

河川における浮遊物質の断面分布

On Cross-Sectional Distributions of Suspended Solid in a River

金沢工業大学 正 員 中 川 武 夫

金沢工業大学 正 員 山 本 隆 彦

金沢工業大学 学生員 長谷川 勝 也

金沢工業大学 正 員 今 井 悟

1. はじめに

人間の家庭における営みや、農業あるいは工業等の社会的営みに伴って派生する汚濁物質を河川の中へ投棄することは両の東西を問わず、時代を越えて行なわれてきたことである。それゆえに、こうした汚濁物質の河川内への投棄に伴なって必然的に起こる水質汚染の度合いを軽減するための適切な対策を考えることは意義深い。たとえば、大工場からの汚濁排棄物とか下水の処理に当っては短期間に多量の汚濁液を放出することを避け少量の汚濁液をゆっくりと放出するという着眼が必要であろう。ところで、汚濁物質の投棄に伴なう水質汚染の問題の最終目標の一つは流れの中のあらゆる場所における汚染濃度の最大値をできるだけ低く抑えることである。理論的にはこの要求は流水断面内の各点への汚濁液の流出率をちょうどこれらの各点における局所的な流量と一致せしめることにより可能となる。すなわち、この場合には汚濁液の流出と同時に流水断面内全体の汚濁濃度が一樣となる。しかしながら、このより現実的目標は点汚濁源が流れの中へ投棄された場合に下流の岸辺に生息している生物系に対する影響を極限するためにここでの水質汚染の程度をいかにしたら軽減しうるかということであろう。

汚濁物質の投棄に伴なう下流での水質汚染の問題を考える際には流れの中の粒子の分散に関する知識がその基礎となるであろう。分散とは簡単にいえば粒子が速度勾配と乱流拡散により流れに運ばれながら流体中へ散らばっていくことである。すなわち、流れの中へ投入された点汚濁源は一つの塊りとして下流へ運ばれるのではなく、平均流速より速いあるいは遅い局所的な流速に依存してその分布形が決められる。ところで、こうした水質汚染の問題と本質的な類似性をもつものに水路内の雑草を駆除するために投入すべき農薬の適量を求める問題がある。この場合にも、水路内への一定量の投薬の効果をj知るために、流下方向各位置における薬の濃度を求めることが必要となる〔1〕。

Kay〔2〕は重直混合が盛んな流れの中に投入された点汚濁源の水平方向への拡散に対しては河床形態が強く影響することを示した。このことに関連して、Smith〔3〕は下流の汚濁濃度が水深の浅い場所で高濃度になるという理論結果を得ている。

水路の境界は形状あるいは大きさの異なった種々の粗度要素から成り立っているとみなすことができよう。このために、これらの粗度のくぼみの中に形成されている渦の内部へ外部の流体が捕捉されるという状況がしばしば起こる。この状況は着色した中立浮遊粒子を水路側壁に沿って流してみれば容易に観察することができるが、同時にいったん渦の内部へ捕捉された中立浮遊粒子がしばらくたったのちに外部の流れにより再連行されることに気づくはずである。このような水路境界面のくぼみにできた渦と外部流との間に介在する自由境界を横切つて中立浮遊粒子が渦の内部と外部流との間を相互に出たり入ったりする過程は性質の異つた二種類の流れの間に介在する自由境界を横切つて相互に質量交換が行なわれる過程と極めて似ていることを指摘することは興味深い。汚濁物質が水路境界のくぼみの中に形成されている渦の内部へ捕捉されたり、そこから再び放出されたりする状況は前述の中立浮遊粒子のそれと同様であるが、こうした汚濁物質の捕捉と放出過程が下流における汚濁物の分散にかなりの影響を与えると考えられている。たとえば、点汚濁源が水路内へ投入された時に下流での縦方向の汚濁濃度分布がその最高濃度点から下流側と比較して上流側へより長く尾を引いたものとして観測されるのは汚濁物質が水路境界において上述のように捕捉されたり放出さ

