

金沢工業大学 正会員 中川 武夫

金沢工業大学 正会員 山本 隆彦

金沢工業大学 正会員 今井 悟

1. はじめに

開水路中へ汚濁液が投入されると、これらの汚濁粒子はたえず水中の空間的位置と速度を変えながら流れによって下流へと運ばれる。このような拡散(Diffusion)と移流(Convection)とからなる非定常な粒子の運動形態を一般に分散(Dispersion)と呼ぶ。今までも開水路内での拡散問題は多くの研究者により取り扱われてきたが、そのうちの大部分は Taylor(1921) が提案した一次元分散方程式が適用できる範囲内の議論に終始してきたようである。具体的には、一次元分散方程式中の幾何拡散係数の値の評価(Taylor 1921, Elder 1959, Fischer 1967)や、一次元分散方程式を拡張して河床あるいは側岸に形成される死水領域(Dead zone) 内への汚濁液の捕獲(Trapping) と再進行(Re-entrainment) の効果(Valentine & Wood 1977, Petersen 1977, Thackton & Schnell 1970

Sabol & Nordin 1978) といかにその中へ組み込むかが主な研究テーマであった。ところが、McQuivey & Keefe (1976) による指摘を待たずともなく、ここに取り上げる開水路中への投入汚濁液の拡散のように、より実際の意味のある拡散の問題、あるいは過去に他の研究者により実施された試験の大きい河川内での拡散実験を一次元的にとらえるには無理が多い。実際、このような場合には汚濁液投入点からの距離 x が、McQuivey & Keefe (1976) が定義した次の条件

$$x < 1.8 l^2 U / R u_*$$

を満たす水路下方何距離範囲内での汚濁液の拡散挙動が重要となる。ここでの l は水路半幅、 U は断面平均速度、 R は径深比として u_* はせん断速度である。Fischer (1967) は上式で表わされる範囲内の分散の初期段階を移流期間(Convective period)と呼び、この期間内では一次元の分散方程式は適用できなると指摘している。この移流期間内の拡散挙動が開水路内への投入汚濁液の問題で第一義的に重要であることを指摘するには、投入直後に水路内の汚濁濃度が最大値を示し、以後、急速にその濃度が減少することを述べなければ十分であろう。また、移流期間内では各水路断面内での混合が完了したと見て汚濁液の拡散現象は本質的に三次元的である。

開水路(あるいは河川)内へ汚濁液を投入する必要がある日常生活においてはそのより、工業あるいは農業を営む際にしばしば生じるが従来、大部分の場合にこうした汚濁液は無臭度、無毒性に水路内へ投入されてきたようである。著者の知る限りでは、汚濁液の最適投入位置の選定に関して系統的に論じた論文は存在しないが、この問題を部分的に論じたものとして Smith (1982) と Yotsukura & Cobb (1972) の論文がある。前者の論文では側岸付近が高濃度となることを防ぐことが要求される場合の汚濁液投入位置について論じ、一方、後者の論文では投入した汚濁液の混合を最短時間内に完了させることが要求される場合の汚濁液投入位置について論じている。以上の例から明らかに、汚濁液の最適投入位置はこれによって水質汚染被害を蒙る生物系の要求に著しく依存する。

本論文では水路平面形状が直線部、わん曲部として再び直線部へと変化する水深に対して幅が15程度の奥河川内に設置した実験水路において、水路幅方向の代表的3点を中心とし、右岸、水路中央及び左岸の水面直上からの汚濁液の瞬間投入実験を行い各汚濁液の水路直線部とわん曲部における拡散挙動及びそれらの間の相違を明らかにする。次に、これらの結果を基として、環境問題との関連で、汚濁液投入により被害を蒙る生物系の要求のうち、a) 水質汚濁継続時間を最短にすること、b) 水路横断面内の最高濃度を制限すること、c) 兩岸

の生物系への影響を最小限に抑えること、及び d) 特定の側岸の生物系への影響を最小限に抑えることに努め、これら四つの生物系への要求を満たす最適な汚濁液投入点が水路幅方向のどの点であるかを検討し考察を加える。

