

II-75

移流拡散を考慮した汚染物質の一次元予測手法

北海道開発局開発土木研究所	正会員	玉川	尊
北海道開発局開発土木研究所	正会員	渡邊	康玄
北海道開発局開発土木研究所	正会員	齋藤	大作
北海道開発局開発土木研究所	正会員	佐藤	耕治
(株)福田水文センター	正会員	甲斐	達也

まえがき

水質事故に迅速かつ的確に対応するためには、事故の早期発見が最も重要なことであるが、同時にその汚染物質の影響の範囲を予測することができれば、下流域での被害の未然の防止や、軽減を図ることが可能となる。このため、汚染物質の影響の範囲を予測する手法の確立もまた重要な課題となっている。

発生した水質事故の汚染物質が、流下過程でどのように変化するかを知るため、第1報<sup>1)</sup>では実際の河川を対象に不活性物質である食塩水をトレーサーとして、その下流域の水質変化を観測し、トレーサーのピーク濃度がほぼ平均流速にしたがって移流し、不等流計算がその流下時間をほぼ近似しうることを確認した。また、第2報<sup>2)</sup>ではトレーサーの流下過程での広がりやを決定する移流拡散係数が、水質濃度を規定する重要な要因と考え、河川形状や流況の異なる実河川を選定して現地調査を行った結果と、アメリカの河川での解析例をもとに、それが川幅・水深比のような河道水理諸元により決定できることを提案した。

本報は、これらの手法を有効に活用するため、1986年に実際に発生した利根川水系の小貝川でのシアン<sup>3)</sup>の流出事故の実測記録を用いて検証を行った。その結果、流下時間は不等流計算による再現方法で十分適応が可能であり、また、水質については、事故当時の水質変化の傾向が実測値に近似し、再現性のある結果が得られた。この検証を踏まえて、北海道において同様にメッキ工場を流域内に有する十勝川をモデルに、水質事故のシミュレーションを試みた。その成果について報告する。

1. 移流拡散係数の推定方法

(1) Fickの拡散方程式

水質変化の推定にはFick拡散方程式を基に、瞬間投入に対して、投入点より下流の $x$ 地点での濃度 $C$ をあらわす次式を用いた。

$$C = \frac{M}{2A\sqrt{\pi Dt}} \exp\left\{-\frac{(x-ut)^2}{4Dt}\right\} \quad (1)$$

ここで、 $M$ は投入量(kg)、 $A$ は流積( $m^2$ )、 $u$ は流速( $m/s$ )、 $D$ は移流拡散係数( $m^2/s$ )をあらわす。

式(1)より、これからある地点で溶解物質を瞬間投入した場合、投入点下流の任意地点における濃度時系列を測定し、移流拡散係数を逆算することを考える。この場合、 $t=x/u$  がピーク時間であり、その時の水質濃度を $C_p$  とすると、式(2)となる。

$$C_p = \frac{M}{2A\sqrt{\pi Dt}} \quad (2)$$

これより移流拡散係数は、次式となる。

---

A ONE-DIMENSIONAL ESTIMATION METHOD OF POLLUTANT DIFFUSION THAT CONSIDERS DISPERSION.

By Takashi TAMAGAWA, Yasuharu WATANABE, Daisaku SAITOU, Koji SATO and Tatsuya KAI

$$D = \frac{l}{\pi} \cdot \left( \frac{M}{2ACp} \right)^2 = \frac{u}{\pi x} \cdot \left( \frac{M}{2ACp} \right)^2 \quad (3)$$

(2) 川幅水深比と移流拡散係数との関係

実河川における移流拡散に関する研究は、色素をトレ

$$\frac{D}{uh} = 5.42 \times 10^{-3} \left( \frac{B}{h} \right)^{2.48} \quad (4)$$

ーサーとしてアメリカの河川でYotsukura<sup>3)</sup> 4) らによっても行われている。Yotukura らと著者らの調査結果について、川幅水深比と断面平均流速で無次元化した移流拡散係数について整理したものが図-1ある。この図より回帰式を求めると、式(4)となる。

