減効果)

破堤口から湛水域末端にかけての氾濫水位の低減は、タンクモデル法では、忠実に表現できない。この理由としては

(i) 氾濫原をほぼ均一面積 ($S \div 30 \text{ ha}$) でメッシュ分割した為に、破堤点付近では、水深が平滑化されて減少した為である。

(ii) タンクモデルでは、氾濫流の流勢 (破堤口からの主流の勢い) が、タンクの配置によって決

定される為、流域を矩形分割すると、氾濫水が同心円的に拡散する為である。

各々の問題点を解決するには

- (i) ブロックは、破堤点付近で細かく、破堤点から離れるに従って大きく分割すると良い。
- (iii) ブロック形状を多角形にするか、もしくは、諸定数(越流係数・粗度係数)の操作により、流勢を変えてみる以外方法はない。

従って、或る程度、試行錯誤的にシミュレーションを繰り返さなければならない。

(2) 再現対象

今回のシミュレーションでは、再現対象として航空写真を活用した。航空写真の精度²¹⁾と、撮影条件が

- ・撮影機の高度 $H = 900\text{m}$
- ・ " 速度 $V = 50\text{m/s}$
- ・スケール $S = 1/6,000$

であるから、カメロン効果に伴う水位誤差は、水位に関係なく

$$\frac{H}{3000} = 0.3\text{m} = 30\text{cm}$$

となり、氾濫水深の小さな流れでは、精度がかなり劣ると思われる。一方、被写体の移動速度が、 $v = 1\text{m/s}$ の場合の速度誤差は、相似関係より

$$\Delta H \div \frac{v}{V} H = \frac{1}{50} \times 900 = 18\text{m}$$

$$\frac{30\text{cm}}{\Delta H} \times v = \frac{30\text{cm}}{18\text{m}} \times 1\text{m/s} \div 1.7\text{cm/s}$$

となり、水位と比較して桁違いに精度が高いことが判る。ただし、表面流速を計測することになるので、水深約1mで平均流速とのズレが4割程度になる様である。

以上の事を踏まえて、航空写真の結果(特に水深)は、あくまでも参考程度にとどめて、現地踏査した洪水痕跡および流域住民の証言等をもっと活用しなければならない。

詳細な事は、巻末の参考資料を参考にして頂きたい。

(3) 運動方程式の簡略化

本計算では、タンク間の標高差が小さい場合(直結)のみ、不定流式を用いてタンク流量を算定した。その際、計算の簡便化として、慣性項を無視して流速の時間的変化を計算する方式を採用した。これは、慣性項が他の3項に比べて無視し得るオーダーであることが確認されていることと、計算をやりやすいことに基づいた簡略化である。

一方、加速度項は概して大きいので、薄層流でなく、かつ急勾配($i > 1/500$)の流域でのみ無視し得るので、一般的には、加速度項を無視しない方が得策であると思われる。

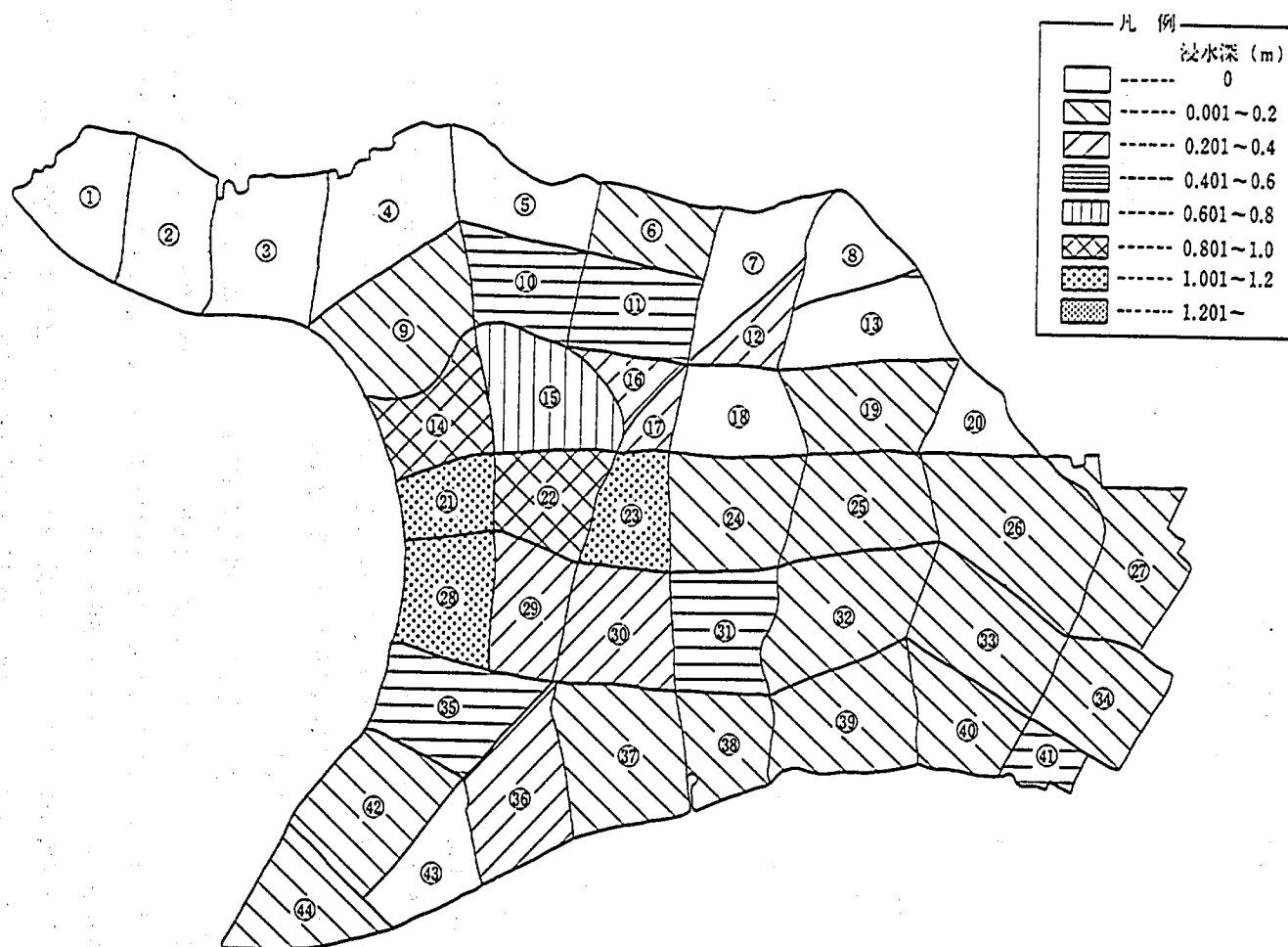


図-11 浸水深の時間的变化(破堤 2hr 後)

