

# 河川における汚染物質の拡散混合に関する数値実験的研究

富 所 五 郎・川 上 浩

信州大学工学部

## 2-D Numerical Analysis of Mixing of Contaminants in River

Goro TOMIDOKORO and Hiroshi KAWAKAMI

Faculty of Engineering, Shinshu University

**Key words :** Mixing of Contaminants in River, 2-D Numerical Analysis, Flow in River

河川における汚染物質の拡散混合、二次元数値解析、河川の流れ

### はじめに

長野県水環境条例では、第1章第1条で「この条例は、・・・、水質の監視及び水道水源保全地区の指定等について必要な事項を定めることにより、水環境の保全対策の総合的な推進を図り、もって県民の健康的で文化的な生活を確保することを目的とする。」と、また第4章で「水道水源保存地区の指定」について定められている。

この水道水源保全地区の指定に関わる区域設定は、地表水（河川水、伏流水、湖沼水、ダム水）と地下水（浅層地下水、深層地下水）に区分し定められている。前者の地表水のうちの河川水については、「水道原水の取水地点に対する集水域のうち、排水が十分に希釈されないで取水地点に到達する可能性のある区域を基本とし、取水状況、河川の形状及び流水、水質等の状況、集水域の状況等を考慮して設定する。」を基本的な考え方としている。

本研究は、河川水に対する水道水源保全地区の区域設定の基準づくりの基礎データを得るために、千曲川と犀川の代表的な河床勾配の3区域をモデルとして、流れによる汚染物質の拡散混合の数値シミュレーションを行ったものである。

解析条件としては、平水流量が定常状態で流れている河川へ河岸から一定量の汚染物質を連続的に流入させる場合で、汚染物質を含む排水量に対して河川流量が豊富で、汚染物質が十分に希釈されることを想定している。

### 基礎方程式と数値計算法

本研究では、流れと汚染物質の拡散混合は水平2次元、つまり流速や汚染物質濃度は鉛直方向に一定とする。もちろん、これらの物理現象は3次元であるが、河川の流れは川幅に比べ水深が浅いため2次元性が強いこと、解析が大変であること、3次元的に扱った方が汚染物質の拡散混合が促進され安全になる等により、水平2次元の取扱いとしている。

さらに、汚染物質を含む排水の水温や比重が河川水のそれらと異なると汚染物質は流れを変化させるが、流れが強いため河川水と排水は速やかに混合することと、解析の困難さを考慮して、ここでは汚染物質は流れに影響を与えないものとする。このときは、流れは拡散混合に関係なく別個に解かれ、得られた流れの結果を用いて拡散混合解析が行われる。

流れや拡散混合を支配する微分方程式の数値解析法としては、複雑に変化する解析境界を精度良く近似できると境界条件の取扱いが容易であること等のために、空間変数の離散化に対しては有限要素法を適用する。また、流れの定常解は、基礎式が非線形であるので境界条件を一定とした非定常解析より求めているが、その時間積分法としてはRunge-Kutta法を用いている。

基礎方程式と数値計算法の詳細は、文献1)を参照されたい。

## 数値シミュレーション

## 1. 対象河川

千曲川と犀川の代表的な河床勾配の3区域をモデルとして、流れによる汚染物質の拡散混合の数値シミュレーションを行う。表-1に解析対象の千曲川2区域、犀川1区域のそれぞれの区間長、平均河床勾配、解析下流端の平水流量などを示す。なお、事例A-1, 2では、2支川で合計9.4m<sup>3</sup>/s流入量があるため、上流端の

平水流量は35.4m<sup>3</sup>/sである。汚染物質流入量としては、それぞれ2ケースを想定して、計6事例についてシミュレーションを行った。

それぞれの対象河川の解析区間は低水路の流水部とし、そこに有限要素法を適用するための三角形メッシュ分割を行った。有限要素としては三角形一次要素を用いたが、メッシュの各節点の水深は、建設省測定の結果より決めた。

