

# 流入汚水の希釈特性に関する実験的研究

正 員 南 部 特 一\*

## EXPERIMENTAL STUDIES ON THE DILUTION CHARACTERISTICS OF WASTE WATER, DISCHARGED INTO A STREAM

By Shoichi Nambu, C.E. Member

**Synopsis;** Succeeding to the previous study<sup>1)</sup>, the dilution characteristics of waste water in a stream, where the waste water is discharged from an outfall at a constant rate, has been investigated by means of an experimental flume, of which sizes are  $0.50 \times 0.25 \times 30.0$  m. As a result, several conclusions have been obtained regarding the effect of dilution in connection with the flow rates, both of the waste and the stream, the flowing-out direction and the width of the outfall. Also, further discussions are added to the theoretical analysis of the estimation of the concentration-distribution of pollutants in a stream, which has been proposed in the former report<sup>1)</sup>.

**要 旨** 河川の片側から流入した汚水の希釈特性について、前報<sup>1)</sup>にひき続き詳細な実験的研究を行い、希釈効果におよぼす汚水の流入速度、流入口幅および流入角度の影響に関して二、三の基本的問題点を明らかにし、また、先に提案した水域内汚染度分布の解析法について付加的な検討を行った。

### 1. 緒 言

前報文<sup>1)</sup>では河川の片側から連続的に流入した汚水の水域内分布および希釈率の規制式を誘導し、ついで、汚水が流入先河川の水流と直角に流入した場合について行つた実験から、上記規制式の精度ならびに希釈率と河川の水流状態または汚水の流入速度との関係を議論した。本文はその後の研究成果を報告したものであり、流入口幅、流入角度の相違が希釈効果におよぼす影響ならびにその他の汚染度分布を解析するに当つて考慮すべき基本事項を研究対象として新たに取りあげている。

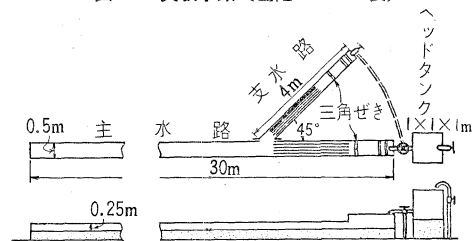
前にも述べた通り、河川へ流入した汚染物質の浄化にあずかる希釈作用は、短小な本邦河川においては、とくに重要な意味をもち、従来重視されてきた生物化学的自浄作用と同程度の役割をはたすものである。従つて、希釈特性を正確に把握しておくことは河川の自浄作用を解明する上にぜひ必要なことであり、また、汚水の放流速度、放流口寸法または形状の合理的決定など、これに関連させて解決しなければならない実際上の問題も数多い。水質保全法の制定とともに水質規制の具体策、流水基準と放流水基準との関連などに関する議論が活発になつてきたが、これらの問題は河川の自浄作用ないしは水域内汚染度分布に対する十分な資料が得られたあとに、はじめて解決できるものであり、今後この種の研究の重要性はますます増してくるものと考えられる。

### 2. 実験装置および実験結果

図-1 に示すように実験水路は  $0.50 \times 0.25 \times 30.0$  m の主水路と  $45^\circ$  の角度で取り付けられた支水路より構成されており、支水路は幅 5, 10, 20 cm の 3 本を用意し、主水路と容易に連結できる構造にした。主、支水路はいずれも上流端に三角ぜきを設け、両水路流入水の合流前流量  $Q'$ ,  $q$  を測定したが、これらの流量は定水頭貯水槽と連絡している導水管のバルブによつて調節できるようになつている。

実験に当つては、支水路水にフルオレッセイン水溶液を注加し、支水路流入量を 230~3 300 cc/sec、主水路流量を 2 300~5 100 cc/sec の範囲にわたつて変化させ、流入した色素の主水路内における拡散幅を流下方向の各点について測定していつた。図-2 の実測値は支水路幅 10 cm のときの値であり、縦軸に色素の拡散幅  $b$ 、横軸に支水路流入口の下流端より計つた流下距離  $x$  がとつてある。なお、5, 20 cm 幅の支水路についても同様の結果を得ている。

図-1 実験水路 (塩化ビニール製)