2. 実験

平取扇状地右翼端、居沢市郊外にある大願神社付近を北面方向に流れる新橋川の一部を奥駿水路に盛んだ。この奥駿水路の平面形状は Fig.1 に示したように上流の直線部からわん曲部へ続き、再び直線部となっている。Photo.1 に示す奥駿水路を下流から上流を望む状況が示されておき、草叢上部のヌが並んでいる付近の水面直上から汚濁液の投入が行なわれた。水路幅は約 3.15 m、水深約 0.2 m で水路壁面はコンクリートで固められた断面台形水路とみなすことができる。わん曲部右岸及び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。また、Fig.1 に示す汚濁液投入点での水路横断面から中央軸に沿って流下方向へ測った距離 x の値を m 単位で示した。以後、汚濁液投入点での水路中央水面を原点とする右岸座標系により水路内の各点を定義する。汚濁液投入後の断面濃度分布の測定は $x = 5\text{ m}, 15\text{ m}, 25\text{ m}, 35\text{ m}$ 及び 45 m における各水路断面において行なった。この測定は、投入汚濁液の最高濃度点と当該水路断面と通過する瞬間に一定深さ $z = -3\text{ cm}$ で水路幅方向 52 cm 間隔で水路中央軸及び右岸を含む 7 点及び水路中央軸より水深 $z = -17\text{ cm}$ の点において試料の採水を行なった。試料の採水は一回の汚濁液の投入に対して下流の断面で流量約 31.7 cm^3 、外径 3.0 cm、内径 2.6 cm、長さ 6.1 cm の円筒形採水びんを用いて行なった。また同時に、汚濁液投入後からその最高濃度点が流下方向の各断面に到達するまでの時間をストップウォッチで測定した。濃度測定断面での水深の測定には mm 単位の手錶分取り可能な目盛付の棒を用いて水路幅方向に 10 cm 間隔で行ない、流速の測定には直径 10 cm のフロウ流速計を用いて深さ $z = -5\text{ cm}$ 及び -15 cm において水路幅方向に 20 cm 間隔で行なった。なお、水路中央軸上で $z = -5\text{ cm}, -9\text{ cm}, -12\text{ cm}$ 及び -15 cm の計 5 点での流速測定を行なった。汚濁液の投入方法は水路中央、右岸及び左岸の水面直上から瞬間的な汚濁液源 (Instantaneous point source) とした。なお、実験に投入した汚濁液は 17 cm^3 の水にローダミン B を 1 g 程度溶かして Table 1 に示したような濃度にした溶液である。採水した試料の濃度分析には分光光度計 (TASCO, UVIDEC-1) を用いてその吸光度を求め、前記の 2 点測定したローダミン B 溶液の検定曲線から実際の試料の濃度を求めた。

また、奥駿水路の濃度測定に補助として汚濁液の拡散挙動を目視及び草叢撮影により観察した。例えば Photo.2 は汚濁液を水路中央水面直上から投入した後、汚濁液の状況を示している。

3. 実験結果及び考察

Figs.2 (a), (b) 及び (c) に示すように、 $x = 5\text{ m}, 25\text{ m}$ 及び 45 m における水路断面形状を示した。Figs.3 (a), (b) 及び (c) に示すこれらの断面での流速分布を示した。ここで、 $\langle x \rangle$ 印と $\langle o \rangle$ 印はそれぞれ水深 $z = -5\text{ cm}$ と $z = -15\text{ cm}$ での測定値である。また、これらの四つの下流側水路中央軸を垂直に切る縦断面での流速分布が示してある。Fig.2 から、この奥駿水路の断面形状はほぼ一律な断面台形水路とみなされることになる。Fig.3 (a) に示した流速分布は、 $x = 5\text{ m}$ の断面はわん曲部と直線部にあるので、水路中央軸を中心としてほぼ左右対称な分布となっている。これに対して、Fig.3 (b) に示した $x = 25\text{ m}$ の断面での流速分布は、この断面はわん曲部のほぼ中央にあるので、一水路断面内での最大流速点と定義される流心が水路中央軸から左岸側にずれた左右非対称な分布となっている。ところが、Fig.3 (a) に示した $x = 45\text{ m}$ の断面での流速分布は、この断面はわん曲部に続く直線部にあるので、Fig.3 (a) の流速分布と同様に水路中央軸を中心としてほぼ左右対称な分布となっている。Table 1 に示す各実験での汚濁液投入点、汚濁液 (ローダミン B 液) 濃度、汚濁液投入断面から濃度測定断面までの距離、汚濁液投入から最高濃度点が各断面に到達するまでの時間、平均流速、せん断速度、平均水深、水温、レイノルズ数及びフルード数を示した。この表