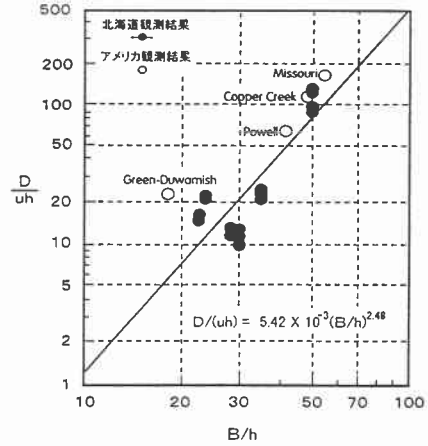


図-1 川幅水深比と移流拡散の関係

2. 実際の水質事故例を対象とした検証

(1) 小貝川の事故概要

小貝川は栃木県南那須町の山地を水源とし、茨城県利根町に南下して利根川に合流する、流路延長111.8km、流域面積1,043km<sup>2</sup>の一級河川である。流域の概略図を図-2に示す。

事故の原因は、1986年4月3日22時頃、農機具や自動車部品のメッキ加工工場の貯留槽から漏出したシアンが、U字溝200mを通り樋管から小貝川に流出した。その結果、魚が約4100匹、690kgが中毒死し、さらに、この河川から取水していた飲料工場が一週間におよぶ取水停止で減産の被害を受けている。

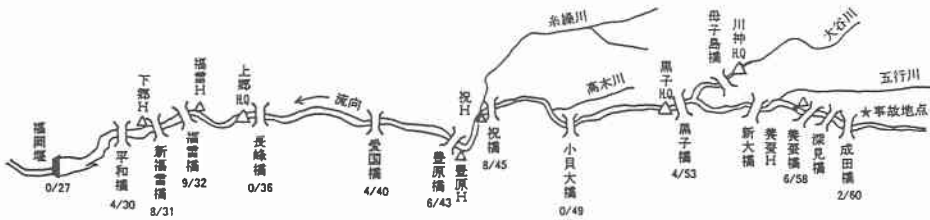


図-2 小貝川の流域概要図

(2) 実測の流下時間と不等流計算による比較

小貝川の流下時間を再現するため、事故当時に最も近い小貝川の縦横断面測量データ (S62.3測量)を基に、200m毎に断面データを与えて不等流計算を行い双方を比較した。

事故時の流下時間は、水質の追跡調査から得られた各地点の汚染物質濃度の時間変化からピーク濃度を推定し、その値からその地点の通過時刻を読みとった。この通過時刻と原因者の事故発生時刻との差を目安の流下時間としている。しかし、原因者の発生時刻は事故の発見時であるため、小貝川への流出時刻は定かではない。このため、実測の流下時間と再現のための不等流計算による結果を比較する場合、原因物質のピーク濃度の推定が明瞭な長峰橋を基準として、その前後

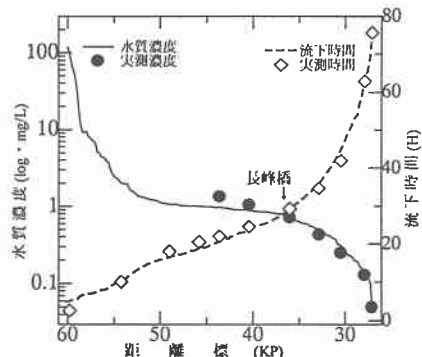


図-3 流下時間と水質変化曲線

の流下時間を比較した。その結果を図-3に示す。

小貝川の調査対象区間 (X=32.5km) の推定記録時間は 73.21時間であるが、再現時間は、72.58時間であった。また、誤差の最大は、長峰橋より上流では 2.53時間(KP.0/60)、下流では2.87時間(KP.6/30)であった。下流での誤差の要因として、事故発生が4月上旬であったため、農業用水に必要な灌漑用取水のため、福岡堰の堰上げによって水位が上昇し、流下速度に誤差が生じたためと考えられる。

不等流計算による流下予測から、事故物質がメッキ工場から小貝川に流入した時刻を推定すると、長峰橋が4月5日3時28分(Cp)が実測値の到達時刻で、この時刻から計算値による到達時間(24.39)を差し引いた時刻となる、4月4日3時5分頃と推定される。