れたりする効果によるとされている〔4〕。

McQuivey & Keefe〔5〕は過去に実施されたいくつかの汚濁物質の分散に関する実験的研究の実験範囲を調べた結果をもとにして、これらの研究の多くはTaylor〔7〕の一次元分散方程式が適用できないと考えられているいわゆる移流期間内に対応しているという指摘を行なっている。ところが、移流期間内での汚濁物質の分散現象を理論的に扱うのは非常に難しいので、現状では可溶性のトレーサを用いた実験に頼るのが最も効率的かつ有効であると考えられている〔6〕。

本研究の目的は開水路内における浮遊物質の分散時性を実験的に明らかにすることである。汚濁溶液を瞬間的汚濁源として、水路の右岸、中央あるいは左岸のいずれかの位置から流れの中へ投入したのち、下流のいくつかの水路断面で汚濁濃度分布の測定を行なった。さらに、水路内の流水の中に自然に含まれている浮遊物質の断面濃度分布の測定も行なった。続いて、これらの実験結果を基礎にして次に示す四つの各要求を満たすための最適な汚濁物質の投入位置が水路幅方向のどこであるかについての考察を行なった。考察の対称とした四つの要求とは、(1)水路内における水質の汚濁継続時間を最短にすること、(2)水路内のあらゆる場所における水質汚濁濃度の最大値を極限すること、(3)水路両岸に生息する生態系への汚濁物による水質汚染の影響を最小限に抑えること、及び(4)水路の特定の一方の岸に生息する生態系への汚濁物による水質汚染の影響を最小限に抑えることである。

2. 実験

Fig. 1は実験を行なった水路である金沢市の郊外を流れる高橋川の一部の平面形状を示す。この水路の平面形状の特徴は上流部が直線、続いてわん曲したのち再び直線となっていることである。水路の断面形状は台形で水路床における水路幅と平均水深はそれぞれ3 mと0.2 m程度である。また、水路わん曲部における右岸と左岸外形線の曲率半径はそれぞれ46.98 mと50.18 mである。

ローダミンBと水とを1/7の重量比に混ぜ合わせて作った汚濁溶液を瞬間的汚濁源として水路の右岸、中央あるいは左岸のいずれかから流れの中へ投入する実験を最初に行なった。なお、これらの点汚濁源の高さは設定された水路の初期断面における水面直上である。水路内の位置を定義するために座標系の原点として、水路初期断面の中央でかつ静水面上の点を選んだ。座標系の x 、 y そして z の正方向はそれぞれ流下方向、左岸方向そして水面に対して垂直上方である。点汚濁源投入後の断面濃度分布の測定は下流の $x = 5\text{ m}$ 、 15 m 、 25 m 、 35 m そして 45 m の各断面において行なわれた。汚濁試料の採水時期は各断面を投入汚濁溶液の最高濃度点が通過する瞬間であり、各断面内での汚濁試料採水位置は全て水面下3 cm、水路幅方向に52 cm間隔ごととした。各試料採水位置においては円筒形のびんを用いて 31.7 cm^3 の汚濁水を採水した。また、水路初期断面から下流の各濃度測定断面に投入汚濁溶液の最高濃度点が到達するまでに要する時間の測定はストップ・ウォッチで行った。各濃度測定断面における水路断面形状は目盛り棒を用いて水路幅方向へ10 cm間隔ごとに水深を測定することにより求め、一方これらの断面における流速分布は直径10 cmのプロペラ流速計を用いて求めた。ここで、流速測定点は水面下5 cm及び15 cmの各水深ごとについて、水路幅方向に20 cm間隔で分布している。採水された汚濁試料は分光光度計（TASCO、UV1DEC-1）を用いて行なった。

水路内の流水の中に自然に含まれている浮遊物質の断面濃度分布は水路のわん曲部 $x = 25\text{ cm}$ と 45 cm の各断面と、同じく高橋川の一部である長さ800 m程度の直線水路の中間付近に位置する水路断面においてその測定が行なわれた。水路わん曲部にある各断面での試料採水位置は全て水面下5 cm、水路幅方向には80 cm間隔ごととした。一方、水路直線部における断面での試料採水位置は水面下2 cm及び7 cm各水深ごとについて水路幅方向に20 cm間隔で分布している。水路わん曲部、直線部とを問わず、これらの各試料採水位置においては円筒形のびんを用いて 250 cm^3 の試料水を採水した。また、各試料水の中に含まれる浮遊物質の重量を求めるために $0.45\mu\text{m}$ より小さい粒子を通すろ過紙を用いた。なお、水路直線部における水路断面形状及び流