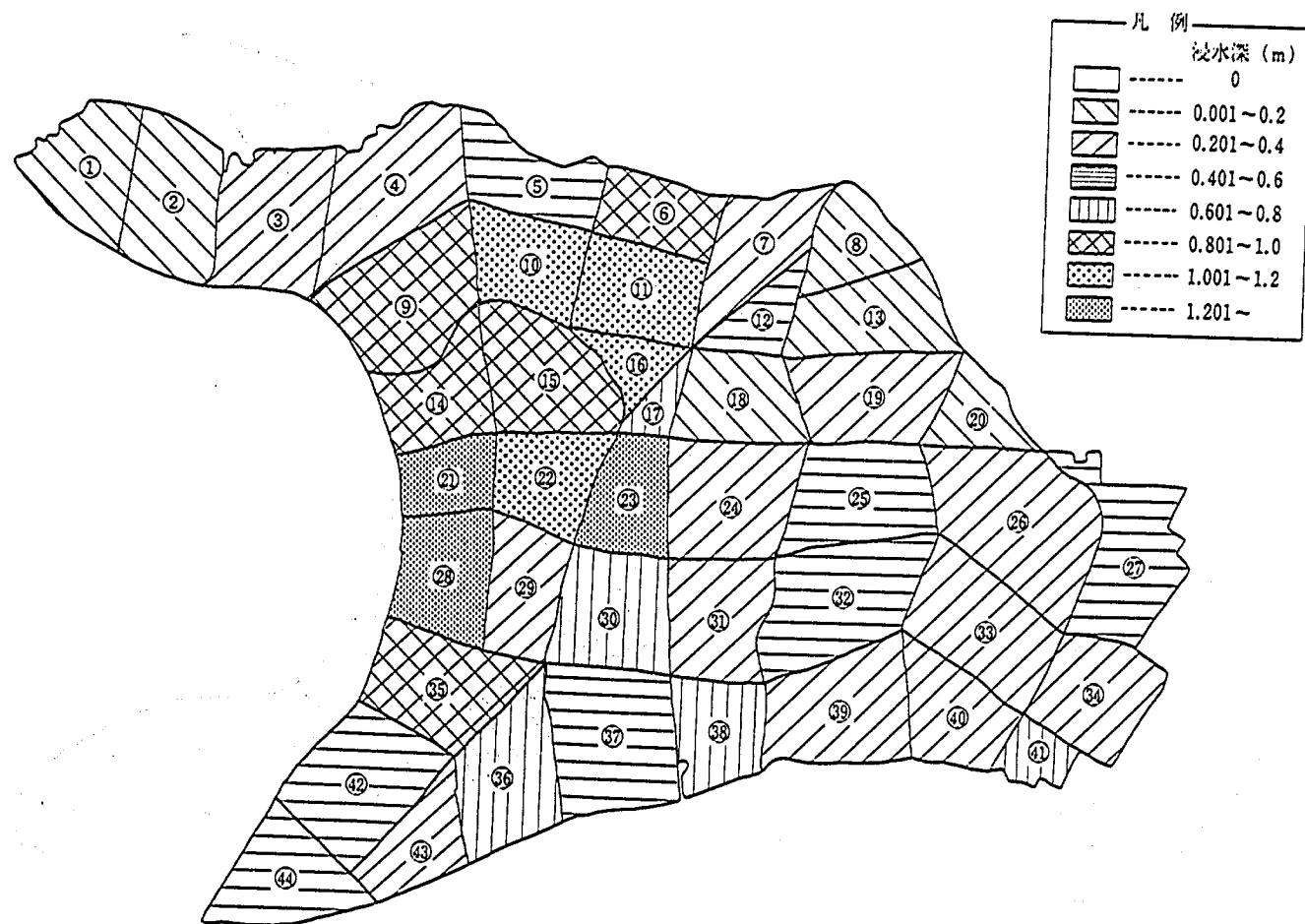


図-12 浸水深の時間的变化 (破堤 6hr 後)