\* 京都大学工学部講師, 土木工学教室

こうして測定された  $b-x$  曲線は汚水が流入したために汚染された水域の境界線を表わすと考えることができ、前報文で誘導した次式によつて規制されている。

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi b_T/B \cdot \cos n\pi b/B}{1 - (2nb_T/B)^2} \cdot \exp\left\{-\frac{\varepsilon}{U}\left(\frac{n\pi}{B}\right)^2 x\right\} = -\frac{1}{2} \dots\dots\dots (2-1)$$

ここで、 $\varepsilon$ ；河川横断方向の平均拡散係数、 $U$ ；汚水流入先河川平均流速、 $B$ ；流入先河川幅、 $b_T$ ； $x=0$  における流入汚水の仮想拡散幅である。

図-2 の実験値に対応させて式 (2-1) にもとづく理論曲線を計算すると、同図の実曲線のようになり、それぞれの実験条件に対する  $b_T$  が求められるが、この  $b_T$  は水域内の汚染度分布を解析する際に初期条件を規定し、また、後述するように希釈率を規制する要素となつている。

3. 汚水流入口幅が一定の場合の汚水流入量および流入角度と希釈率との関係

前報文では次の諸式を誘導している。

$$\frac{b_T}{a} = \frac{c_0}{c_s} \cdot \frac{v_0}{U} \cdot \frac{\pi}{2} \dots\dots\dots (3-1)$$

$$\frac{b_T}{a} = f(v_0/U) \dots\dots\dots (3-2)$$

$$p = \frac{b}{a} \cdot \frac{U}{v_0} = \frac{b}{B} \cdot \frac{Q}{q} \dots\dots\dots (3-3)$$

ただし、上式では、流入する汚染物質の自己減衰を無視し、また、汚水流入前の河水中汚染物質濃度が流入汚水の中の同濃度に比較して非常に低い場合を対象にしており、 $a$ ；汚水流入口幅、 $c_0$ ；流入前の汚水中汚染物質濃度、 $c_s = b_0/b_T \cdot c_0$  ( $b_0$ ； $x=0$  における実際の汚水拡散幅)、 $v_0$ ；汚水流入速度、 $p = c_0/\bar{c}$ ；希釈率 ( $\bar{c}$ ；汚染水域内平均汚染物質濃度)、 $q = av_0$ ；汚水流入量、 $Q = BU$ ；汚水流入後の河川流量、 $b$ ；水域内任意地点における汚水拡散幅である(図-3 参照)。

(1)  $b_T/a$  の特性について

いま、式(3-2) に注目して 図-2 の結果から  $v_0/U$  と  $b_T/a$  との関係を探り、各支川幅について整理し、プロットすると、図-4,5,6 に示すような①の直線が得られ、直角流入の実験結果と同様、次式の関係が成立していることがわかる。

$$\frac{b_T}{a} = \lambda \left(\frac{v_0}{U}\right)^\varepsilon \dots\dots\dots (3-4)$$

次に、流入先河川の  $x=0$  における断面を通過する流入汚染物質の速度が河川の平均流速  $U$  に等しく、この

図-4  $v_0/U$  と  $b_T/a$  または  $b_0/a$  との関係 ( $a=5$  cm)

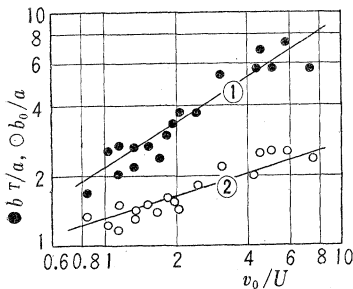


図-5  $v_0/U$  と  $b_T/a$  または  $b_0/a$  との関係 ( $a=10$  cm)