速分布の測定は水路わん曲部におけるそれらと同様にして行なった。

3. 結果

Figs. 2 (a, b, c) と Figs. 3 (a, b, c) は水路わん曲部の $x = 5\text{ m}$ 、 25 m そして 45 m における各水路断面形状及び各流速分布を示す。ここで、記号 $\langle x \rangle$ と $\langle o \rangle$ はそれぞれ $x = -5\text{ cm}$ と -15 cm における実験値を示す。Fig. 2 からはまず水路わん曲部における断面形状はいずれも定台形断面と考えてさしつかえないことが指摘されよう。一方、Fig. 3(a) は $x = 5\text{ m}$ における異なった水深での流速分布を示すが、これらの二つの流速分布はいずれも水路中心軸に関してほぼ左右対称形となっている。Fig. 3(b) は $x = 25\text{ m}$ における同様の流速分布を示すが、これらの二つの流速分布はいずれも最高速度点が水路中心軸から左岸側へ寄った左右非対称形となっていることが特徴的である。なお、この $x = 25\text{ m}$ の断面は Fig. 1 から明らかなように、水路内を流れる流体粒子に働く、左岸方向への遠心力の効果が顕著になると考えられるわん曲部中央付近にあることに注意する必要がある。ところが $x = 45\text{ m}$ におけるこれら二つの流速分布は再びいずれも水路中心軸に関してほぼ左右対称形にもどっている。この原因が、 $x = 45\text{ m}$ の断面が水路わん曲部ではなく、これに続く直線部にあることによることは明らかであろう。

Table 1 には各実験ケースごとの点汚濁源投入点、汚濁濃度測定断面の位置、水路初期断面から下流の各濃度測定断面に投入汚濁溶液の最高濃度点が到達するまでに要する時間 t 、及びフルード数を示した。この表から汚濁溶液が水路中央から流れの中へ投入された場合の所要時間 t の方が、汚濁溶液が左岸あるいは右岸から流れの中へ投入された場合のそれよりも常に短いことがわかる。この結果は汚濁物質を水路中央部へ投入する方が、側岸部へ投入するより、これをより短時間内に流し去るのに有効であることを示唆している。Fig. 4 は水路初期断面から下流の $x = 5\text{ m}$ 、 15 m 、 25 m 、 35 m そして 45 m の各断面での汚濁濃度分布を示している。すなわち、 $x = 5\text{ m}$ の断面においては、点汚濁源が水路中央の場合の濃度分布は、点汚濁源が右岸の場合のそれと比べて分布幅に関してはより狭いが、濃度の最大値に関してより高いことがわかる。ところが、 $x = 15\text{ m}$ の断面は水路わん曲部内にあるので既に指摘したようにこの断面内にある流体粒子は左岸方向への遠心力を受けることになる。この効果に伴って、 $x = 15\text{ m}$ の断面においては、点汚濁源が水路中央の場合の最高濃度点の位置が水路中央から左岸寄り約 15 cm のところにある。一方、点汚濁源が右岸の場合の最高濃度点の位置は右岸から水路中央寄り約 52 cm のところにある。投入汚濁溶液が $x = 5\text{ m}$ から $x = 15\text{ m}$ の断面に達する間に点汚濁源の位置とは独立に最高濃度値の著しい減少と汚濁濃度分布幅の著しい増加とを認めることができる。 $x = 25\text{ m}$ の断面においては点汚濁源が水路中央の場合の最高濃度点の位置は水路中央から左岸寄り約 55 cm のところであり、一方点汚濁源が右岸の場合の最高濃度点の位置は右岸から水路中央寄り約 62 cm のところにある。また、投入汚濁溶液が $x = 15\text{ m}$ から $x = 25\text{ m}$ の断面に達する間に点汚濁源の位置とは独立に最高濃度値は約 $\frac{1}{3}$ に減少するが、汚濁濃度分布幅はほとんど変化しないことがわかる。 $x = 35\text{ m}$ の断面においては点汚濁源が水路中央の場合の最高濃度点の位置は水路中央付近にもどっているが、一方、点汚濁源が右岸あるいは左岸にある場合の最高濃度点の位置はそれぞれの岸から水路中央寄り約 55 cm のところにある。 $x = 45\text{ m}$ の断面においては、 $x = 35\text{ m}$ の断面におけると同様に、点汚濁源が水路中央の場合の最高濃度点の位置は水路中央付近にあるが、一方点汚濁源が右岸あるいは左岸にある場合の最高濃度点の位置はそれぞれの岸から水路中央寄り約 52 cm のところにある。さらに Fig. 4 から水路初期断面から下流の各濃度測定断面においては点汚濁源が水路中央の場合の最高濃度の値の方が、点汚濁源が右岸あるいは左岸にある場合のいずれの最高濃度の値よりも大きいことがわかる。したがって、汚濁物質投入点から下流の各断面での水質汚濁濃度の最大値をできるだけ低く抑えたい場合には汚濁物質を側岸部へ投入する方が、水路中央部へ投入するより良いと考えられる。