とまず明らかに示すレイノルズ数、フルード数のような物理量については実験相互の間で大きな差はないことである。そこで、汚濁液の水路幅方向の投入位置と汚濁液投入から最高濃度点が各断面に到達するまでの時間との間に関連に注目することにする。例えば、中央投入の場合の実験 E1 の汚濁液最高濃度点が $x = 5\text{ m}$ の断面に到達するまでの時間 4.2 秒の方が、右岸投入の場合の実験 E2 の汚濁液最高濃度点が $x = 5\text{ m}$ の断面に到達するまでの時間 4.8 秒より短いことがわかった。同様に、対応する実験の組、E3 と E4、E5 と E6、E7、E8 及び E9、E10、E11 と E12 ごとに中央投入の場合と側岸投入の場合の汚濁液最高濃度点が下流の各断面に到達するまでの所要時間を比較すると、常に中央投入の場合の所要時間が側岸投入のそれより短いことがわかった。すなわち、中央投入の方が側岸投入より、汚濁液を下流へすばやく流したのに近いといえることがわかった。Table 2 には、各実験ごとの濃度測定結果を ppm 単位で示した。この表中、かつこの数値は Table 1 に示したように、投入前の汚濁液濃度が実験ごとに異なるので実験相互間の比較を可能にするために、投入前の汚濁液濃度を 3.7×10^4 ppm としたときの換算濃度である。なお、この正規化された投入前の汚濁液濃度は $\rho = 1\text{ g/cm}^3$ の水に溶かしたときになる濃度の濃度に相当する。すなわち、以下の濃度測定結果を示す図に付したこの換算濃度値がプロットされている。

Figs.4 (a) - (e) には、汚濁液を水路中央、右岸及び左岸から投入したときの下流の $x = 5\text{ m}, 15\text{ m}, 25\text{ m}, 35\text{ m}$ 及び 45 m の各断面における濃度分布を示した。Fig.4(a) は $x = 5\text{ m}$ の断面における濃度分布を示すが、中央投入の場合には水路中央付近に幅が狭く鋭くした分布となっており、右岸投入の場合には右岸付近に中央投入の場合よりやや幅が広く、鈍い分布となっている。Fig.4(b) は $x = 15\text{ m}$ の断面における濃度分布を示すが、この断面をすぎた下流の右岸側にあるのが主流にすべり込み、中央投入の場合の最高濃度点が水路中央から左岸側へ 15 cm 程度ずれている。一方、右岸投入の場合の最高濃度点は右岸から水路中央寄り 52 cm 付近にある。この右岸投入の場合の最高濃度点の移動の原因は、流にのずれに加えて、側岸近くの流速の遅い領域にある汚濁液が流速がより速い水路中央部の流れにより進行 (Entrainment) されることによると考えられる。また、汚濁液が $x = 5\text{ m}$ から $x = 15\text{ m}$ の断面に至る間に、最高濃度の減少及び濃度分布幅の増加を顕著に認めたことがわかる。Fig.4(c) は $x = 25\text{ m}$ の断面における濃度分布を示すが、この断面では流にのずれの影響がさらに増した結果、中央投入の場合の最高濃度点は水路中央から左岸側へ約 55 cm までずれている。一方、右岸投入の場合の最高濃度点は右岸から 62 cm 付近にある。さらに、汚濁液が $x = 15\text{ m}$ から $x = 25\text{ m}$ の断面に至る間に各最高濃度は $1/3$ 程度に減少したが、各濃度分布幅に関してはいずれもその変化が認められない。Fig.4(d) は $x = 35\text{ m}$ の断面における濃度分布を示す。この断面は下流の右岸側へ近い位置にあるために、流にのずれが水路中央へ再び引き寄せられた結果、中央投入の場合の最高濃度点が水路中央付近にまで戻っていることがわかる。Fig.4(e) は $x = 45\text{ m}$ の断面における濃度分布を示す。この断面は下流の右岸側へ近い位置にあるので中央投入の場合の最高濃度点は水路中央付近にあり、右岸及び左岸投入の場合ともに、それぞれ岸から内側へ 52 cm 程度入った点に最高濃度点がある。また、汚濁液が $x = 25\text{ m}$ から $x = 45\text{ m}$ の断面に至る間に各最高濃度の減少及び濃度分布幅の増加は $x = 25\text{ m}$ より上流の場合に比べて緩慢になっている。なお、Figs.4 (a) - (e) に示した濃度分布幅がその分布位置は汚濁液の最高濃度点が各断面を通過する瞬間の汚濁液塊の目視観測による写真から判定した。また、Fig.4 (a) - (e) から各断面ごとの側岸投入の場合の最高濃度と中央投入の場合のそれとを比較すると、常に前者の方が低いことがわかった。すなわち、汚濁液投入点から下流の各断面での最高濃度は極限するためには、側岸投入の方が中央投入より優れていると考えられる。

Fig.5 (a) には汚濁液が中央投入された場合の水路中央軸に沿う濃度変化、水路中央軸から 52 cm 左岸側へずれた中央軸と平行な軸に沿う濃度変化及び水路中央軸から 52 cm 右岸側へずれた中央軸と平行な軸に沿う濃度変化を示した。これらの三つの軸に沿う濃度を比較することによって $0\text{ m} < x \leq 20\text{ m}$ の範囲では水路中央付近に最高濃度点があるが、 $20\text{ m} \leq x \leq 30\text{ m}$ の範囲では最高濃度点は水路中央から左岸側へずれた下