### (3)川幅水深比による水質濃度の比較

水質調査は汚染物質の本川流入点(KP.2/60)で、4日14時から下流の岡北(KP.8/9)までの18地点で採水を行っている。分析方法は、吸光光度法(4-リゾカドニウム酸ヒドロキシド法；定量下限値=0.01mg/L)の他、簡易法による記録があるが、実測値として読みとれるデータは愛国橋、長峰橋、福雷橋、KP.8/27、福岡堰の5地点であった。この他、前後2地点は推定値として参考となる記録が残っており、この記録から算出された汚染物質のピーク濃度と流下距離との関係を求めた。その結果を図-3に示した。

図中には、横断測量データ等から水理諸元を整理し、200m毎の川幅、水深、流速を式(4)に代入して得られた移流拡散係数を用いて、汚染物質の推定ピーク値を算出している。ただし、初期投入量は事故当時の流出量が不明なため、実測値が明瞭でそのピーク値が推定できる長峰橋の Cp=0.73mg/Lに近似するように任意投入量を計算した。このため、実測値との比較は流下時間と同様、長峰橋に合わせて表示している。

再現の結果は、長峰橋より上流の2地点で実測値より予測値の方がやや低い濃度を示した。また、長峰橋より下流は逆に実測値より多少高い傾向を示している。しかし、おおむね事故物質の濃度変化と同様な変動傾向を示し、再現性も高い。

### (4)各地点における流下時間と濃度の比較

事故当時、小貝川では水質の追跡調査として各観測地点で経時変化の調査が行われている。そこで、長峰橋と福雷橋、福岡堰の主要な観測地点における実測の濃度分布と、式(4)より算出した移流拡散係数を用いて推定した計算値との比較を図-4.1、4.2に示した。ここでは、既往のElderの式とHarlemanの式を用いて推定した濃度変化も加えている。

その結果、式(4)の長峰橋が実測値より計算値の方が水質の立ち上がりやや早くなっているが、ピークの少し手前からピーク時付近の濃度は近似しており、さらに濃度の降下曲線からベースラインにかけても、かなり実測値に近い濃度を示していた。

一方、福雷橋では式(4)の計算による濃度曲線が全体的に広がった変化を示している。しかし、実測値の場合は観測数が少ないこともあるが、計算値より小さな濃度変化を示している。この理由として計算値での移流拡散係数が大きいことによるものと考えられる。また、長峰橋の Harlemanの式は実測値より濃度分布が小さく、さらにElderの式は小さかった。この傾向は福雷橋でも同様な結果であった。

福岡堰は、実測値がもっとも多く測定された地点でもあるが、この地点の濃度が0.04mg/Lからシアン定量下限

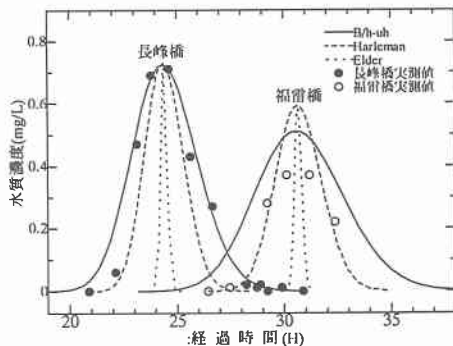


図-4.1 長峰橋・福雷橋の濃度分布図

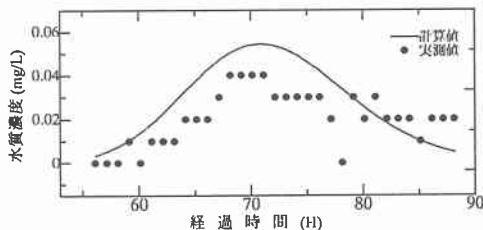


図-4.2 福岡堰の濃度分布図

値付近であるため、濃度の比較はむずかしい。しかし、計算値の濃度直線と実測値の変化の傾向は類似しており、移流拡散係数は、計算値の方が若干大きめであった。

主な観測地点の実測値と計算値の濃度分布の比較を行うため、長峰橋、福雷橋、福岡堰の3地点について再現を行った。その結果、長峰橋では実測値とかなり近い値を示した。しかし、福雷橋ではまだ計算値の方が高く、移流拡散係数も計算値で  $D=14.3\text{m}^2/\text{s}$ 、実測値で  $D=0.50\text{m}^2/\text{s}$ と大きかった。また、福岡堰でも係数の開きは福雷橋より小さいが値は実測値より大きかった。

