

## II-36 洪水流出の基本的特性と ハイドログラフの 形成過程に関する研究

北海道大学工学部 正 員 山 田 正

北海道大学工学部 学生員 豊 田 康 嗣

### 1. はじめに

本研究は一般河川における洪水ハイドログラフの形成過程とその特性を調べたものである。対象としたのは北海道内の鶴川と石狩川である。鶴川については昭和56年から昭和63年の8年間の水位・流量データを用い、洪水の伝播速度等の諸々の特性を調べてみた。次に石狩川流域を対象として不定流近似計算を行った。この近似理論の特徴は観測データである水位・流量曲線を使い流量計算を行うもので、単純たし合わせ、Kinematic wave式、および、Kinematic wave+拡散項を有するモデル式の相互の比較を行っている。これら3つのモデルに支川から本川への流入ハイドログラフを与えて、本川下流におけるハイドログラフの形成とその特性について検討している。ところで石狩川は明治時代末期から大幅な河川改修が行われているが、本研究では河川の地形変化に伴う流出過程の変化についても考察を加えている。

### 2. 鶴川における洪水の伝播速度の特性

鶴川は全長130km、流域面積1238km<sup>2</sup>と流域形状が細長い河川である。観測地点は上流から福山、穂別、栄、鶴川の4地点で昭和57年から63年までの5月から11月までのハイドログラフがはっきりみられるものについて、ピーク流量とそのときの伝播速度をだしてみた。図1は栄～鶴川間における伝播速度と鶴川でのピーク流量との関係を示すものである。これからわかるように伝播速度は流量が300m<sup>3</sup>/s以下のものはピーク流量には依らない様にみえる。この原因については後述する。

次に鶴川観測所において洪水のピーク流量が100m<sup>3</sup>/s以上のもの（融雪時を含む）を取り出して各観測所間の洪水における伝播時間をだし整理した（図2）。図中の破線はデータのちらばりの90%線を示している。これから算出される伝播速度は福山～穂別間で約2.7m/s、穂別～栄間で約2.1m/s、栄～鶴川間で約1.6m/sと上流から下流に進にしたがつて遅くなるということがわかる。

### 3. ハイドログラフの形成過程とその特性（石狩川を対象として）

#### 3-1 基礎式

流量の計算にあつたつては

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = -q \quad (q: \text{単位幅当りの横流入量}) \quad (1)$$

$$\text{運動の式} \quad \frac{\beta}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{\alpha v^2}{2g} \right\} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{v}{2gA} (\alpha - \beta) \frac{\partial A}{\partial t} = - \frac{\tau_0}{\rho g R} \quad (2)$$

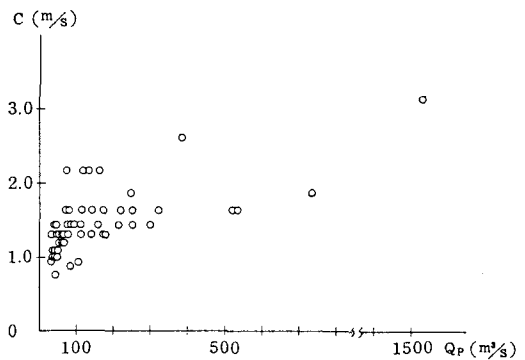


図1 栄～鶴川間での伝播速度とピーク流量

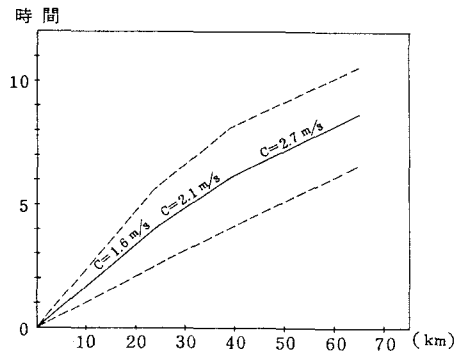


図2 河口までのピーク流量の到達時間

以上2つの式を変形すると

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{dQ}{dA} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q}{2B^i} \left\{ \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \right\} + \frac{dQ}{dA} q \quad (3)$$