道にあることがわかった。さらに、 $x \geq 30$ m の範囲では最高濃度点が水路中央軸付近に引き寄せられて
 いることがわかった。一方、水路中央軸から 52 cm 右岸側へずれた軸に沿う濃度では、 $x = 25$ m 付近まで他の
 二つの軸に沿う濃度と比較して非常に低い値を示すが、これより下流にいくに従って徐々に増大し、反対側の水
 路中央から 52 cm 左岸側へずれた軸に沿う濃度に近しい値となった。既に指摘した Fig.5 (a) で明白に認め
 られる $20 \text{ m} \leq x \leq 30 \text{ m}$ の範囲での濃度分布は左岸側の流より小さくして、水路の内部の流にの流より
 増大するものがある。すなわち、開水路内へ投入された汚濁液は流に軌跡に集中する傾向があることがわかった。
 したがって、汚濁液が水路中央軸から投入された場合の下流各断面での最高濃度点は水路中に軸に關して左右対
 称な直線水路の場合には水路中央部にあることが示されたが、蛇行水路あるいは水路平面形状にのみならず流に蛇
 行 (Nakagawa & Hotsuta 1982, Nakagawa 1982) をしている水路内ではその最高濃度点は流にの軌跡上にある
 ことが示された。Fig.5 (b) には右岸投入の場合について右岸内壁面に沿う軸上の濃度変化、右岸から 52 cm
 及び 104 cm 水路内へずれた右岸内壁面に沿う軸と平行な軸に沿う濃度変化が示してある。これら三つの
 軸に沿う濃度を比較すると以下で、 $0 \text{ m} < x \leq 11.5 \text{ m}$ の範囲においては、右岸に沿う軸付近に最高濃度点
 があるが、これより下流の $x \geq 11.5 \text{ m}$ の範囲では右岸から 52 cm 水路内へずれた軸付近に最高濃度点があ
 ることがわかった。さらに、 $x \geq 15 \text{ m}$ の範囲では右岸から 104 cm 水路内へずれた軸上の濃度を右岸に沿う
 軸上のそれより高くなっている。すなわち、 $x \geq 15 \text{ m}$ の範囲では、これら三つの軸に沿う濃度の大小関係は
 右岸から 52 cm の軸上で最大となり、以後右岸から 104 cm の軸上、そして右岸に沿う軸上の順になっている。
 Fig.5 (c) には左岸投入の場合について、左岸内壁面に沿う軸上の濃度変化、左岸から 52 cm 及び 104 cm 水
 路内へずれた左岸内壁面に沿う軸と平行な軸に沿う濃度変化が示してある。この図に示した $x > 35 \text{ m}$ の範
 囲では、これら三つの軸に沿う濃度の大小関係は左岸から 52 cm の軸上で最大となり、以後左岸から 104 cm
 の軸上、左岸に沿う軸上の順になっている。すなわち、Figs.5 (b) と (c) から側岸から投入された汚濁液の
 最高濃度点がその内壁面に沿う軸上にある流下方向距離 x の範囲は狭いことがわかった。この範囲より下流のかなり
 長い距離にわたって側岸から少し水路内へずれた岸と平行な軸上はこの最高濃度点があることが明らかとなっ
 た。事実、側岸投入された汚濁液の影響が流に七横切つて対岸にまで達したことは本実験の流下方向距離範囲
 約 100 m 内ではなかった。さらには、汚濁液はこのような長い距離流下する間、混合作用により希釈されて
 いることが相いかり、比較的広い川幅を有する川の岸から汚濁液を投入する場合にその対岸への影響を考慮する
 必要がなくなる可能性を示唆している。すなわち、一方の岸への汚濁液の影響は許されるが、対岸に生じる
 生物系への汚濁液による影響は極限的な場合に入道な汚濁液の投入点で前回の汚濁液の影響が許される側の岸に
 あるということができるわけである。