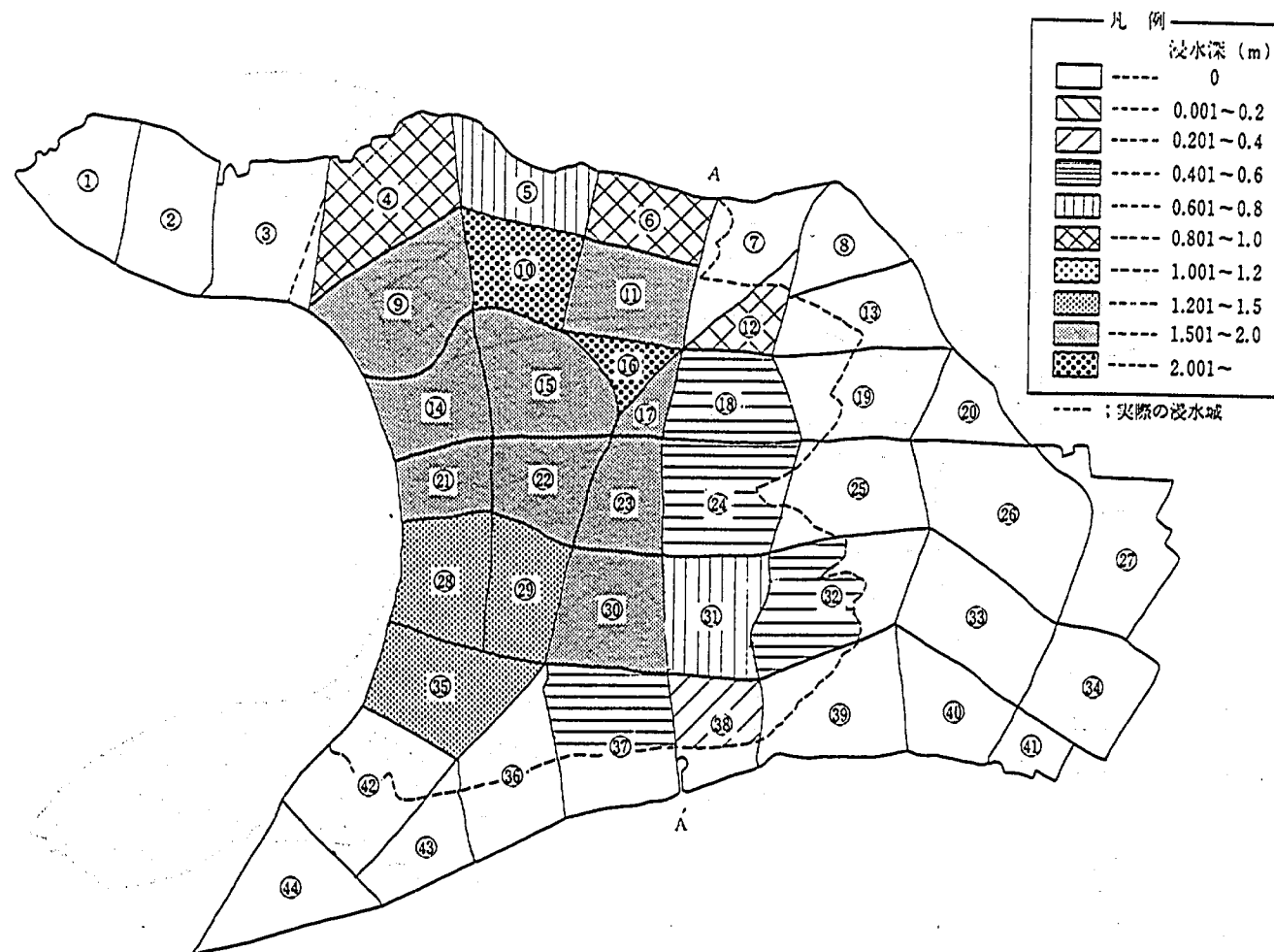


図-13 航空写真による浸水深の時間的变化(破堤6hr後)

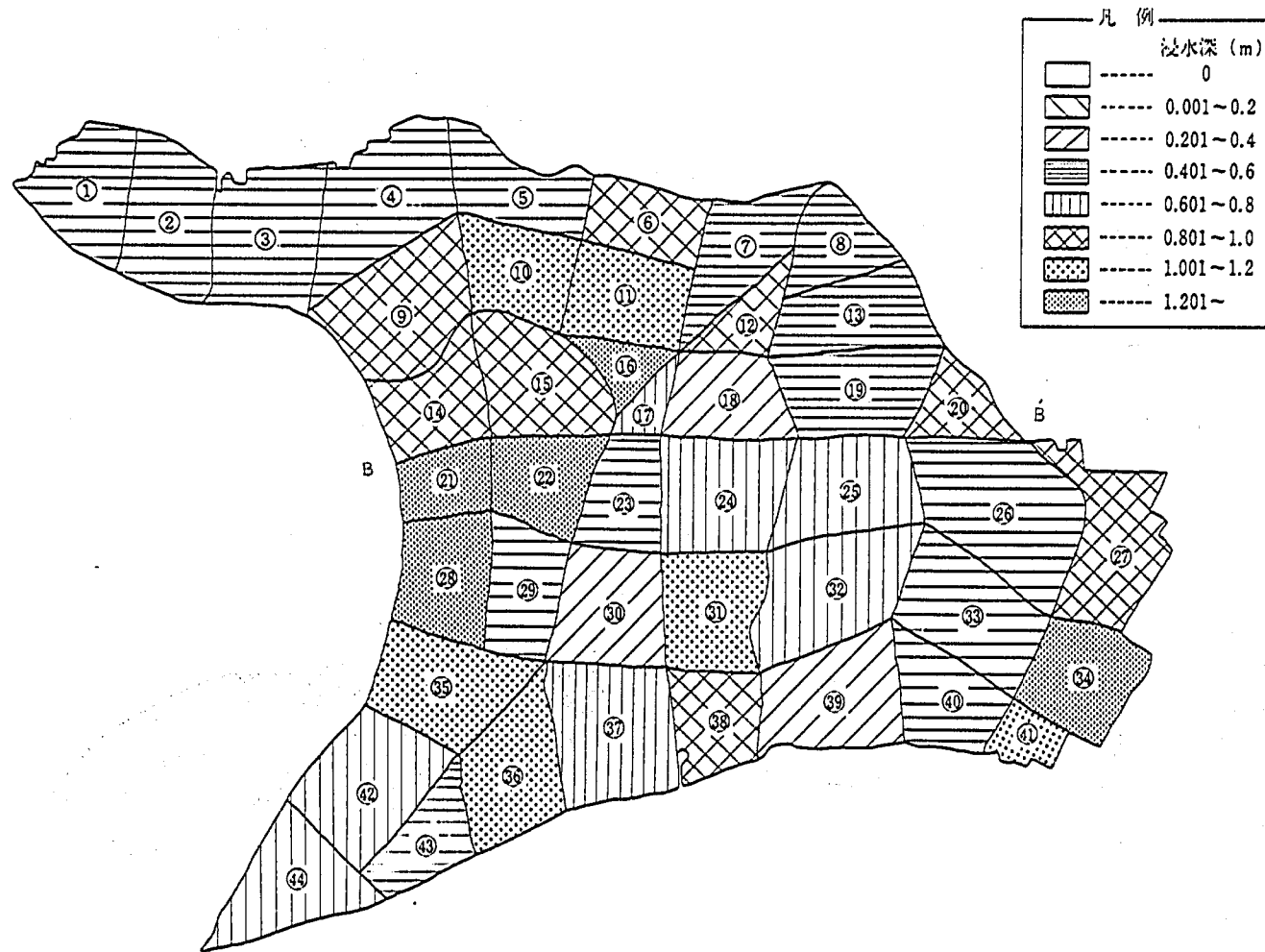


図-14 浸水深の時間的变化(破堤10hr後)