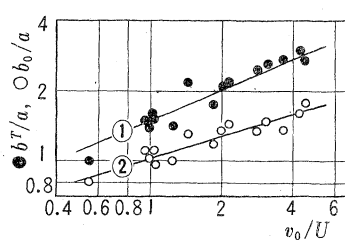


図-2 実測、理論  $b-x$  曲線

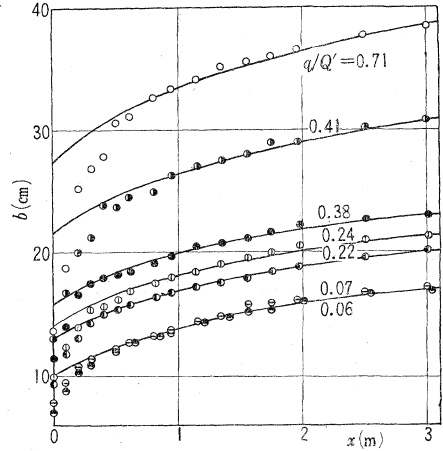
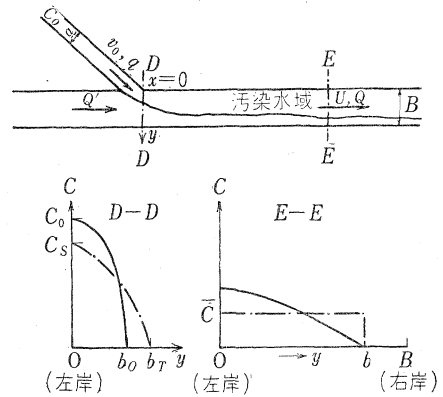


図-3 記号を示す略図



断面における汚染物質濃度分布が cosine 形であり、かつ  $x=0$  にて  $y=0$  で  $c=c_0$ ,  $y=b_0$  で  $c=0$  が成立していれば、流入汚染物質の保存を考えて、次式が誘導される。

$$\frac{b_0}{a} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v_0}{U} \dots\dots\dots(3-5)$$

すなわち、 $b_0/a$  に対しても式 (3-4) と同形の次式の成立が予想される。

$$\frac{b_0}{a} = \lambda_1 \left( \frac{v_0}{U} \right)^{\xi_1} \dots\dots\dots(3-4)'$$

さらに上述の仮定が成立するならば、式 (3-5) に示すように  $\lambda_1 = \pi/2$ ,  $\xi_1 = 1$  となるはずである。そこで今度は  $b_0/a$  を 図-2 の結果から求め

て、先と同様にプロットしてみると 図-4, 5, 6 の②直線が得られ、式 (3-4)' の関係は実際に満足されており、また、 $\xi_1 < 1$  となることがわかる。一方、直角流入については式(3-5)がそのまま成立し、 $\xi_1 = 1$  であつたわけだが、こうした流入角度による相違は結局上述の仮定によるものと考えられ、流入角度の減少によつて流入速度の流下方向 ( $x$  方向) 成分が大きくなり、 $x=0$  断面を通過する流入汚染物質の移送速度が増大してきたことがおもな原因と考えられる。いま、実際の移送速度を  $u$  とすると上記の  $b_0$  はこの  $u$  に対応するものであるから次式が成立する。

$$\frac{b_0}{a} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v_0}{u} \dots\dots\dots(3-5)'$$

一般に  $u > U$  であるが、さらに流入角度の減少とともに  $u$  は次第に増大してゆくから、 $b_0/a$  と  $v_0/U$  との関係に注目して 図-4, 5, 6 のようにプロットすれば、流入角度の減少につれて両者の関係を示す直線勾配 ( $\xi_1$  に対応) は当然減少してくるはずである。しかし、図-4, 5, 6 において流入口幅の相違にかかわらず②直線が平行していることは興味のある点で、結局、同一の流入角度については ( $b_0/a - v_0/U$ ) の関係を示す直線はほぼ一定した勾配をとると考えられるから、直角流入の場合には  $\xi_1 = 1$  が成立し、また  $\xi_1$  は流入角度の減少につれて次第に小となる傾向にあることがわかる。

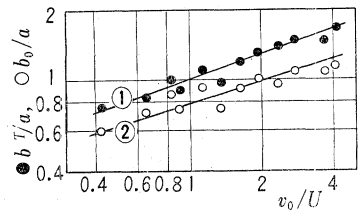
$v_0$  が小さくなると着色水が支水路より主水路へ円滑に流入しなくなつて、拡散幅  $b$  の測定が非常に困難となり、また、測定精度も落ちてくるので、図-4, 5, 6 にはこのときの  $b_T/a$  の実測値はプロットしていないが、図-2 にみるように  $q/Q'$  が減少すると  $b_T$  の値が次第に  $b_0$  の値に近づいているので、 $b_T \approx b_0$  が成立し、従つて  $v_0/U$  が小さい領域では ( $b_T/a - v_0/U$ ) の関係は ( $b_0/a - v_0/U$ ) の関係直線 ② によつて表わされるものと考えられる。結局、以上の考察から  $v_0/U$  が大きい場合の ( $b_T/a - v_0/U$ ) の関係は 図-4, 5, 6 の①直線によつて表わされ、また、 $v_0/U$  が小さい場合には②直線で示される ( $b_0/a - v_0/U$ ) の関係をそのまま ( $b_T/a - v_0/U$ ) の関係と考えることができるわけである。ただし、 $v_0/U$  が非常に大きいと流入口付近に波を生じ、乱れがいちじるしくなつて、拡散のみを考慮したのでは取扱えなくなるので、以上の関係は適用できないが、こうした例が実河川で認められることはまれである。