表-1 対象河川

| 事 例    | 河川名 | 区間長<br>(km) | 河床平均勾配 | 平水流量<br>(m <sup>3</sup> /s) | マニング粗度係数<br>(s/m <sup>1/3</sup> ) | 拡散係数<br>(m <sup>2</sup> /s) |
|--------|-----|-------------|--------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| A-1, 2 | 千曲川 | 2.3         | 1/ 180 | 44.7                        | 0.040                             | 0.1                         |
| B-1, 2 | 千曲川 | 3.2         | 1/1500 | 189.0                       | 0.020                             | 0.1                         |
| C-1, 2 | 犀 川 | 2.6         | 1/ 500 | 96.8                        | 0.035                             | 0.1                         |

## 2. 境界条件とその値の決め方

流れ解析の境界条件として、上・下流端それぞれの流速、水位を拘束した。しかし、これらの値を決める適当な観測データはない。そこで本研究の流れの解析結果は、マニング粗度係数を解析領域で一定とし、境界条件とした上・下流端それぞれで平水流量を満足する流速、水位を適当に変えて計算を行い、そのうちで上・下流端付近での水位が最もスムーズに変化する場合の結果とした。つまり、この時の水位、流速が境界条件の値である。なお流れの解析では、排水の流量は、後に示すように河川流量に比べ非常に小さいので無視している。

つぎに汚染物質の拡散混合の境界条件として、まず排水の拡散の影響のない上流点を上流端として汚染物質濃度を零とした。また、川岸の排水流入地点で汚染物質濃度（以下では流入濃度とする）を一定値に拘束した。ここで、流入濃度は、排水の流量・流入速度・流入角度等の排水流入条件、河川の流速・水深等の河川条件の他に有限要素メッシュ幅など数値計算条件にも依存し、その値の決定は非常に難しい。これに対して、排水路を解析に組み込んで排水濃度を用いる解析法もある。しかしこの解析法は、排水流入条件の設定が難しいこと、排水流入条件に応じた流れ解析を必要とすること、排水路では細かい有限要素メッシュを必要とし計算時間が非常に長くなることなどのため、その採用も難しい。そこで本研究では、流入濃度を、汚染物質が河川水に完全混合した場合の濃度と数値解析結果

より求めた下流端の平均濃度が一致するよう決めることにした。この方法は、拡散混合の基礎式が線形であるので、簡単に実行可能である。

## 3. 粗度係数と拡散係数

自然河川のマニングの粗度係数は、河床土砂の粒度、河床形態、水深等によって変化し、これを正確に算定するのは難しい。一般的には、流量と水面形の観測データがあれば、これらより同定するのが最も正確である。本研究では、河床勾配と2. の流れの境界条件の値の決め方に関連させて、表-1の値とした。

物質の拡散係数は、ここでは流速を水深方向一定とした影響の入った係数、つまり分散係数であるが、これは乱れの強さや流速の水深方向分布などの流れ特性の他にメッシュの大きさ等の数値計算条件によっても変化する。一般には観測や乱流モデルを組み込んだ流れ解析より決めるべきであるが、本研究ではメッシュの大きさなどより表-1の値とした。なお、拡散解析においては、パルス状の境界条件を課した場合には、結果の一部に負の濃度がでてしまうことがある。これは拡散係数が小さいほど顕著になり、本研究でも幾つかの節点で負の濃度がでてしまったが、これらは零に置き換えることにより処理した。

## 4. 結 果

表-2に汚染物質の拡散混合の数値シミュレーション結果一覧表を、図-1～6に汚染物質濃度の分布を

## 河川における汚染物質の拡散混合に関する数値実験的研究

示す。ここで、表-2の排水流入量は以下を参考に決めていた。県内の水質汚濁防止法等による20008の特定事業所のうち、日排水量が $500\text{m}^3/\text{日}$  ( $0.0058\text{m}^3/\text{s}$ )以上のものは191事業所(1.6%)である。そのうち $20,000\text{m}^3/\text{日}$  ( $0.23\text{m}^3/\text{s}$ )以上のものは、下水道終末処理場9、し尿処理場1の計10事業所である。つまり、長野県では $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 以上を排水する事業所は、全て公共的な10事業所に限られているが、排水量としてはこれらの事業所のものを想定している。また、図において、1/10、1/20、1/50、1/100は、排水濃度がそれぞれ10、20、50、100分の1になる地点を示している。