となる。これはKinematic wave式に拡散項を付け加えた不定流近似式である。さらに

$$\frac{dQ}{dA} = \frac{dQ/dh}{dA/dh} = \frac{dQ/dh}{B} \quad \text{よって} \quad \frac{dQ}{dA} = \frac{2a(H-b)}{B} = \frac{2a}{B\sqrt{a}} = \frac{2\sqrt{a}}{B} Q^{1/2}$$

となり(3)式は以下の式に変形される。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2\sqrt{a}}{B} Q^{1/2} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q}{2B^i} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{2\sqrt{a}}{B} Q^{1/2} q \quad (4)$$

(4)式は各観測所地点の水位・流量曲線を使うところが特徴である（以下この式をKD式と呼ぶ）。本研究では(4)式とそれから拡散項である右辺第1項を取り除いた式すなわちKinematic wave式:(5)式と、Kleitz・Seddonの法則から $5/3v=\text{const.}$ とした単純たし合わせの式:(6)式を使い相互の比較を行う。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2\sqrt{a}}{B} Q^{1/2} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{2\sqrt{a}}{B} Q^{1/2} q \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{5}{3} v \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{5}{3} v q \quad (6)$$

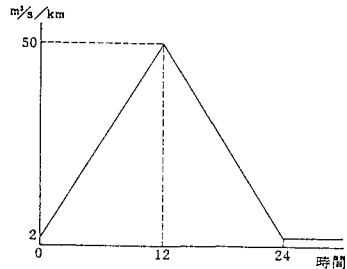


図3 基準横流入量

### 3-2 モデル式の比較

本研究では、支川からの流入量 $q$ の算出にあたり本川の0~200km間を20kmずつ分割し、区間流域面積（その間に入り込む支川からの流域面積の和：図4参照）をだし、その大きさに横流入量が比例する（1洪水での各支川のピーク流量は流域面積に比例すると仮定する）ものとして1kmあたりの横流入量を定めている。また計算を行う際に基本となる横流入量、すなわち平均流域面積をもつ区間の1kmあたりの横流入量を図3に示す。上流端は河口から200km地点とし、ここでの境界条件を図3と同じ時間幅の三角形形状のハイドログラフ等を与えている。

#### 3-2-1 単純たし合わせ式とKD式との比較

まず図3に示した基本条件下で、単純たし合わせ式:(6)式とKD式:(4)式を計算し比較してみた（図5参照）。図6は20km地点毎におけるピーク流量に関し、式(6)の伝播速度 $C$ を $5v/3=1.0, 2.0, 3.0, 4.0$ (m/s)とした場合についてそれぞれ示したものである（実線：KD式、破線：単純たし合わせ式）。河口から100kmより上流ではピーク流量として単純たし合わせの $C$ が $5v/3=3.0$ m/sのとき両者は一致している。それより下流では $5v/3=2.0$ m/sのときに両者のピーク流量が比較的よく合うことが判明した。しかしKD式を用いた結果では河口より80km~河口までのピーク流量の伝播速度は $4.23$ m/sであり、 $5v/3=2.0$ m/sと合わない。これは図5をみてみるとわかるように両者のピーク流量は合ってもピーク出現時間は全く合っていない。よってKD式と単純た

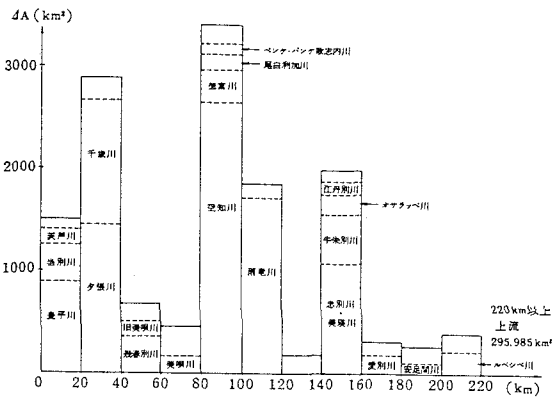


図4 石狩川の区間流域面積

$p-T_a$ に与える $Q_{ap}$ と $T_s$ の影響を検証してみた(図9参照)。

### 3-3-1 ピーク流入量 $Q_{ap}$ の効果

図10は、ピーク流入量 $Q_{ap}$ においてピーク流入量比 $\alpha$ (図3のものを $\alpha=1.0$ とする。)を定義し、 $\alpha$ を0.2, 0.4, ..., 2.0倍にしたときに計算された河口におけるハイドログラフを示すものである。当然のことながら $\alpha$ が増すにつれ $Q_p$ は大きくなり $T_L$ は短くなることがわかる。また $\alpha>0.8$ になると