最後に、垂流方向への汚濁液の混合の状況については、Table 2 に示した水路中央軸に沿う距離 x と、中
 央軸 $y=0$ 直下の 2 点、 $z=3 \text{ cm}$ 及び $z=-17 \text{ cm}$ における濃度値を比較するとこの距離 x の範囲内にお
 いて垂流方向の濃度差は大きくないことがわかった。例えば、実験 E 1 の場合の $x = 5 \text{ m}$ の断面内では
 水面直下 $z = -3 \text{ cm}$ の点での濃度は 12.4 ppm であるのに対して、河床に近い $z = -17 \text{ cm}$ の点での濃度は検
 知されなかった。ところが、実験 E 3 の場合の $x = 15 \text{ m}$ の断面内では $z = -3 \text{ cm}$ の点での濃度が 4.8 ppm
 であるのに対して、 $z = -17 \text{ cm}$ の濃度が 5.3 ppm となり実験 E 1 の場合の値に河床に近い濃度の方が水面
 近く濃度より大きくなっている。さらに、実験 E 5 の場合の $x = 25 \text{ m}$ の断面内では前述のように流に左
 岸側へ進み、 $z = -3 \text{ cm}$ の濃度が 0.7 ppm であつたのに対して、 $z = -17 \text{ cm}$ の濃度は検知されなかった。
 これは実験 E 7 の $x = 35 \text{ m}$ の断面で流に再び水路中央付近にまで進んでいるので $z = -3 \text{ cm}$ の濃度が 1.4
 ppm を示したのに対して、 $z = -17 \text{ cm}$ の濃度は 0.6 ppm を示した。さらに、実験 E 10 の $x = 45 \text{ m}$ の断
 面内では $z = -3 \text{ cm}$ の濃度 0.8 ppm に対して、 $z = -17 \text{ cm}$ の濃度が 0.6 ppm となり、前回の $x = 35 \text{ m}$ の断面
 における両点の濃度差より小さくなっている。すなわち、 $x = 45 \text{ m}$ の断面での垂流混合の方が $x = 35 \text{ m}$ の

断面の水より進んだことを示している。以上の様に、流下方向への距離 x の増加に伴って投入汚濁液の垂直混合は徐々に促進されるものの、右奥縁の流下距離範囲内ではまだ垂直混合が完了していないと考えられるであろう。

4. 結論

水深に対して幅が15程度の開水路中への投入汚濁液の、いわゆる移流期間内での拡散挙動に関する二つの研究を通して得られた主要知見を以下に要約する。

- 汚濁液の最高濃度点がその投入断面から下流の各断面に到達するまでの所要時間について、中央投入の場合の所要時間の半分が側岸投入の場合の水より短いことが明らかにされた。また一般に、汚濁液投入による水路内の水質汚濁継続時間を最短に抑える場合には、流に軌跡上に汚濁液を投入すれば良いことになる。
- 汚濁液投入点から下流の各断面における最高濃度の値については、側岸投入の場合の最高濃度の半分が中央投入の場合の水より低い。したがって、汚濁液投入点から下流の各断面までの最高濃度を制限するためには、汚濁液を側岸から投入すれば良いことになる。
- 開水路中へ投入された汚濁液は流に軌跡に集中する傾向が顕著であることが認められた。とくに、中央投入の場合には下流の各断面における最高濃度点はほぼ流に軌跡上にあるのに対して、最高濃度部は水路中央部に限られることが明らかにされた。したがって、水路両岸の生物系への影響を最小限に抑える場合には流に部へ汚濁液を投入すれば良いことになる。
- 一方の岸から投入された汚濁液の影響が流に横切った対岸まで及ぶまでには、長い流下距離を必要とすることが明らかにされた。したがって、投入汚濁液による対岸の生物系への影響を最小限に抑える場合には残りの岸から投入することが望ましい。

以上、二つの開水路中への汚濁液投入に伴う二被覆を受ける生物系が唯一の場合に限って、その最適投入点について議論したが、生物系が二つ以上の場合にも上記得られた知見を基礎に類々の議論をすることが可能であろう。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたっては、金沢工業大学土木工学科、木羽敏泰教授、木羽研究室の教員、学生諸兄、及び金沢工業大学土木工科学科生、長谷川勝也君に多大の援助をいただいた。ここに、ここに付記し、感謝の意を表わす次第である。

6. 参考文献

- Elder, J.W.: The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. J.Fluid Mech., 5, 544-560(1959).
- Fischer, H.B.: The mechanics of dispersion in natural streams. Proc. ASCE, HY. 6, 187-216(1967).
- McQuivey, R.S. & Keefer, T.N.: Dispersion-Mississippi river below Baton Rouge, La. Proc. ASCE, HY10, 1425-1437(1976).
- Nakagawa, T. & Hotsuta, M.: Boundary effects on meandering stream and river morphology, Proc. of 26th Japanese Conf. on Hydraulics, 45-50(1982)(in Japanese).
- Nakagawa, T.: Boundary effects on stream meandering and river morphology, Sedimentology(1982)(in press).
- Petersen, F.B.: Prediction of longitudinal dispersion in natural streams. Series paper 14, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 69(1977).
- Sabol, G.V. & Nordin, C.F.: Dispersion in rivers as related to storage zones. Proc. ASCE, HY.5, 695-708(1978).
- Smith, R.: The importance of discharge siting upon contaminant dispersion in narrow rivers and estuaries.