図表より、河川水中の汚染物質濃度が排水濃度の1/10に希釈されるまでの流下距離は、排水流入量を河川

の平水流量の1/190程度 ( $0.25 \sim 1\text{m}^3/\text{s}$ )とした場合には、A-1、B-1、C-1のいずれの事例においても100m未満であり、排水流入量を河川の平水流量の1/50程度 ( $1 \sim 4\text{m}^3/\text{s}$ )とした場合でも、200m～450mの範囲である。一方流入濃度に着目した場合でも、河川水中の濃度がこれらの濃度の1/10に希釈されるまでの流下距離は230m～760mの範囲である。

また、図において、汚染物質濃度は排水流入地点側の岸より離れるに従い小さくなり、反対の岸では、全て汚染物質が河川水と完全混合した場合の濃度を下回っている。これは、水平二次元とした仮定により、汚染物質が河川を横断するとき、全ての流量の河川水と混ざり合うことによる。

表-2 汚染物質の拡散混合の数値シミュレーション結果一覧表

| 事 例 | 汚染物質<br>流入量<br>(※1) | 排水が河川水に<br>完全混合した時<br>の濃度 (※2) | 排 水<br>流入量<br>(※3)    | 排水<br>濃度<br>(※4)       | 排水流入量<br>平水流量 | 排水濃度の<br>1/10になる<br>までの距離 | 流入濃度の<br>1/10になる<br>までの距離 |
|-----|---------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|
|     | mg/s                | $\mu\text{g}/\text{l}$         | $\text{m}^3/\text{s}$ | $\mu\text{g}/\text{l}$ |               | m                         | m                         |
| A-1 | 25                  | 0.56                           | 0.25                  | 100                    | 1/179         | <100                      | 230                       |
| A-2 | 100                 | 2.2                            | 1                     | 100                    | 1/45          | 200                       | 230                       |
| B-1 | 100                 | 0.53                           | 1                     | 100                    | 1/189         | <100                      | 760                       |
| B-2 | 400                 | 2.1                            | 4                     | 100                    | 1/48          | 450                       | 760                       |
| C-1 | 50                  | 0.52                           | 0.5                   | 100                    | 1/194         | <100                      | 580                       |
| C-2 | 200                 | 2.1                            | 2                     | 100                    | 1/49          | 430                       | 580                       |

(注) 1) 汚染物質流入量を※1のように設定すると、排水が河川水と完全混合したときの濃度は※2となる。

2) 汚染物質流入量を※1、排水流入量を※3のように設定すると、排水濃度は※4 ( $100\mu\text{g}/\text{l}$ )となる。また、例えば、排水流入量を※3のままとして、汚染物質流入量を※1の値の5倍に設定した場合には、排水が河川水と完全混合したときの濃度及び排水濃度はそれぞれ※2、※4の値の5倍となる。

### おわりに

本研究は、千曲川と犀川の3区域をモデルとして、流れによる汚染物質の拡散混合の数値シミュレーションを行ったものである。

解析結果には、排水と河川水の水温差等に伴う密度差の影響や低水流路の変化、排水の流入条件、粗度係数、拡散係数など不確定の要素もあるが、平水流量の1/50程度の量である下水処理場等からの大量排水を想定しても、汚染物質は排水流入点側の岸で、500m以下の比較的短い流下距離で1/10以下の濃度に希釈される。

また、民間の事業所等のもっと排水量が少ない場合はさらに希釈が進む。さらに、汚染物質濃度は排水点側の岸より離れるに従い低下しているので、出来るだけ排水点側の岸より離れた地点で取水する等の配慮により、さらに安全性が高められる。

### 参考文献

- 1) 富所五郎：有限要素法による水理解析、1991年度(第27回)水工学に関する夏期研修会講義集、pp. A-1-1～A-1-17. 1991.