$Q_p=9753\alpha-3291$ と $Q_p$ は $\alpha$ とともに線形に増大している(例えば $\alpha=1.2$ のとき $\alpha=1.0$ のとき比べて $Q_p$ は1.3倍増大する)。一方 $\alpha<0.8$ のとき $Q_p$ と $\alpha$ が1次関数であらわさないのは、本川の流量が小さくなると流速も小さくなり支川と本川との合流がずれてしまい下流のピーク流量が小さくなってしまうためである。遅れ時間 $T_L$ は $T_L=1.04\alpha^{-0.71}$ とべき乗関数で表される。ちなみに $\alpha=1.2$ のとき $T_L$ は $\alpha=1.0$ のときの0.9倍短くなっている。流量と遅れ時間差との関係は $T_p=865Q_p^{-0.51}$

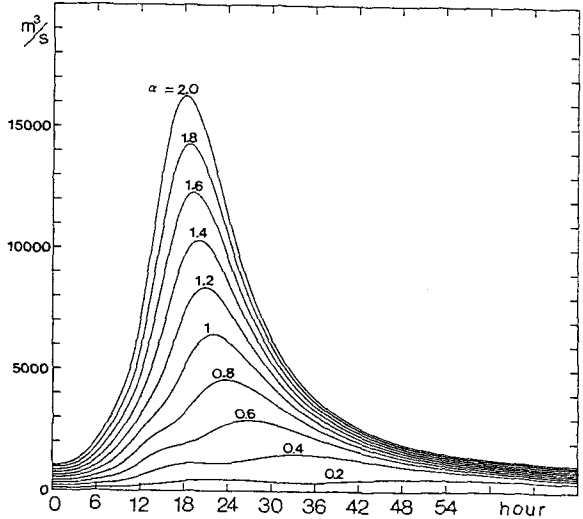


図10  $\alpha$ の変化による河口のハイドログラフの遷移の関係で示された。

### 3-3-2 支川の洪水流出時間幅 $T_s$ の効果

図11は $T_s$ を6時間、12時間、..., 72時間と変化したものの河口におけるハイドログラフである。ピーク流量が増大するにつれ、その出現時刻はしだいに早くなる。ここで流出時間比 $\beta$ ( $T_s=24$ 時間のとき $\beta=1.0$ )と、ピーク遅れ時間指数 $l_q$ ( $=T_L/T_s$ :図9参照)を定義する。 $l_q$ は流出時間幅に対する遅れ時間差の比であり、これが大きいと流出時間幅が短いにも関わらず流量の大小に関係なく洪水が長引いていることである。逆に $l_q$ が小さいと流出時間幅が長いにもかかわらずピーク到達時間が早いことを意味する。 $\beta$ と $l_q$ の関係は $l_q=42.4\beta^{-1.43}$ であり、 $\beta$ が増すと $l_q$ はゆっくりと減少していく。ある $l_q$ 以下(河口:0.45)になると

$Q_p=-1.90l_q+1.81$ と $l_q$ とピーク流量は1次関数であらわすことができる。 $l_q>0.45$ の場合 $Q_p=0.52l_q^{-0.77}$ と1次関数にならないのは(4-3-1)のときと同様である。また遅れ時間 $T_L$ と流出時間幅比 $\beta$ との関係は $T_L=41.2\beta^{-0.43}$ とべき乗関数となっている。

### 3-3-3 ピーク流量と伝播速度の関係

3-3-1と3-3-2の結果から河口より上流80km地点から河口までのピーク流量の遅れ時間から求めた伝播速度と河口でのピーク流量との関係を示したのが図12である。この図より伝播速度 $C$ は、 $C=a \ln Q_p + b$ (河