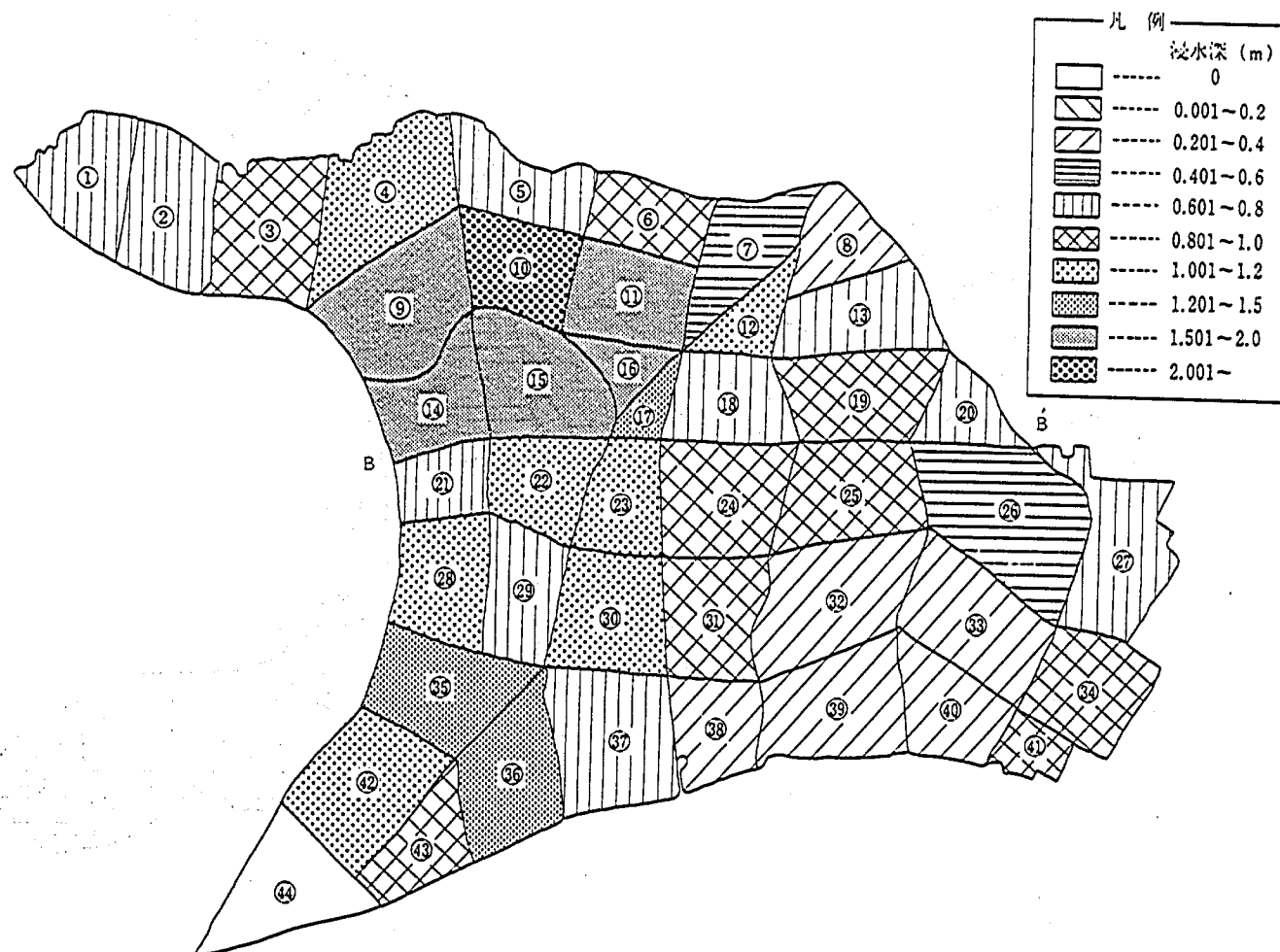


図-15 航空写真による浸水深の時間的变化(破堤10hr後)

あ と が き

氾濫シミュレーションによる解析を終えて思う事は、

- ① 氾濫流況が、地形特性に率直に反応する。
- ② 氾濫原における地形情報を収集するのに、非常に手間がかかる。
- ③ 堤内地と堤外地での水理現象の相違点をどこに見出すか。

であり、以上の事は、とりも直さず氾濫水の挙動の複雑さを示す証である。

今後は、「今後の課題」で記述した事などを踏まえて、シミュレーション結果と従来の洪水危険地図とを比較検討し、更に氾濫シミュレーションが多角的に活用される様、ソフトな防災対策、即ち、

- ① 水防活動
- ② 土地利用規制
- ③ 災害情報
- ④ 避難・誘導

などの問題点や今後の方向を模索してゆく予定である。

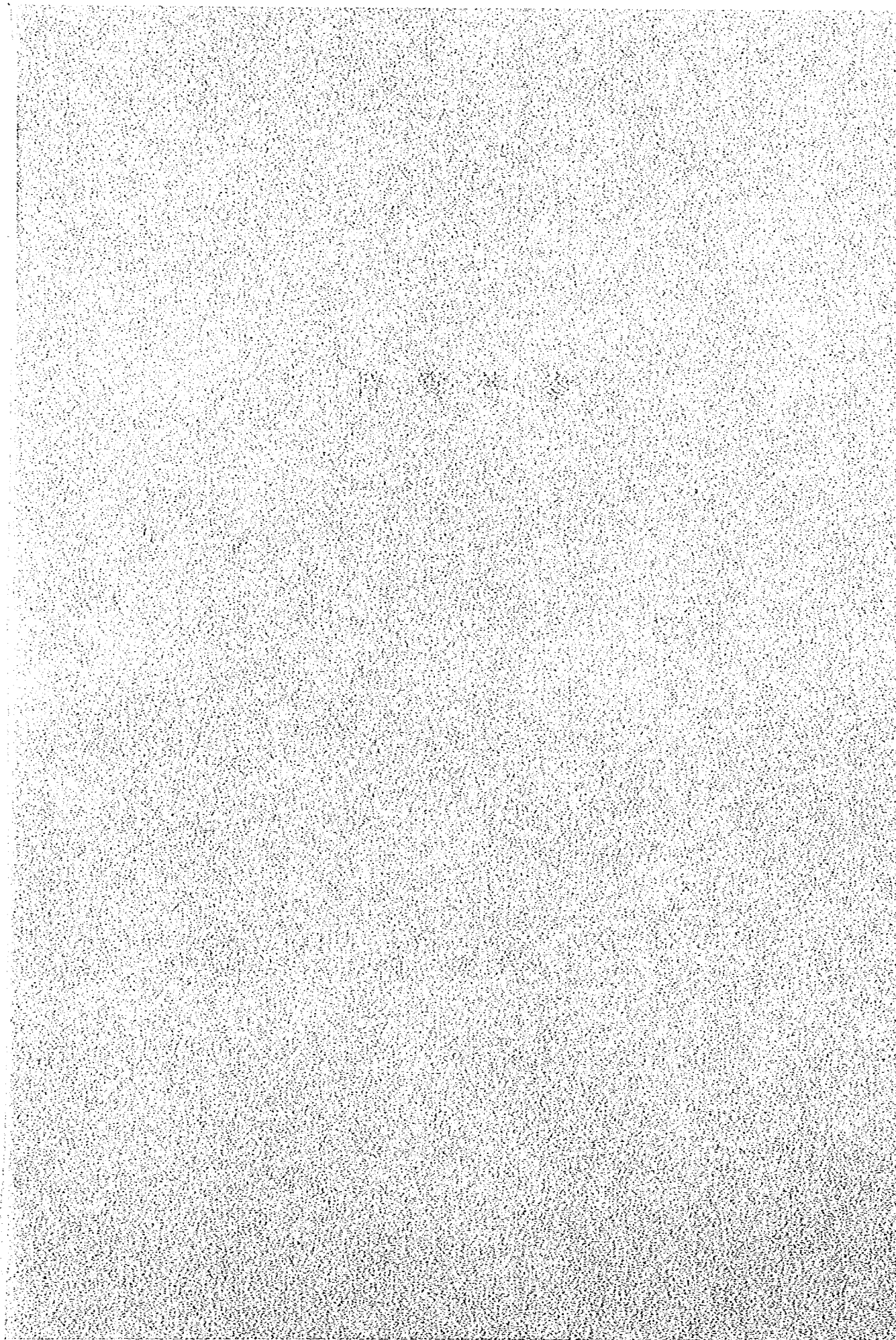
最後に、本研究にあたって、重要な指摘・指示を与えて下さった山本室長（総合治水研究室）、ならびに資料を提供して下さい下さった国土地理院、その他、関係者各位に感謝の意を表わします。