Figs. 5 (a, b) には水路わん曲部の $x = 25\text{ m}$ と 45 m の各断面における流水の中に自然に含まれている浮遊物質の濃度分布をそれぞれ示す。すなわち、 $x = 25\text{ m}$ の断面においては水路中心軸から左岸側の部分に

おける浮遊物質の濃度の方が右岸側の部分におけるそれより高いが、 $x = 45\text{ m}$ の断面における浮遊物質の濃度分布は比較的平坦であることがわかる。ここで、 $x = 25\text{ m}$ の断面において左側岸で濃度が高くなっているのは水路わん曲部において左岸方向へ働く遠心力の効果であると考えられよう。

Fig. 6 (a, b, c) は長い直線水路の中間付近に位置する水路断面形状、 $z = -5\text{ cm}$ における流速分布そして $z = -2\text{ cm}$ 及び -7 cm の各水深ごとの浮遊物質の断面濃度分布をそれぞれ示す。Fig. 6(c) から、水路床により近い $z = -7\text{ cm}$ の水深における浮遊物質の濃度の方が水面により近い $z = -2\text{ cm}$ の水深におけるそれよりも全体的に高いことがわかる。また、各水深ごとの浮遊物質の断面濃度分布には巨視的に見れば、水路中央付近及び左岸付近に極大値が現われる傾向があることが指摘できるだろう。この予想はFig. 4 で示めされたように投入された汚濁溶液が右岸付近、水路中央付近及び左岸付近に集中する傾向があることを考えればそれほど無理ではなかろう。

4. 考察及び結論

水路中央部の流れの中へ投入された汚濁物質は流心の軌跡に集中する傾向があるが、一方側岸部の流れの中へ投入された汚濁物質はその側岸外形線にはほぼ平行で、わずかに水路中央寄りの軌跡に集中する傾向があることが明らかになった。これらの実験結果から流水内に自然に含まれている浮遊物質が右岸、水路中央そして左岸付近のいずれか一つあるいは二つ以上の軌跡に集中することが予想できる。前章の終りでも指摘したように、Fig. 6(c) の結果はこうした予想をかなり良く支持しているが、一方で右岸付近の濃度が低い等の点でこの予想と部分的には矛盾している。この原因としては、例えば流心の蛇行性〔8、9〕とか第1章で議論した水路境界における汚濁物質の捕捉と放出過程が考えられよう。

さて、以下においては、本研究を通して得られた知見を基礎にして、汚濁物質を投棄する際の前掲の四つの各要求を満たす最適位置が水路幅方向のどこであるかに関しての考察を加えることにする。