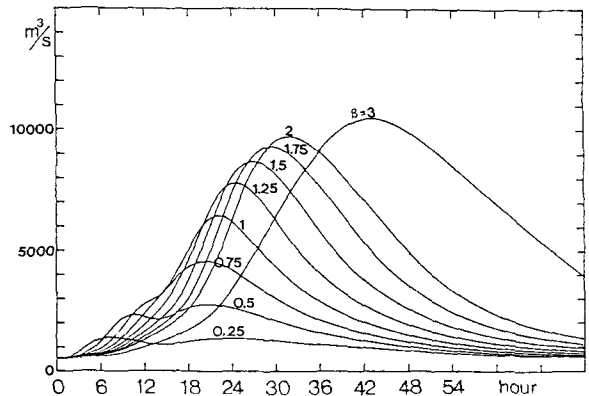


図11  $\beta$ の変化による河口のハイドログラフの遷移

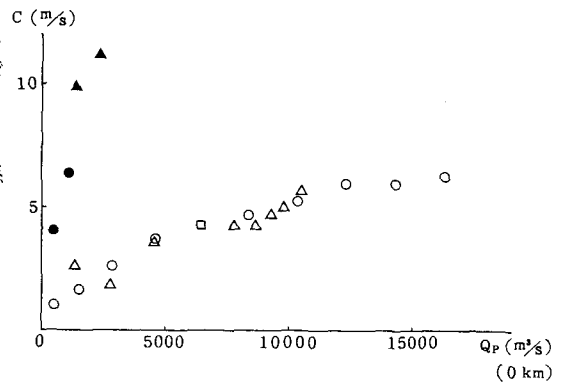


図12 数値実験での伝播速度とピーク流量の関係

し合わせ式を比較するとピーク流量が一致してもその出現時間については正確ではなく、その傾向は下流部において顕著である。

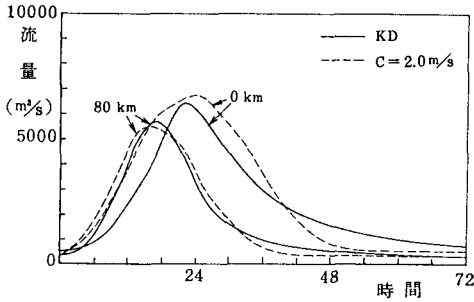


図5ハイドログラフの比較  
(河口より0KM、80KM)

### 3-2-2 Kinematic wave式とKD式との比較

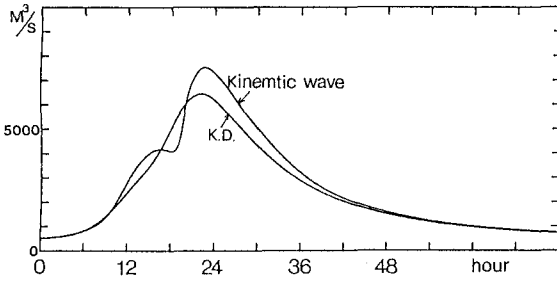


図7河口におけるハイドログラフの比較

本川への基準流入量(図3参照)を0.2~2.0倍した10通りのパターンを用いKD式の拡散項がどのような条件で効き出すのか検証してみた。図7は基準流入量を用いたときの両者の結果と比較したものである。両者のピーク流量の出現時刻は大きく変わらないが、ピーク流量は下流にいけばいくほどKinematic wave式のほうが大きくなっていく様子が伺える。図8ではどの地点からKinematic wave式とKD式とが違ったピーク流量を出すのかを示した。河口より100km上流までは、どんなに流入量が増えても両者の違いはあまりみられない。しかし流量が $3000\text{m}^3/\text{s}$ 以上になると河口より100km以下ではKinematic wave式のほうが大きい値を示し、流量が大きくなればなるほど、そして河床勾配が小さくなればなるほど両者の差は増している。河口から80~100km間の平均河床勾配は約 $1/1700$ であり、以上の結果から $1/1500$ より緩やかな勾配をもつ河川で洪水の計算を行う場合には、拡散項を考慮しなければならないことがわかる。

### 3-3 支川のハイドログラフの変化に伴う本川下流におけるハイドログラフの形成とその過程

各地点から本川に流入するハイドログラフの形をピーク流量 $Q_p$ と流出時間幅 $T_s$ である三角形とする(基準となるのは図3である)。このとき本川下流における洪水のハイドログラフにおいてピーク流量 $Q_p$ とその遅れ時間 $T_L$ (=T