総合治水研究室 研究員	末 次 忠 司
	桐 生 祝 男
	横 山 揚 久

参 考 文 献

- 1) 建設省河川局河川計画課：「水害統計」，1982
- 2) 土屋昭彦・石崎勝義・佐々木健一：「巴川洪水氾濫予想地図解説書」，土研資料第1238号，1977
- 3) 大矢雅彦：「水害地形分類図とその利用」，1981
- 4) T. H. Naylor, J. L. Balintfy, D. S. Burdick, K. Chu：「コンピュータ・シミュレーション」，1971
- 5) 木村春彦：災害総論－総合科学的災害論の構造化の試み，法律時報49巻4号，1977
- 6) 入澤実：水害面から見た土地利用状況の問題点，防災センター研究報告第22号，1979
- 7) 田中慎一郎：土木学会誌 vol. 67, p.81, 1982
- 8) 建設省熊本工事事務所：「白川氾濫解析検討報告書」，1982
- 9) 建設省庄内川工事事務所：「総合改修計画調査報告書」，1979
- 10) 足立昭平：長方形断面水路の側壁効果に関する研究，土木学会論文報告集第81号，1962
- 11) 本間仁：「応用水理学 中Ⅱ」，p. 430
- 12) 石原藤次郎：「水工水理学」，p. 380
- 13) 土木研究所河川研究室：越流係数の検討
- 14) 土木学会：「水理公式集」，p. 262
- 15) 建設省河川局河川計画課：昭和53年度河川現況調査，1979
- 16) 下利根川小貝川沿岸水防組合：「水害年表」
- 17) 利根川上流工事事務所：「利根川文献目録と歴史年表」
- 18) 自治省行政局：全国市町村要覧，1981
- 19) 関東地方建設局河川管理課：「高水速報」，1971
- 20) 山本晃一・吉川勝秀・横山揚久：「小貝川氾濫調査報告書」，1982
- 21) 木下良作・須賀堯三・堀口正：航空写真による洪水流の観測，土木技術資料17-6，1975

参 考 資 料



参 考 資 料 (1)

航空写真による氾濫流解析

1. 航空写真測量の概要

1-1 航空写真とは

航空写真測量は、航空機（飛行機、ヘリコプター）を利用して上空より写真を撮影し、その航空写真を分析することで、地形情報や科学的なデータを得ようとする手法である。

航空写真測量は、19世紀中頃に気球から撮影したのを始まりとし、初期には気球やたこによって斜写真が主に撮られていたらしく、垂直写真は、飛行機が実用化した後撮影されるようになって、現在では多くの分野で利用が検討、実施されている。

1-2 航空写真分析の目的

航空写真測量が、近年多くの分野で利用されている理由は、航空写真が、情報に関する量、質の面で他の測量手法に比べてたいへん有効なものであるためである。

従来型の測量法と航空写真測量を比較する*と次の様になる。

- | | | |
|-----------|-------------|------------------|
| 1) 従来型測量 | → 直接現地を測量する | → 図化 |
| 2) 航空写真測量 | → 写真撮影 | → 測定 → 図化 |
| | | └ 場合によっては、一部現地測量 |

・従来型測量の場合

測定誤差と測量者の理解像の精粗、適否が結果に影響し、長期間の現地測量が通常必要になる。

・航空写真測量の場合

測定は立体像について点、連続した線状に位置や高さを決定できるため、全体に平均精度が高められる、また測定者の熟練度が作業能率に影響はするものの、結果の良否には比較的影響されない。

また、分業的な流れ作業が可能であり、写真撮影後、迅速に測定を行うことができる。近接、踏査の困難な場所における測量に有用である。

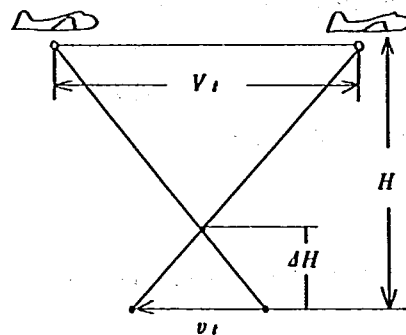
しかし、写真撮影の可能な日が、気象上の制約等から限定され、また土地の表面が森林などで被覆されている地域では、土地の高さを知ることは出来なくなり、現地測量をよぎなくされる。

以上の様な利点、欠点が問題視されるが、情報量、結果の確かさから、多く活用されているものと思われる。

そして、河川などへのリモート・センシングの応用は、1952年H. L. カメロン（カナダ）が海

注) * は一般的な地形測量と比較した場合

岸の航空写真から、潮流による水面模様の移動量（横視差）が高度に変換されたことを知り、その高さを計測することで流速が得られるという論文発表（カメロン効果）をしたことに始まり、W.D. フォレスター（カナダ）は、その方法を河川に試みた。それ以後、各国に広がり、日本でも建設省直轄の河川において試みられており、木下氏の検討など多くの実用例がなされ現在に至っている。