水路初期断面から下流の各濃度測定断面に投入汚濁溶液の最高濃度点が到達するまでに要する時間に関しては点汚濁源が水路中央の場合の方が点汚濁源が右岸あるいは左岸にあるいずれの場合より短いことが明らかにされた。したがって、第一の要求である水路内における汚濁継続時間を最短にするための汚濁物質の最適投入位置は水路中央部である。水路初期断面から下流の各濃度測定断面においては一定量の点汚濁源が水路中央の場合の最高濃度の値の方がこの点汚濁源が右岸あるいは左岸にある場合のいずれの最高濃度の値よりも大きいことが明らかにされた。したがって、第二の要求である水路内のあらゆる場所における水質汚濁濃度の最大値を極限するための汚濁物質の最適投入位置は側岸部である。汚濁溶液が水路中央部から流れの中に投入された場合には、この汚濁溶液の一部が長い流下距離を経たのち下流の側岸に達することになるがこの時点で観測される汚濁溶液の濃度は投入時のそれと比較して非常に低いことがわかった。したがって、第三の要求である水路両岸に生息する生態系への汚濁物による水質汚染の影響を最小限に抑えるための汚濁物質の最適投入位置は水路中央部である。また、点汚濁源が水路の一方の岸にある場合には、この汚濁物質はその側岸外形線にはほぼ平行で、わずかに水路中央寄りの軌跡に集中する傾向があり、この汚濁物質の一部が水路を横切って対岸に達するためには非常に長い時間と流下距離を必要とすることがわかった。したがって、第四の要求である水路の特定の一方の岸に生息する生態系への汚濁物による水質汚染の影響を最小限に抑えるための汚濁物質の最適投入位置はその対岸である。

なお、上の議論では水路内へ汚濁物を投棄する際の環境上の要求項目の数が一つの場合に限ったが、この要求項目の数が二つ以上の場合にも議論を拡張することが可能であろう。

5. 参考文献

- [1] E.M. O'Loughlin & K.H. Bowmer, J. Hydrology, 26, 217-235(1975).
- [2] A. Kay, Proc. A.S.C.E. J. Hydraul. Div.(submitted).

[3] R. Smith, J. Fluid Mech., 110, 373-380(1981).
 [4] E.L. Thackston & K.B. Schnelle, Proc. A.S.C.E., J. Sani. Div. 96, 317-331(1970).
 [5] R.S. McQuivey & N. Keefer, Proc. A.S.C.E., J. Hydraul. Div. 102, 1409-1424(1976).
 [6] H.B. Fischer, Proc. A.S.C.E., J. Hydraul. Div. 93, 187-216(1967).
 [7] G.I. Taylor, Proc. Roy. Soc. London A.223, 446-468(1954).
 [8] T. Nakagawa & M. Hotsuta, Proc. 26th Japanese Conf. on Hydraulics, 45-50(1982).
 [9] T. Nakagawa, Sedimentology, 30(1983)(to be published).

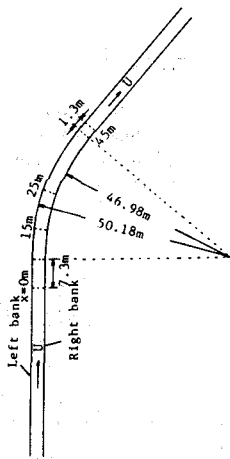


Fig.1: Plan form of open channel (part of the Takahasi river in Kanazawa).

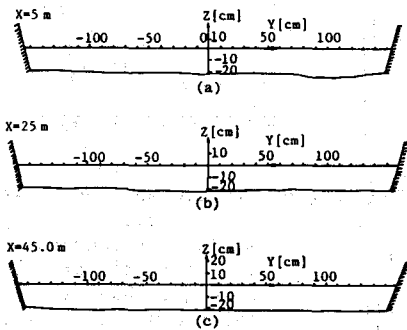


Fig.2: Channel cross sections at each longitudinal distance x.