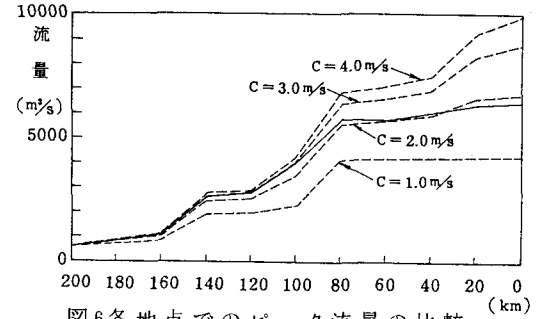


図6各地点でのピーク流量の比較  
(実線: KD式、点線: 単純なし合わせ式)

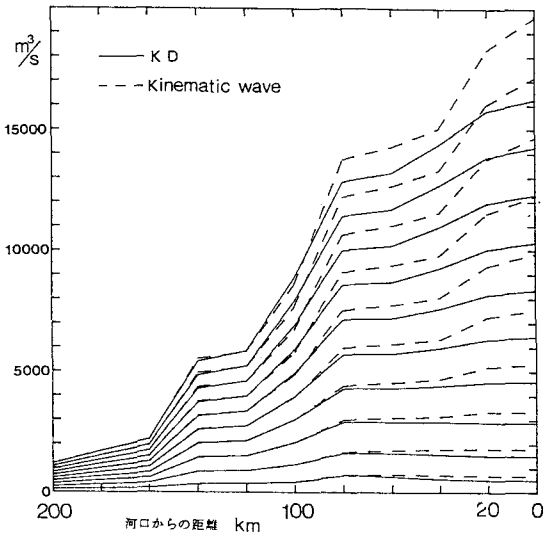


図8 河口からの距離に対する  
ピーク流量の変化

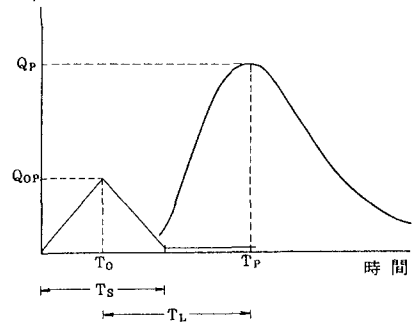


図9流出時間幅 $T_s$ と  
遅れ時間 $T_L$ の定義

口地点： $a=2.14$ ,  $b=14.4$  河口より20km上流地点： $a=1.53$ ,  $b=9.58$  の対数式で表し得る（図13）。ちなみにさきほどの $\alpha=\beta=1$ のときの伝播速度は $C=4.23\text{m/s}$ となる。

#### 4. 河川の地形変化に伴う洪水流出の変化

上記の計算で使用した拡散項を付け加えた式：KD式によって現在まで起こった洪水を再現した。対象としたのは昭和50年8月と明治37年7月洪水である。両者は洪水時の気象条件はよく似ており各観測所での3日間降水量もほぼ同様の値を示している。この2ケースの比較を行うことにより河川の地形変化に伴うハイドログラフの変化を検討してみた。

##### 4-1 昭和50年8月洪水の再現

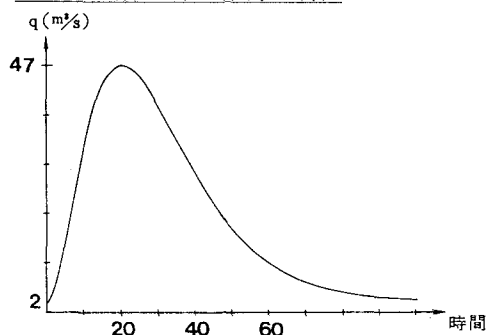


図14洪水再現に用いた横流入量のハイドログラフ

昭和50年8月洪水の計算にあたり平均区間流域面積における横流入量を図14に示したガンマ関数で表える（このとき $A=47\text{m}^3/\text{s}$ 、 $B=2\text{m}^3/\text{s}$ と3日間降水量から算出）。この流量を大きな支川で幾つか当てはめてみたところ、比較的よくあうことが確認された。大きな支川におけるピーク流量の出現時刻は、豊平川、千歳川を除くとほぼ同一時刻に発生しているので（図15）支川ハイドログラフのピーク時刻はすべて同一時刻とした。図16は計算結果である。計算結果のピーク流量は実際水が溢れなかった場合の今まで求められた予想流量とほぼ同じで、その遅れ時間 $T_L$ においてはほぼ同じ時間（実際12時間、計算11時間45分）でありこの近似式は石狩川の流量計算に十分使うことがわかる。