H : 飛行高度

ΔH : 視差差

V_i : 飛行速度

v_i : 浮遊物の流速

$$v = \frac{\Delta H}{H - \Delta H} V$$

図-1 カメロン効果の概念

1-3 航空写真測量の精度*と実用性

日本における航空写真測量の利用は、地理学的な検討はもとより、リモート・センシングの分野にも活用されている。

しかし、洪水調査の検討に利用され始めたのは、吉野川においてが初めてらしく、ただ、1962年、石狩川で氾濫調査のために航空写真撮影が行なわれている。その後、各直轄の河川で行なわれ、その資料を基にして、木下氏によって、流速、水位を計測し、流速コンター図を作成した。それら資料と河道断面特性などの資料を使用した、流量の推定が数年前に行われている。

木下氏の論文より、撮影にかかせない注意や条件を列举して、以下に示す。

1) 撮影縮尺

河道を対象とした場合、 $S = 1/8,000 \sim 1/10,000$ 程度が適当であるが、氾濫原を対象とした場合は、それ以上に大縮尺であってもよいようだ。ただし、シャッター間隔等とのバランスを考慮する必要がある。

2) 撮影コース

河道を対象とした場合、河川流に平行であることが望ましい（交角 30° 以内）。氾濫原を対象とする場合は、あらかじめ氾濫原の高低、土地条件などの治水条件を基に、撮影コースの選定を行う必要がある。

注) 流水とほぼ平行なコースが望ましいが、合成することで、流向、流速を出すこともできる。

注) * 河川などのリモート・センシングにおける精度であって、地形図等を作成する場合とは異なる。

3) 撮影時間間隔とオーバーラップ

撮影時間間隔は短くとればとるほどに、流れの特徴（乱れなどの細部の現象）を知ることが可能となるが、航測用カメラの限界もあり、4秒位が適当であると言われている。また、オーバーラップは、撮影時間間隔と、飛行速度、撮影縮尺（高度）に応じて変化させる必要があるが、 $\Delta t = 4$ 秒の場合、80%以上が望ましい。

表-1 $\Delta t = 4 \text{ sec.}$, $V = 200 \text{ km/h}$, $f = 150 \text{ mm}$ レンズの場合

飛行高度	撮影縮尺	オーバーラップ
900m	1/ 6,000	83.9%
1,200	1/ 8,000	88.0
1,500	1/10,000	90.3
2,250	1/15,000	93.6

4) 水面浮動標識（ふし）

濁りの色調模様、泡、または浮遊物など流れの特徴となるものが期待出来ない場合は、発泡ポリスチレン紙などの水面浮動標識を散布する必要がある。1/1,000 縮尺では40cm四方以上のものが好ましく、散布する密度は目的に応じて決定するのが妥当である。しかし、撮り損いのないようより多くの散布が望まれる*。

5) カラー写真

流速、流向の測定のみを目的とするのであれば、白黒写真でも十分な資料は得られる。しかし、濁度の状態や流れの微妙なちがいで観察することは白黒写真ではむずかしく、カラー写真の方がより確実な把握が出来る。

6) くりかえし撮影

流量が異なった場合の洪水流の変化は、いちじるしいちがいがあり、さらに氾濫状況を見る場合などは、特にくりかえして、各時間ごと（洪水経過時間ごと）の撮影を行なう必要がある。

7) 対空標識

地上対空標識の設置をあらかじめ設置することは、洪水、氾濫の予想がむずかしい今日、困難であるが多くの河川の場合、1/2,500 程度の航空平面図をあらかじめ作ってある為、あらためて設置する必要はない。しかし、平面図がない場合もあるので、航空平面図の有無を確認した後、必要と思われる場合は、対空標識を設置することが望まれる。

8) 関連する調査

洪水調査などの諸調査（流量、水位、洪水痕跡、河道断面、流砂量、その他）は写真測量結果の検証、あるいは裏づけ資料となるので、特に有用となる。

9) 表面流速と平均流速

写真測量に表われる流速は、表面流速であるので、表面流速と平均流速との関係を知るために直線区間における流速の詳細測定が望まれる。

注) *河道を対象とした場合、約30m四方に一枚の割合で1kmに1,000枚を散布する。

測定結果の精度について、一般的な地形測量の高さの精度は、飛行高度 H の $1/5,000 \sim 1/7,000$ 程度といわれている。洪水流（氾濫流）の場合、 H の $1/3,000$ 程度となるようだ。¹⁾

具体的には縮尺 $S = 1/6,000$ ，飛行高度 $H = 900\text{m}$ の場合、水位精度は $\pm 30\text{cm}$ となり、水位は若干信憑性にかかる結果となるが、流速については、同条件下で飛行速度 $V = 60\text{m/sec}$ であるとすると $v = \pm 2.0\text{cm/sec}$ の精度となり、かなり信頼できる結果となる。（上記結果に測定者の個人誤差等が入るので実際には $\pm 10 \sim 15\text{cm/sec}$ の精度となると予想される。）

以上、地形測量はもとより、洪水流においてもかなり信頼できる結果を求めることができる写真測量は、今後はより活用されるものと思われる。

2. 小貝川破堤における氾濫流の追跡（ケース・スタディ）

今回、小貝川破堤による氾濫流の氾濫挙動調査に航空写真測量を利用して、その解析を行なったが、測定における条件を地形や写真の特徴から、以下の様に仮定して測定を行なった。

・流向

流向は以下に掲げる写真上の特徴を利用して求めることができた。

- 1) 濁度の濃度差に基づく流線
- 2) 異常物体像の峰、谷線、浮遊物の運動方向
- 3) 稲等の倒れた方向
- 4) 水面上の渦列の方向

・水位および水深

- 1) 水位は浸水線付近の地表地盤高を読みとって求めた。
- 2) 浸水深は水位と地盤高を求めることにより、得ることができる。

ただし、広範囲になると水面傾斜ができて正確さを失う。航空写真より自然堤防や道路の高盛土等の微高地に囲まれた小さな区画を想定し、その周囲で測定を行うことにした。

・流速

流速は異常実体像の表われている部分を、図化機^米を使用して x 視差¹⁾、 y 視差²⁾を求め、それぞれの流速をカメロン効果より導き出して、それを合成して実際の流速を求めた。