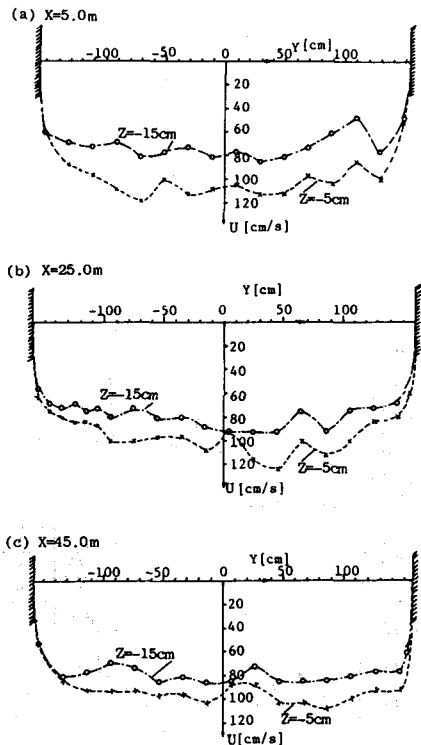


Fig.3: Transverse velocity distributions at each longitudinal distance x.

Table 1. Some experimental results.

Item Ex.no.	Injection point	Longitu. distance x[m]	Max. conc. arrival time t[sec]	Froude number
E1	Centre	5	4.2	0.575
E2	R bank	5	4.8	0.575
E3	Centre	15	11.4	0.583
E4	R bank	15	12.3	0.583
E5	Centre	25	19.2	0.607
E6	R bank	25	22.1	0.607
E7	Centre	35	26.8	0.638
E8	R bank	35	32.8	0.638
E9	L bank	35	30.9	0.638
E10	Centre	45	32.8	0.593
E11	R bank	45	40.9	0.593
E12	L bank	45	43.3	0.593

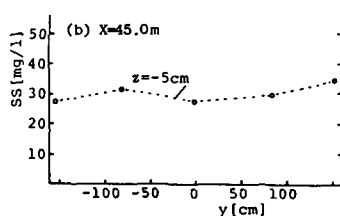
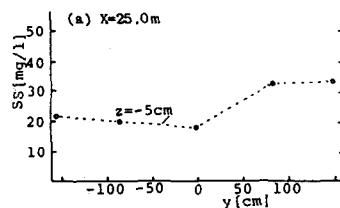


Fig.5: Transverse concentration distributions of suspended solid at each longitudinal distance x.

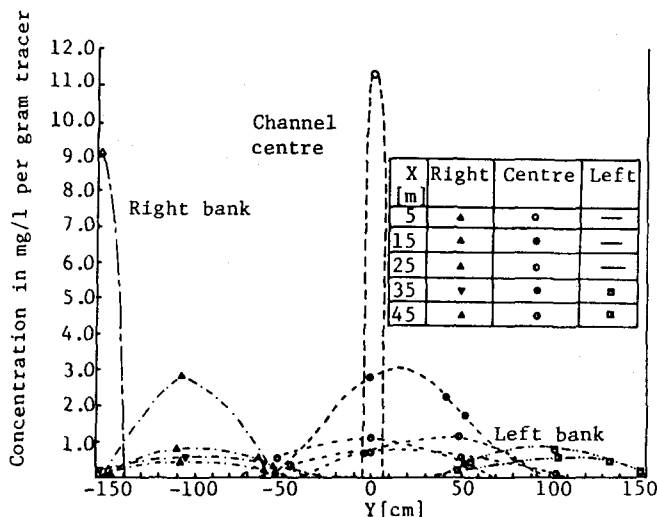


Fig.4: Transverse concentration distributions at each longitudinal distance x when an instantaneous point source is injected into the flow either at the right bank, channel centre or left bank.

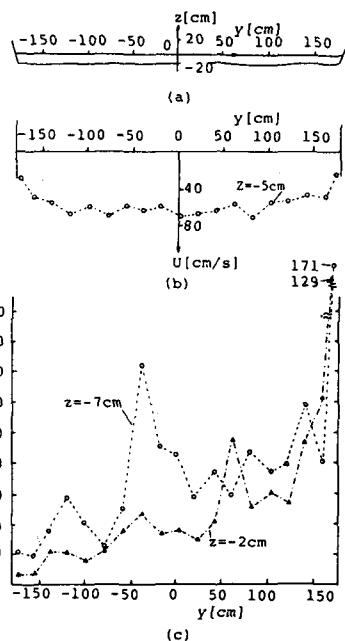


Fig.6: Transverse concentration distributions of suspended solid at the cross section in the middle of the long straight channel. (a) Channel cross section, (b) Velocity distribution, (c) Suspended solid concentration.