##### 4-2 洪水ハイドログラフに与える川幅の効果

明治37年の洪水再現計算を行うにあつては河床勾配はおおよそわかっている。しかし当時の川幅をどうするかという疑問を解くために、現在の水路において川幅を0.4～3.0倍にして計算し、ピーク流量 $Q_P$ とその遅れ時間差 $T_L$ が、どれだけ川幅によって左右されるかを確かめてみた。ただし支川からの横流入は図3の条件と同じものとする。川幅比 $\gamma$ を今までに計算してきたものの幅において1とした場合、各川幅比における河

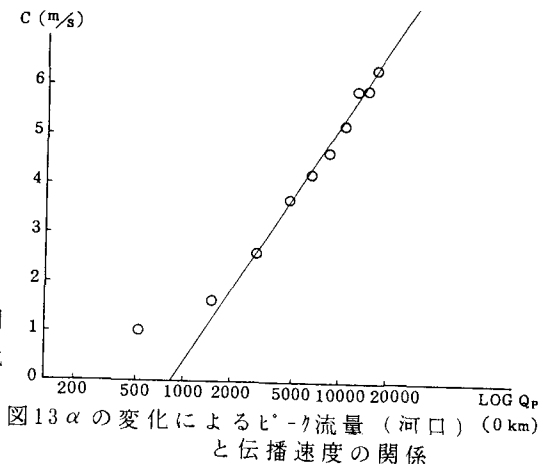


図13  $\alpha$  の変化によるピーク流量（河口）（0 km）と伝播速度の関係

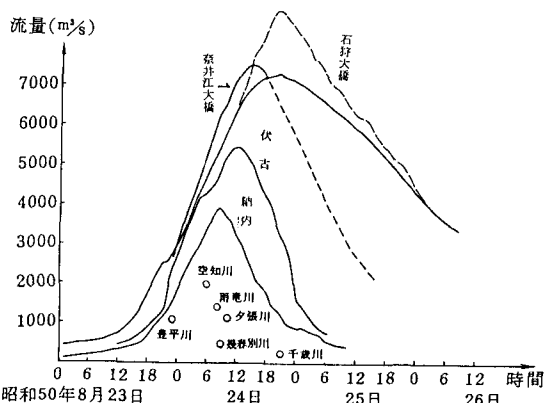


図15石狩川昭和50年8月洪水のハイドログラフ（○は主な支川のピーク流量とその発生時刻）

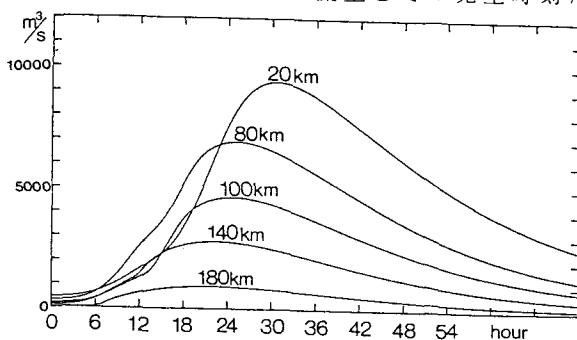


図16数値計算での再現ハイドログラフ

口でのハイドログラフを図示したものが図17である。この図より川幅を広くすることにより洪水のピーク流量は逓減され、その発生時刻は遅くさせられるという結果がでた。川幅比 $\gamma$ とピーク流量 $Q_p$ の関係は  $Q_p = \text{EXP}(-0.44\gamma)$  であり川幅が小さくなるとピーク流量は指数関数で増大することを表している例えば $\gamma=0.4$ のときピーク流量は1.3倍に増大してしまう。遅れ時間 $T_L$ と $\gamma$ の関係は  $T_L = 7.58\gamma + 2.46$  と1次関数で表され、 $\gamma=0.4$ のとき $T_L$ は半減してしまうほど洪水の伝播速度は増大する。