- 1) x 視差は基線方向に dH 高さとして表われる。
- 2) y 視差は $A-8$ の場合、基線と直交方向に $d\omega$ メスマークの縦割れとして表われ、

$$P_y = f \left(1 + \frac{d^2}{f^2} \right) d\omega$$

ここに、 P_y ： y 視差(mm)， f ：焦点距離(mm)， d ：基線からの距離(mm)，

$d\omega$ ：補正角(c grad)である。

上式より長さに変換される。

注) 米；ウイルド社製ステレオプロッター，A-8

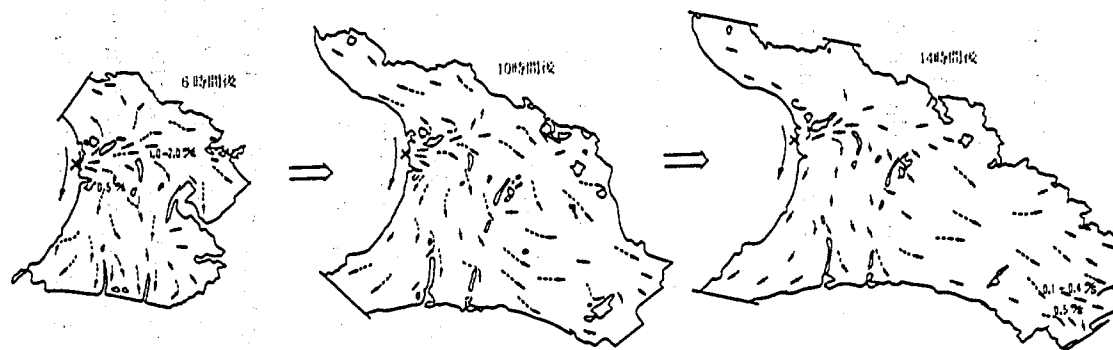


図-2 氾濫域の時間的变化

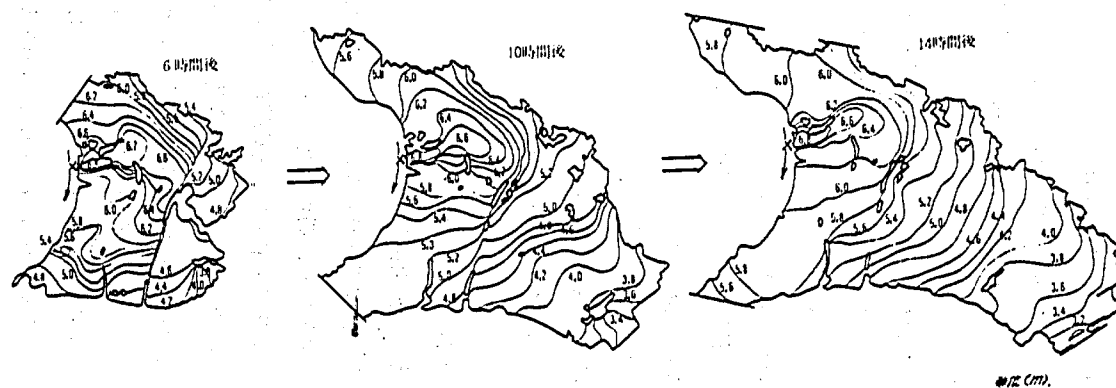


図-3 浸水位の時間的变化

2-1 浸水区域および流向について

浸水区域は、撮影された5時期の航空写真より、その範囲を知ることが出来る。浸水区域の拡大状況は図-2に示す通りである。

氾濫水は竜ヶ崎市の乗る自然堤防上微高地とその南に位置する上総台地の間に広がる沖積低地を湛水させ、時間と共に浸水範囲を拡大していった。破堤後約14時間で、破堤地点より南東約5kmを流れる新利根川に流入した。その後、新利根川もあふれ浸水面積は最終的には3,300haに達し、床上、床下合わせて3,070戸が浸水した。

氾濫流は、破堤直後東と北東に分流し、東に向う流れはその後さらに東と南へ分かれて流れた。南へ向かった流れは破堤6時間後の8時には、南端の台地沿いに達しており、東(南東)へ向った流れは、沖積平野のほぼ中央を横断する道路によって滞留していた。10時間後の12時には、東と南へ向った流れは横断道路と自然堤防地帯を越えた所で合流していた。破堤14時間後の16時には、氾濫水は新利根川に流入し、水の動きは目立って鈍くなっていった。

以上のように沖積平野の西端で破堤した後、氾濫水は、水路や自然堤防、旧堤沿いに流れ、地盤高の低い新利根川へと流下した。

2-2 氾濫水の水位、流速について

氾濫水の水位については、代表的な3時期(6時間後、10時間後、14時間後)を図-3に示す。流速については図-2に示している。

水深は破堤点付近で特に深く、また、破堤6時間後の時点で見られる道路および自然堤防沿いで滞留した部分などは他に比べて深かったが、全体的に見ると水深1m未満の部分がほとんどであった。

8時の段階では、道路による滞留が原因となって、境界にかなりの水位差が見うけられた。しかし、12時には、水位差は小さくなって平均化していった。16時では、新利根川に流入している部分で水位低下が確認されたが、全体では水位変動がほとんどなく、特に北部では12時の状態とくらべ水位の変化がなく、滞留が起きていることがうかがわれる。

流速は破堤部が最大で、航空写真測量では浮遊物の確認が出来ず計測することは出来なかった。8時から17時を通じてあまり変化がなかったようだ。8時の状況で、南東へ向う流れが流速1.0~2.0 m/secの値を示していた。この部分では多くの流速値が得られた。他にも流れの早い部分はあったようだが、計測が不可能であった為、確認されていない。12時になると流速は0.2~0.5 m/secと平均化されてくる。16時では氾濫水の動きはほとんど確認できなくなるが、一部新利根川へ流入する所で0.5 m/secとなっていた。

以上の水位、流速など写真測量より得られた結果を各時期ごと説明を行なったが、次に小貝川氾濫に見られた特徴をまとめると、以下となる。

- ① 氾濫水は破堤点より、台地や、灌木群、旧堤の間をぬって北上、直進、南下の3つに大きく分かれ、直進と南下した氾濫流は破堤6時間後合流して、その後沖積平野の下流を流れる新利根川へ流入した。
- ② 昔、造られた旧堤(控堤)が、今回の洪水に対しても浸水からの保護線となって大いに役立

った。そして、旧堤に守られた旧市街地と、それより張出していたために浸水した新市街地とが、対照的であった。

- ③ 高盛土の新設道路が氾濫水を滞留させ、自然堤防上の家にも浸水被害がおよんだ。このことから、幹線道路の盛土は、氾濫原における氾濫状況を変える大きな要因となるので、十分な検討が必要である。