(受付 1994年1月6日)

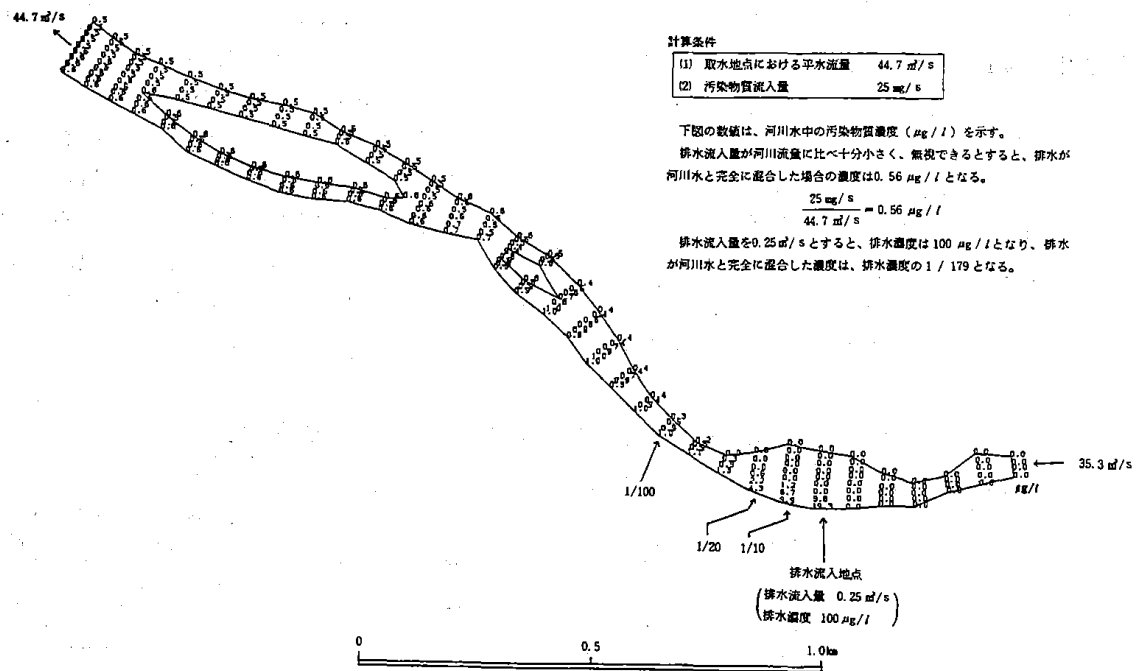


図-1 汚染物質濃度の分布 (A-1)