(5) 既往の移流拡散係数による水質変化

移流拡散係数の算出方法には、これまでいくつかの式がある。これらの式には一長一短があり、調査対象となる河川の形状によって使用の選択が分かれてくる。このため小貝川で代表的な式を用いて、比較を行った。下記にその式を示す。

① Elderの式<sup>5)</sup>

$$D = 5.93u_*h$$

② Harlemanの式<sup>6)</sup>

$$D = 224R(gRi_e)^{1/2} \approx 224u_*h$$

③ 川幅水深比

$$D/uh = 5.42 \times 10^{-3} (B/h)^{2.48}$$

ここで、 $u_*$ は摩擦速度、 $h$ は水深、 $R$ は径深、 $g$ は重力加速度、 $i_e$ はエネルギー勾配をあらわす。

①～③までの式の計算結果を図-5に示す。ただし、初期投入量は任意に設定し、流下過程でのピーク濃度が長峰橋の実測濃度に整合するよう調整した。

この図から、各式の水質変化は調査区間の約半分近い、KP.0/40まで同様な傾向で推移し、整合の基準点とした長峰橋から下流部に至って、徐々に濃度の変動が見られた。また、長峰橋から福雷橋の間ではピーク濃度は Harlemanの式がもっとも実測値に近い値を示している。

(6) 移流拡散係数の推定結果

小貝川と過去に調査された実河川の濃度分布から逆算して得られた移流拡散係数と①から③による移流拡散係数を算出した。

これらの結果と、各移流拡散係数のDを $u_*h$ で除して無次元化した値を表-1に示す。また、実測の濃度分布より求めた移流拡散係数(D/u.h)と①から③の移流拡散係数(D/u.h)とを比較した結果を図-6に示す。この図から、実測値と各移流拡散係数に等しい値(D/u.h)の線に近似していたのは、小貝川をはじめ他の調査河川の川幅水深比であった。

(7) 汚染物質の流出量の推定

①から③の式では、それぞれ初期投入量が異なっている。このことは水質の再現性の精度に影響を及ぼすため、小貝川の事故での流出物質の総量が重要な要素となる。

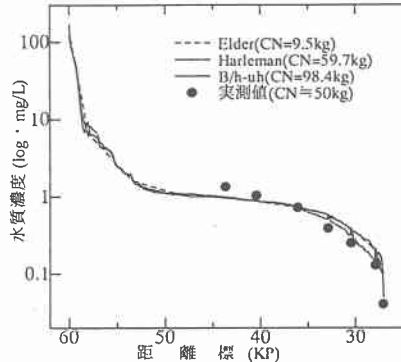


図-5 各移流拡散係数による水質変化曲線

表-1 調査河川による移流拡散係数の推定

河川名	年	実測			Elder		Harleman		B/h-uh	
		$u_*h$	D(逆算)	D/u.h	D1	D1/u.h	D2	D2/u.h	D3	D3/u.h
小貝川	1986	0.0193	10.20	528.5	0.110	5.72	4.32	224	12.01	622.1
		0.0501	3.28	65.6	0.297	5.93	11.22	224	6.67	133.1
厚別川	1989	0.0490	3.74	76.3	0.291	5.93	10.99	224	6.73	137.2
		0.0539	5.45	101.0	0.320	5.93	12.08	224	8.40	155.7
喜茂別川	1990	0.0154	13.85	899.1	0.091	5.93	3.44	224	9.78	636.8
		0.0223	15.48	692.9	0.132	5.93	5.00	224	14.61	654.0
島松川	1990	0.0180	2.86	158.4	0.107	5.93	4.04	224	1.69	93.4
		0.0245	2.96	120.6	0.146	5.93	5.50	224	2.43	99.0