9. Smith, R.: Where to put a steady discharge in a river. J. Fluid Mech., 115, 1-11(1982).
10. Taylor, G.I.: Diffusion by continuous movements. Proc. Math. Soc., London, A.20, 196-211(1921).
11. Taylor, G.I.: Dispersion of soluble matter in solvent flowing slowly through a tube. Proc. Roy. Soc., London, A.219, 186-203(1953).
12. Taylor, G.I.: The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. Proc. Roy. Soc., London, A.223, 446-468(1954).
13. Thackston, E.L. & Schnelle, K.B. Jr.: Predicting effects of dead zones on stream mixing. Proc. ASCE, SA.2, 319-331(1970).
14. Valentine, E.M. & Wood, I.R.: Longitudinal dispersion with dead zones. Proc. ASCE, HY.9, 975-989(1977).
15. Yotsukura, N. & Cobb, E.D.: Transverse diffusion of solutions in natural streams. U.S. Geophy. Survey Prof. Paper No.582-c(1972).

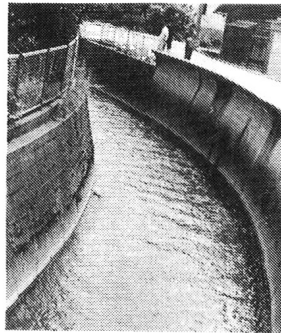
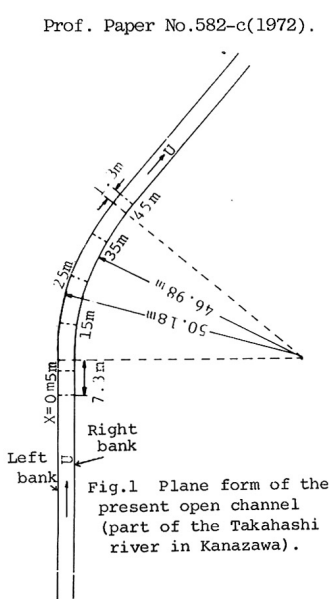


Photo.1 The present open channel viewed from a downstream site.

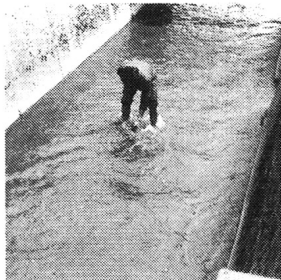


Photo.2 A view just after injecting dye tracer from the channel centre.

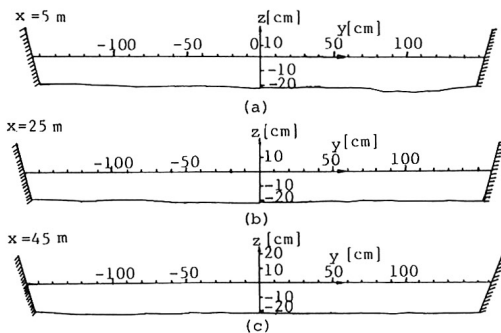


Fig.2 Channel cross sections at each longitudinal distance x.

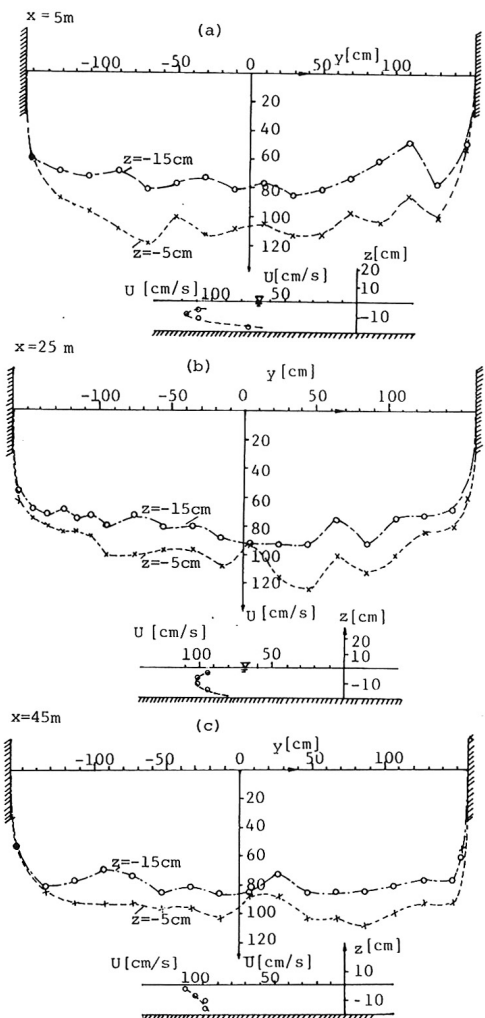


Fig.3 Velocity distributions at different cross sections.