3. 航空写真測量の今後の課題

3-1 航空写真測量の問題点

航空写真測量を行うにあたり、問題となることは、撮影する際の問題と、測定および解析を行う時の問題とに分けることができる。

1) 撮影を行う際の問題点

- ・悪天候時における飛行技術の向上

悪天候の際の飛行知識を未経験者に普及させ、いかなる場合でも撮影可能な状態を備えることが望まれるが、通常とは反対の行動を強制するので、注意深く考慮されたい。

- ・水文・気象の事前調査の確立

過去における洪水時の水文、気象状況の調査や、現在の航空気象情報伝達システムの確立をはかる必要が望まれるが、各河川ごとにシステム化することは、費用、人員の面で問題を残す。

- ・事前契約

洪水、および氾濫の予測は今のところ不可能であり、洪水が起こってから写真撮影を依頼するのでは、準備が間に合わず洪水はおさまってしまう。それゆえ、事前に業者との契約をかわし、洪水警報と同時に出勤出来る体制を作っておくことが望ましいが、いつおこるのかわからないのが洪水であるので、その対応はむずかしい。

- ・対空標識あるいは航空平面図の作成

直轄の河川の場合はすでに航空平面図が出来ているので問題とはならない。しかし、対空標識がない場所での航空写真測量は、後で位置を確認することが出来ないなので、使うことが出来ない。この様なことがない様に、対空標識の設置は事前に、予期される範囲内で行なう。

2) 測定、解析の問題点

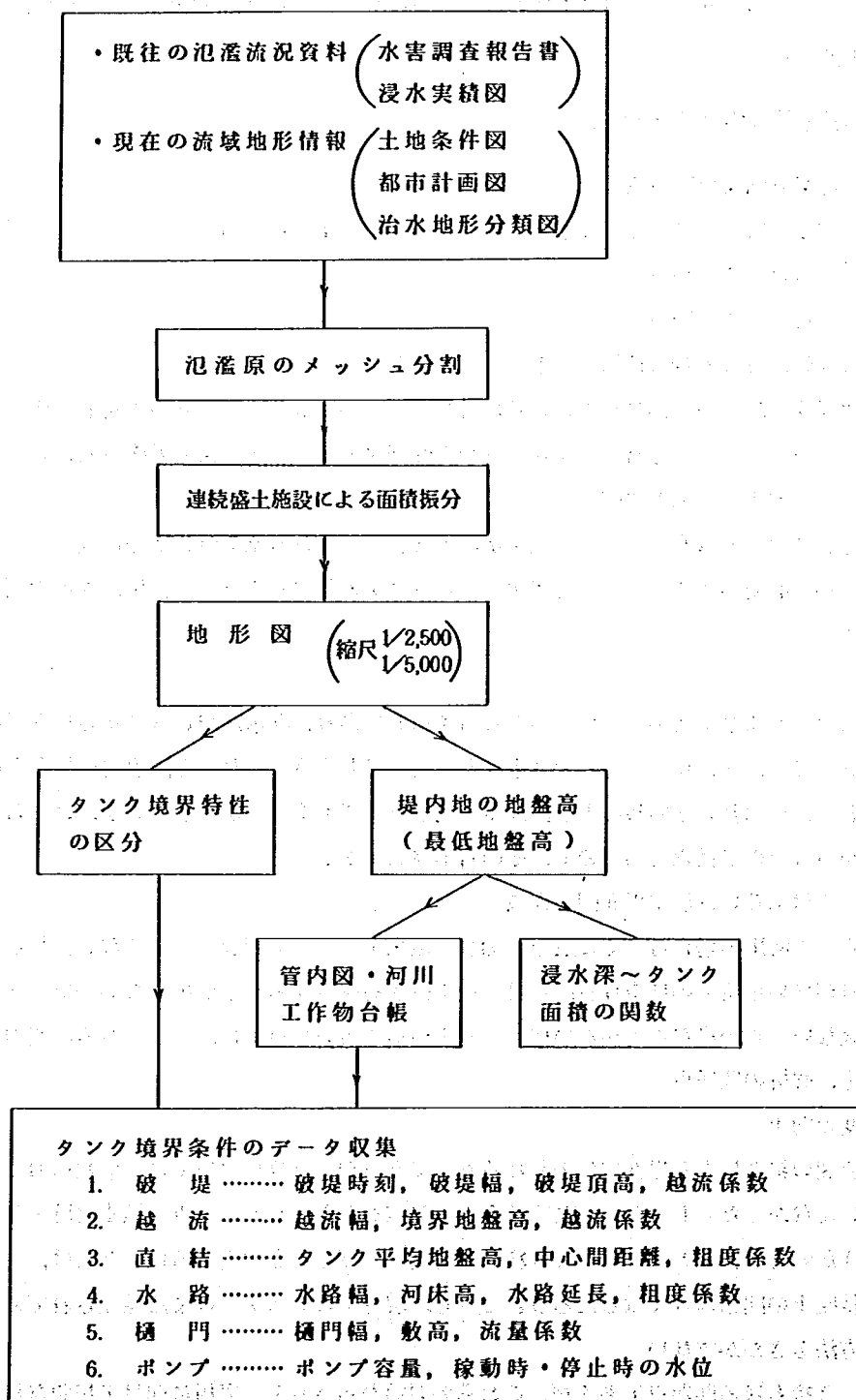
- ・精度の向上

流速の精度はある程度信頼のおけるものであるが、水位については、信頼のおけるものとはいえなかった。しかし、それら精度上の欠点をおぎなう為の調査（洪水痕跡・聞き込み調査）が同時に行なわれ、それら資料から精度を上げることが出来る様になれば、実用に際して精度上の問題はなくなるだろう。しかし、現在そのシステムはまだ確立されておらず、その方法もさだかでない。

以上が、今後に残る問題点であるが、これらの対策が示されて、実用に向けて早急な検討がなされることが望まれる。

参 考 資 料 (2)

氾濫原情報の整理手順



氾濫シミュレーション

土木研究所資料第1922号
昭和58年2月(1983)

一氾濫原の合理的な土地利用を目指して一

キーワード：氾濫シミュレーション，土地利用調整，
洪水流航測分析，洪水危険地図

要旨

本報告書は，水害に強い地域づくりを考える為に氾濫シ
ミュレーションや洪水流航測分析を行って氾濫域を想定し
たものである。



郵便はがき

3 0 5 - □ □

は40
円切
手
を
い
は
つ
て
下
さ
い

茨城県筑波郡
豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
総合治水研究室
御中

No.

配布先氏名

配布先住所



No.

土木研究所資料第1922号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印