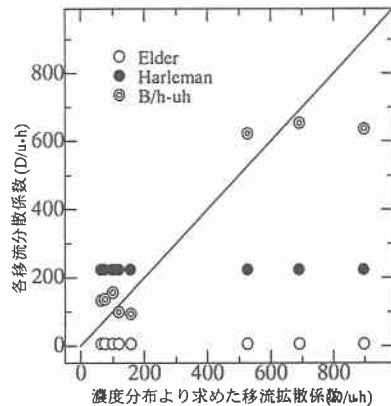


図-6 移流拡散係数の推定結果

小貝川の流出事故物質は、シアン化亜鉛浴中のシアンである。この物質の流出量が明瞭ではないが、記録によれば約1トン(CN=5%)の漏出量といわれている。この数値から予想される流出量は約50kgであり、この量を基準とした場合の各式の初期投入量は、Elderの式では0.19倍、Harlemanの式は1.19倍、川幅水深比では約1.97倍である。しかし、図-4.1で示した長峰橋の実測の濃度分布から累積した通過量は75.5kgであった。

### 3. 十勝川による水質影響予測について<sup>7)</sup>

#### (1) 事故想定概要

水質事故のシミュレーションとして選定した十勝川は道東に位置し、その主な諸元は、流域面積 9,010m<sup>2</sup>、流路延長156kmの一級河川である。また、本川中流部には17万人の中核都市である帯広市があり、その周辺の町村は道内でも有数の畑作、酪農地帯のため、その農機具を製造する工場が十勝川に隣接されており、工場内ではメッキ液を使用している。このメッキ液の貯留槽の容量は約76m<sup>3</sup>と推定され、そのメッキ液は次のインゴットを溶解して用いているものと考えられる。

インゴット=①Zn(CN)<sub>2</sub>;60g/L②NaCN;34g/L③NaOH;80g/L  
CN-14.9g/L

事故原因の要素として、配管の接続部の破損等でメッキ液が漏出することが想定される。その漏出液は図-7に示す工場内の雨水ピットに流れ、雨水下水道を通じて支川の新帯広川を経由して本川の十勝川に流出する。ここでは、水質の影響の範囲がどの程度まで達するのかを考慮し、その想定をシアンの環境基準値を下回る地点を目標とし、本川流入後の水質濃度のシミュレーションについて行った。

#### (2) 汚染物質の影響予測

流量一流下時間の算定に必要なデータは、4～6年毎に実施される『河道縦横断測量』や『同時水位調査』の最新の資料を用い、その実測値から不等流計算を行い、200m毎の流下時間を算出した。また、同時に川幅、水深、流速等の水理諸元から区間毎の結果を表-2に示す。さらに各区間から式(4)を用いて移流拡散係数を求めた。

ここで、メッキ液の受槽容器から漏出された液量を全量、半量、1/4量の3パターンについて、水質の濃度変化を推定した。流量は『同時水位調査』における実測値を用いた。図-8に十勝川の水質濃度のシミュレーションを示す。

この図から、汚染物質の流入地点(KP.8/62)から環境基準値までに低下する地点は、メッキ液が1/4量で支川の途別川が合流点の下流(KP.0/46)付近と推定され、影響範囲は14.6kmであり、この区間での浄水利用施設はない。また、メッキ液が全量が半量の場合、影響距離はこれより下流の千代田堰堤(KP.3/43)まで達し、ここで混合拡散する。

#### (3) 事故処理方法の検討と対策

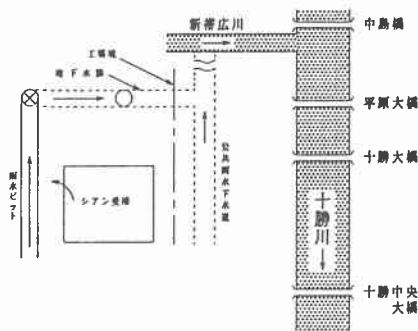


図-7 流出予想概要図

表-2 十勝川の水理諸元

区間 km	Q m <sup>3</sup> /s	u m/s	h m	B m
0～1.1	77	1.258	0.815	85.2
0～6.4	87	1.096	0.801	104.7
0～10.9	100	1.091	0.881	101.1
0～12.8	125	1.056	0.920	105.1
0～14.7	133	1.041	0.936	109.6
0～17.0	137	0.970	0.990	116.6