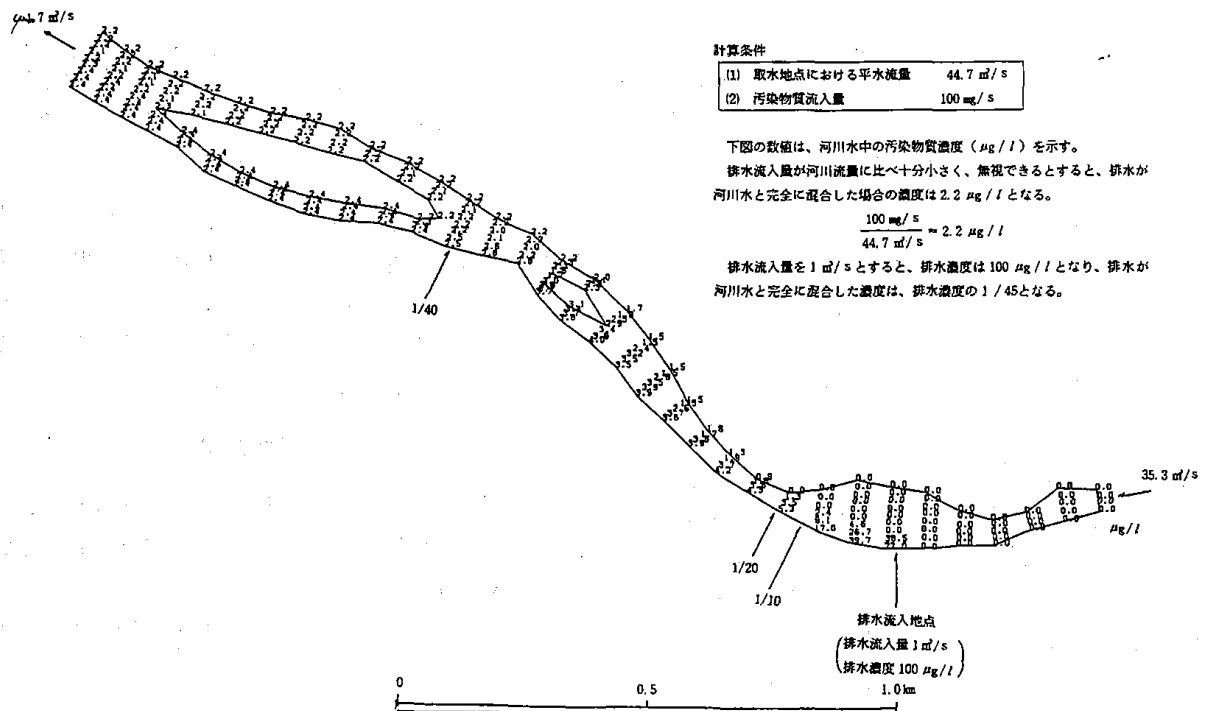


図-2 汚染物質濃度の分布 (A-2)

# 河川における汚染物質の拡散混合に関する数値実験的研究

## 計算条件

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| (1) 取水地点における平均流量 | 189.0 m <sup>3</sup> /s |
| (2) 汚染物質流入量      | 100 mg/s                |

下図の数値は、河川水中の汚染物質濃度 ( $\mu\text{g/l}$ ) を示す。  
排水流入量が河川流量に比べ十分小さく、無視できるとすると、排水が  
河川水と完全に混合した場合の濃度は  $0.53 \mu\text{g/l}$  となる。

$$\frac{100 \text{ mg/s}}{189.0 \text{ m}^3/\text{s}} = 0.53 \mu\text{g/l}$$

排水流入量を  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  とすると、排水濃度は  $100 \mu\text{g/l}$  となり、排水が  
河川水と完全に混合した濃度は、排水濃度の  $1/189$  となる。

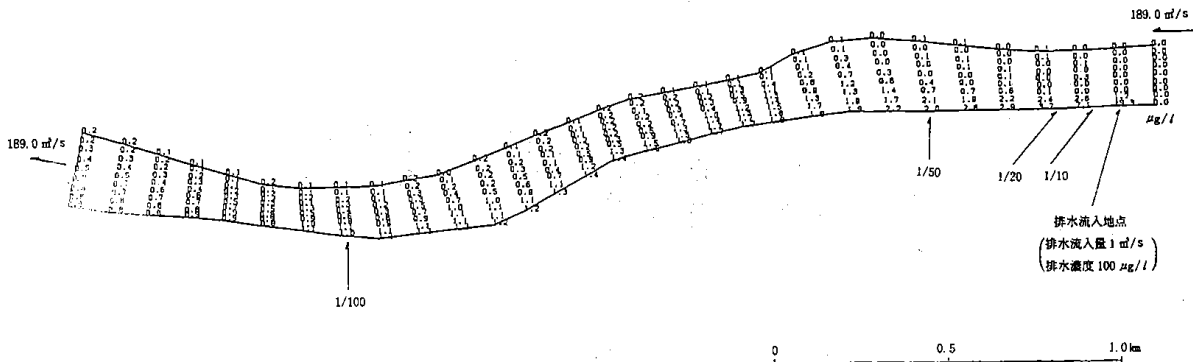


図-3 汚染物質濃度の分布 (B-1)