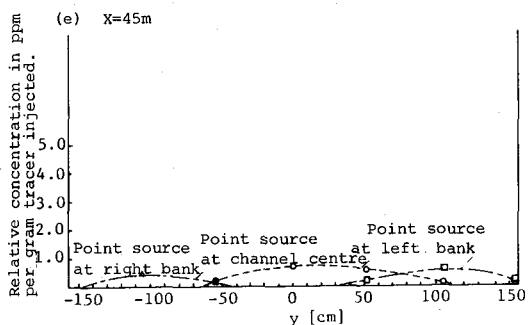
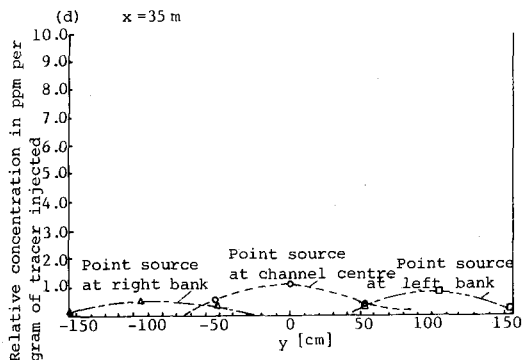
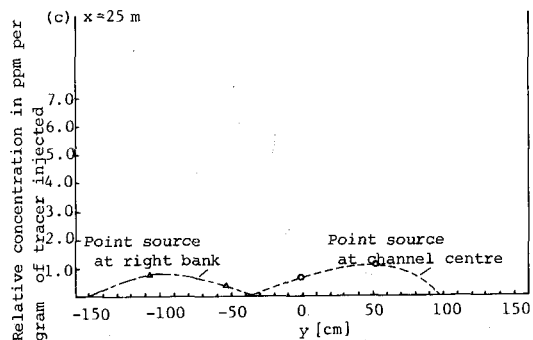
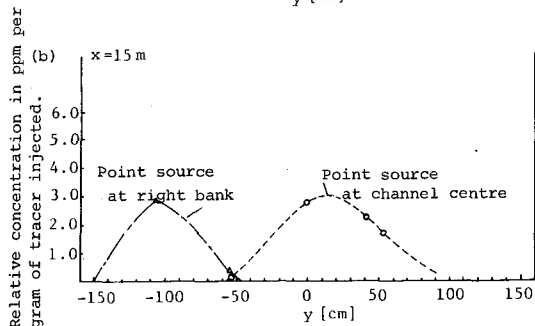
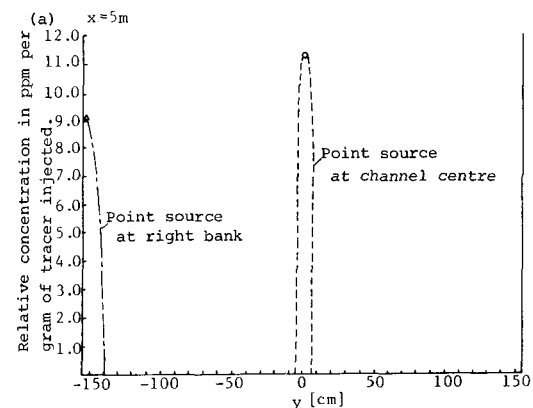


Fig.4 Transverse concentration distributions at different cross sections downstream when dye tracer (instantaneous point source) is injected from different transverse positions.

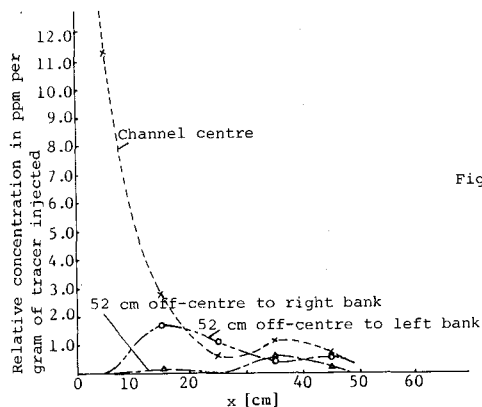


Fig.5 (a) Dye tracer is injected from channel centre and just above water surface.