#### 4-3 明治37年7月洪水の再現計算

ショートカットによって短縮された長さ(約80 km)を加えて過去の河床勾配に戻す(図18)。明治37年7月と昭和50年8月の支川における流出量は同じものとする。川幅も昭和50年のものと同じものとしたときの河口から20km地点における昭和50年と明治37年のハイドログラフを並べたのが図19である。河道が短くなった分だけ現代のほうがピーク流量は1000 $\text{m}^3/\text{s}$ 以上大きく、ピーク出現時刻は約8時間早くなっている。しかし現在までの河川改修で高水敷などを設けたことによって川幅は広がっている。例えば明治37年の川幅が現在の約半分であったとするとピーク流量もその到達時間も同じ降雨量で流れた昭和50年の場合のハイドログラフと大差がないという結果となる。このことから、河川をショートカットした分ピーク流量は増大し出現時間も早まってくるが、逆に川幅の拡張や河道の整齊、改修によりピーク値を下げその出現時刻も遅らせているということが言えよう。

#### 謝辞

本研究は重点領域研究(1)「気象解析とレーダー雨量計を補完的に組み合わせた豪雨災害の予備手法に関する研究」(代表:山田正、北大)の補助のもとに行われている。また本研究の遂行にあたり、北海道開発局石狩川開発建設部より貴重なデータを提供していただいている。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 椿東一郎: 水理学Ⅱ、森北出版。
- 2) 館谷清・山田正: 小流域からの流出の合成に基づく大流域の流出特性の形成に関する研究、水文・水資源学会研究発表会要旨集、1989。

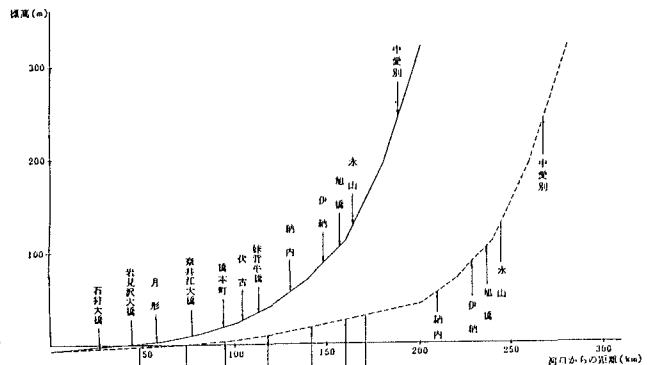
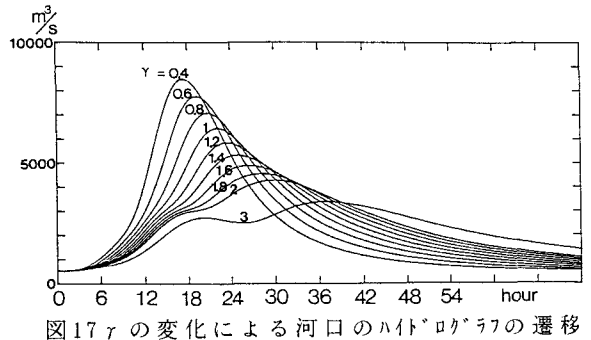


図18計算で用いた河床縦断面図  
(実線: 昭和50年、点線: 明治37年)

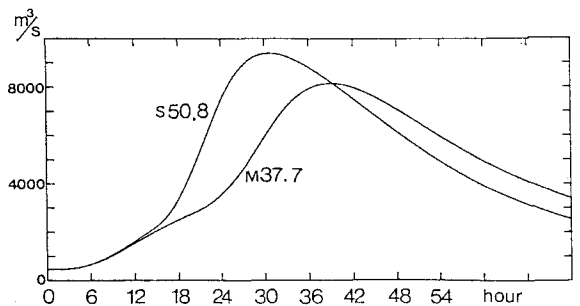


図19現在と過去によるハイドログラフの比較  
(現在の河口より20KMのもの)