## 計算条件

|                  |                         |
|------------------|-------------------------|
| (1) 取水地点における平均流量 | 189.0 m <sup>3</sup> /s |
| (2) 汚染物質流入量      | 400 mg/s                |

下図の数値は、河川水中の汚染物質濃度 ( $\mu\text{g/l}$ ) を示す。  
排水流入量が河川流量に比べ十分小さく、無視できるとすると、排水が  
河川水と完全に混合した場合の濃度は  $2.1 \mu\text{g/l}$  となる。

$$\frac{400 \text{ mg/s}}{189.0 \text{ m}^3/\text{s}} = 2.1 \mu\text{g/l}$$

排水流入量を  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  とすると、排水濃度は  $100 \mu\text{g/l}$  となり、排水が  
河川水と完全に混合した濃度は、排水濃度の  $1/48$  となる。

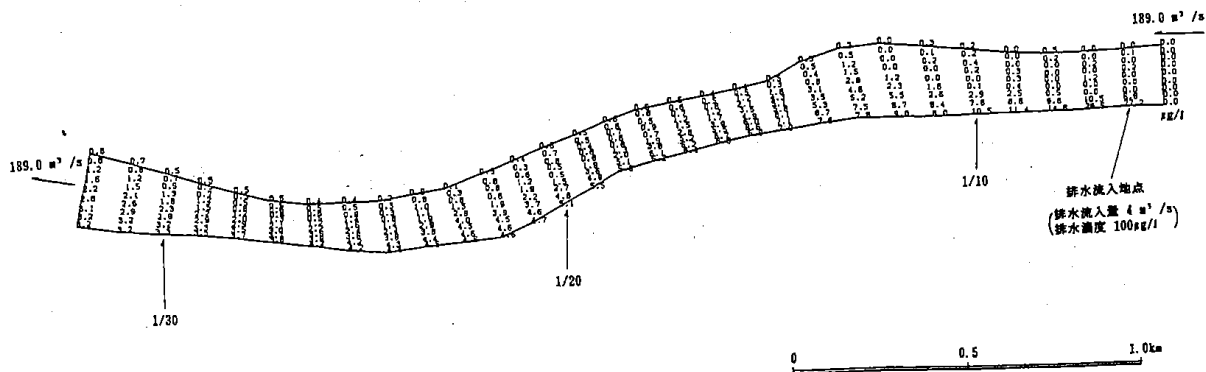


図-4 汚染物質濃度の分布 (B-2)