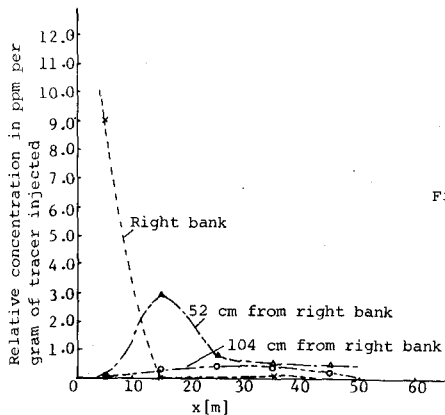


Fig.5 (b) Dye tracer is injected from right bank and just above water surface.

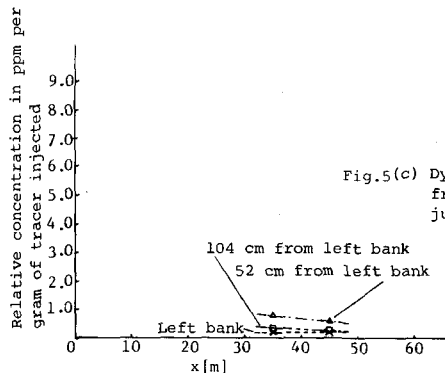


Fig.5(c) Dye tracer is injected from left bank and just above water surface.

Fig.5 Longitudinal concentration distributions along different axes when dye tracer (instantaneous point source) is injected from different transverse positions.

Table 1. Some experimental conditions and results.

Item Ex.No.	Injection point	Rhodamine B solution [ppm]	Long. Distance x[m]	Max. Conc. arrival time T[s]	Mean velocity U[cm/s]	Shear velocity U _* [cm/s]	Mean depth h[cm]	Water temp. [°C]	Reynolds number $R_e = Uh/\nu$	Froude Number $F_r = U/\sqrt{gh}$
E1	Centre	4.0×10^4	5	4.2	84.0	2.3	21.8	20.1	1.824×10^5	0.575
E2	R bank	5.5×10^4	5	4.8	84.0	2.3	21.8	20.1	1.824×10^5	0.575
E3	Centre	6.4×10^4	15	11.4	81.6	2.0	20.0	20.1	1.625×10^5	0.583
E4	R bank	5.5×10^4	15	12.3	81.6	2.0	20.0	20.1	1.625×10^5	0.583
E5	Centre	4.2×10^4	25	19.2	86.0	4.6	20.5	20.1	1.756×10^5	0.607
E6	R bank	4.9×10^4	25	22.1	86.0	4.6	20.5	20.1	1.756×10^5	0.607
E7	Centre	4.7×10^4	35	26.8	90.4	2.3	20.5	21.0	1.887×10^5	0.638
E8	R bank	5.7×10^4	35	32.8	90.4	2.3	20.5	21.0	1.887×10^5	0.638
E9	L bank	5.3×10^4	35	30.9	90.4	2.3	20.5	21.0	1.887×10^5	0.638
E10	Centre	4.3×10^4	45	32.8	85.3	4.9	21.1	21.0	1.883×10^5	0.593
E11	R bank	5.6×10^4	45	40.9	85.3	4.9	21.1	21.0	1.883×10^5	0.593
E12	L bank	5.3×10^4	45	43.3	85.3	4.9	21.1	21.0	1.883×10^5	0.593

Table 2. Concentrations at each point.
units:ppm. Note each value in () denotes the normalized value.

Ex.No.	x[m]	y[cm] z[cm]	-155	-104	-52	0	0	52	104	155
			-3	-3	-3	-3	-17	-3	-3	-3
E1	5		0	0	0	12.4(11.3)	0	0	0	0
E2	5		13.5(9.1)	0	0	0	0	0	0	0
E3	15		0	0	0.1(0.1)	4.8(2.8)	5.3(3.1)	3.0(1.7)	0	0
E4	15		0	4.3(2.9)	0.5(0.3)	0	0	0	0	0
E5	25		0	0	0	0.7(0.6)	0	1.3(1.1)	0	0
E6	25		0	1.0(0.8)	0.6(0.4)	0	0	0	0	0
E7	35		0	0	0.7(0.6)	1.4(1.1)	0.6(0.4)	0.5(0.4)	0.2(0.1)	0
E8	35		0.2(0.1)	0.8(0.5)	0.6(0.4)	0	0	0	0	0
E9	35		0	0	0	0	0	0.4(0.3)	1.2(0.8)	0.3(0.2)
E10	45		0	0	0.3(0.2)	0.8(0.7)	0.6(0.5)	0.7(0.6)	0.1(0.1)	0
E11	45		0	0.8(0.5)	0.3(0.2)	0	0	0	0	0
E12	45		0	0	0	0	0.4(0.2)	0.4(0.2)	0.9(0.6)	0.3(0.2)