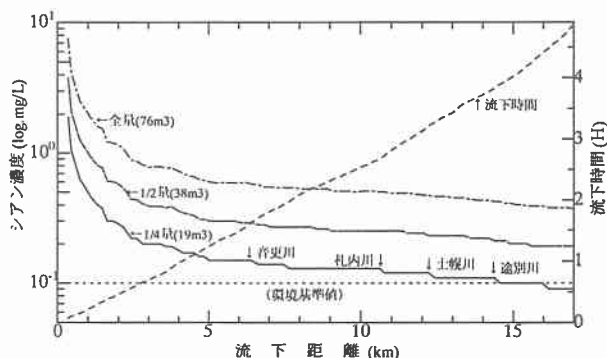


図-8 十勝川の汚染物質濃度のシミュレーション

汚染物質が支川の新帯広川から本川の十勝川に流出した場合、分散したシアンの除去は物理的に困難である。また、化学的処理も本川の流量が高いため、効果が薄く逆に薬剤の二次的汚染を引き起こし、被害の拡大を招く懸念もある。このため、事故の早期発見が不可欠であり、本川流入口の樋門を閉じて支川での化学的処理が最も効果的な対策と考えられる。

#### 4. まとめ

水質事故物質の流下予測の手法として、不等流計算により流下時間の推定法と、河道の水理諸元から川幅水深比を用いて移流拡散係数を推定する方法を提案した。この予測方法を活用するため、シアンの事故歴のある小貝川で再現を試みた。その結果、不等流計算はほぼ実測値に近い結果

、他の観測地点では実測の分布より大きくなる傾向が見られた。また、既往の移流拡散の式を用いて同様に再現した場合、小貝川での水質変化ではHarlemanの式が最も実測に近い変化を示していた。しかし、著者が過去に調査した河川の実測からの移流拡散係数(D/u.h)と各移流拡散係数(D/u.h)の推定結果では、ElderやHarlemanの式より川幅水深比が水質濃度変化を推定する方法として、最も有効な手法であることが解った。

河道の水理諸元等から、流下時間や移流拡散係数の推定が有効な手段であることを踏まえ、その応用事例として、十勝川をモデルに水質事故物質のシミュレーションを試みた。その結果、これまで考慮されていなかった諸項目について、平時の備えによって迅速な対策を講ずることが可能となった。

#### あとがき

水質事故を予想して、その事故物質の流下特性を事前に予測することが可能であれば、被害の防止や事故処理の軽減を図ることができる。本報では、第1、2報を踏まえて実際に事故が起こった小貝川をモデルにして、その流下時間と水質濃度の再現を試みた結果、一定の成果が得られた。今後は、この小貝川の調査結果から得られた水理諸元や、他の実河川での調査を加えて、移流拡散係数の精度の向上を図って行きたいと考えている。

謝辞：本研究を行うにあたって、建設省の武田秀明氏（下館工事事務所）にご協力を戴いたので、記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 玉川尊、秩父亮一、中津川誠：河川における汚染物質の流下予測について、平成度土木学会北海道支部論文報告集, No.46, 391-396, 1990.
- 2) 玉川尊、中津川誠、長谷川和義：河川の水質事故質の流下拡散について、平成4年度土木学会北海道支部論文報告集, No.49, 591-596, 1993.
- 3) Yotsukura, Fischer, Sayre: Measurement of Mixing Characteristics of the Missouri River between Sioux City, Iowa, and Plattsmouth, Nebraska, U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1899-G, 29p, 1970.
- 4) Fukuoka, Sayre: Longitudinal Dispersion in Sinuous Channels, Journal of the HYDRAULIC S DIVISION, Proc. of ASCE 1973, 195-217.
- 5) 水理公式集 [昭和60年版] : 土木学会、P46
- 6) 水質事故対策技術 [1995年版] : 建設省建設技術協議会技術管理部会水質連絡会編、P44、1995.2.25
- 7) 桃枝英幸、玉川尊、平野正則：十勝川水系における異常水質時の緊急措置対策について、第39回（平成7年度）北海道開発局技術研究発表会講演概要集、共通部門、1996.2