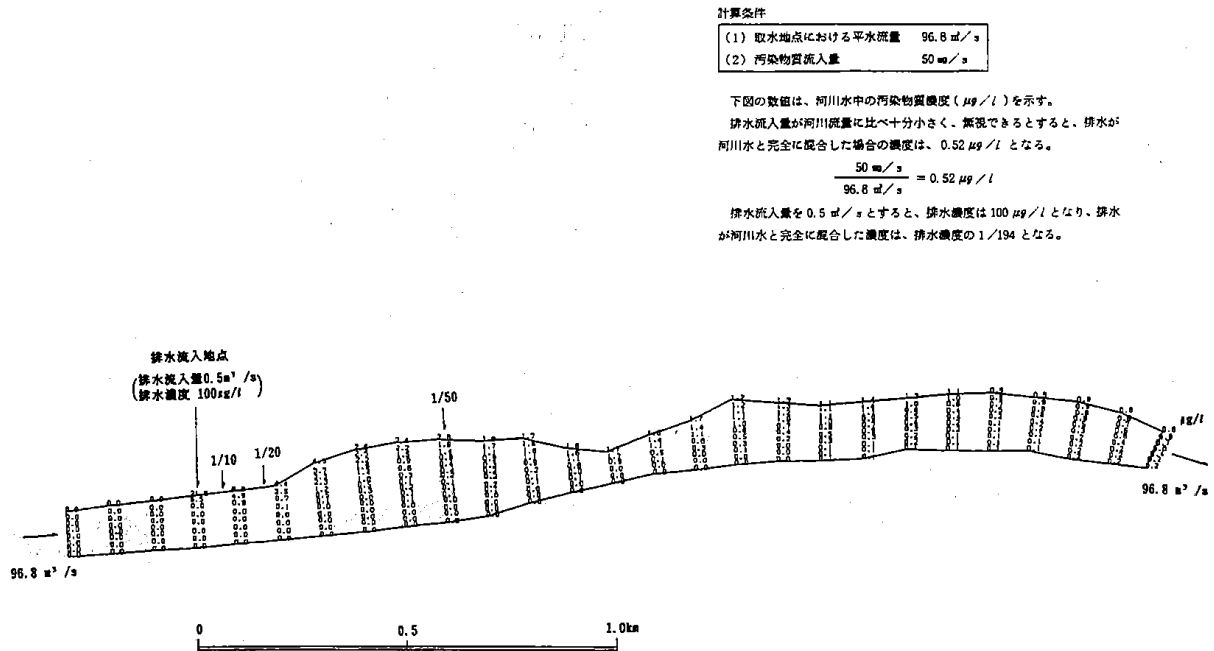


図-5 汚染物質濃度の分布 (C-1)

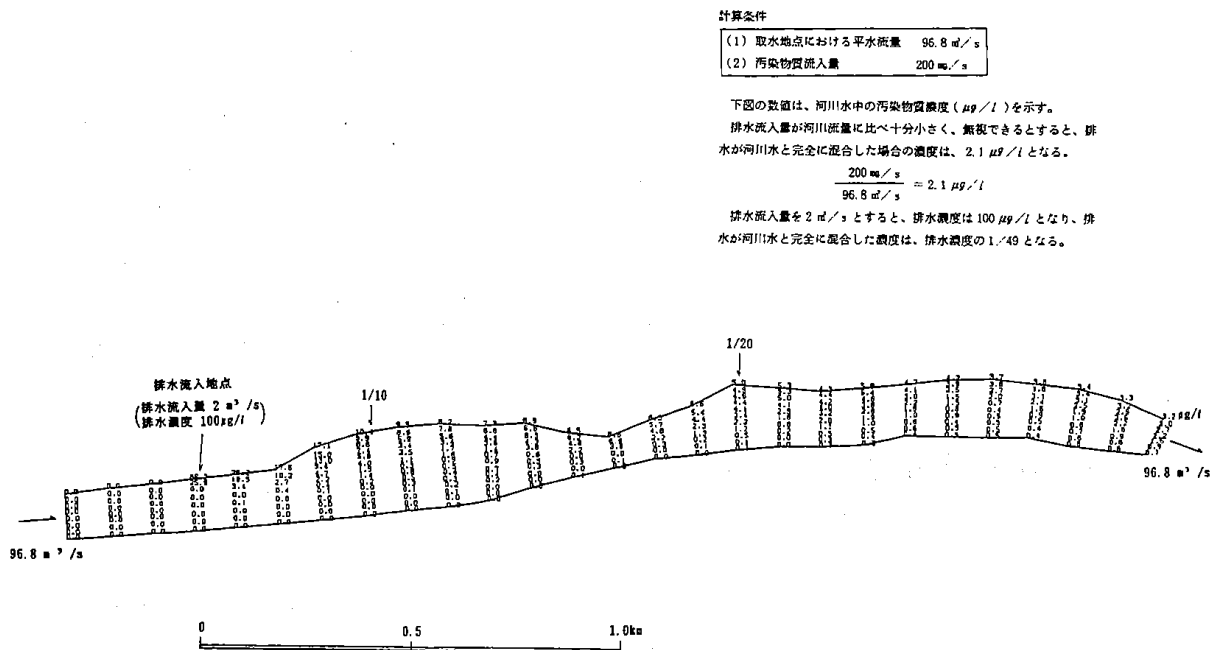


図-6 汚染物質濃度の分布 (C-2)