直角流入の実験結果では①直線の勾配を示す  $\xi_2$  が  $\xi_2 < 1$ 、②直線の勾配に対応する  $\xi_1$  は  $\xi_1 = 1$  となつていた。従つて、( $b_T/a - v_0/U$ ) の関係が②直線より①直線に移るところに遷移領域を想定できたが、この領域における上記の関係を巨視的にみて直線で仮定すると、その勾配  $\xi_2$  は  $\xi_2 > 1$  となる。一方、図-4, 5, 6 の①, ②直線を見てみると  $\xi_2 < 1$ ,  $\xi_3 < 1$ ,  $\xi_1 < \xi_3$  となつており、この場合には遷移領域が明確に認められなくなる。すなわち、両者の比較から  $\xi_2 > 1$  となるような  $b_T/a$  の特性は流入角度に関係し、流入角度が後者のように  $45^\circ$  程度に減少した流入口においてはほとんど認められなくなることがわかる。また流入口幅の影響として、幅の増大につれて①, ②直線が接近し、かつ、 $\xi_3$  が  $\xi_1$  に近似してくる特徴をあげることができる。つまり、流入角度が  $45^\circ$  程度となつた幅の広い流入口においては ( $b_T/a - v_0/U$ ) および ( $b_0/a - v_0/U$ ) の関係が近似的に同一直線で表わされるわけである。

以上明らかにした  $b_T/a$  の特性は水域内汚染度分布を解析する際に有効に利用でき、比較的河川幅の広い支川によつて汚染物質が負荷される場合においては  $b_0 \approx b_T$  が成立するわけだから、支川流入点にて断面内汚染度分布を測定し、 $b_0$  を求めれば、ただちに  $b_T$  を知ることができる。なお、以下の考察に便利ように  $v_0/U$  が小さく ( $b_T/a - v_0/U$ ) の関係が②直線にて表わされる領域を第1領域、②より①直線に移行する領域を第2領域、①直線につてくる領域を第3領域と仮りに名づけ、各領域における  $\xi$  を順に  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  としておく。

(2) 希釈率に関する検討

図-6  $v_0/U$  と  $b_T/a$  または  $b_0/a$  との関係 ( $a=20$  cm)



$UB/\varepsilon$  で代表される汚水流入先河川の水状態が同一で、かつ、ある代表地点における希釈率  $p_i$  に注目すれば、式 (2-1), (3-3) から明らかなように次式が成立する。

$$p_i \propto \frac{b_T}{a} \cdot \frac{U}{v_0} \dots\dots\dots (3-6)$$

ついで、上式に式 (3-4) を代入すると、次式を誘導できる。

$$p_i \propto \left( \frac{v_0}{U} \right)^{\varepsilon-1} \dots\dots\dots (3-7)$$

式 (3-7) は  $p_i$  が  $(v_0/U)^{\varepsilon-1}$  に比例することを示しているが、 $v_0/U$  によつて  $\varepsilon$  が変化するので、 $p_i$  と  $v_0/U$  との関係は一般に各領域について別個に考えてゆかねばならない。従つて、先に得た  $(b_T/a - v_0/U)$  の関係を参照して次に、各領域における  $p_i$  と  $v_0/U$  との関係を考察してみる。

(i) の結果によれば、汚水が流入先河川の水と鋭角をなして流入する場合には第1領域において  $\varepsilon_1 < 1$  となつてゐる。従つて、式 (3-7) から明らかなように希釈率  $p_i$  は  $v_0/U$  の増加につれて逆に減少する。一方、直角流入ではこの際  $\varepsilon_1 = 1$  となつて、 $p_i$  は  $v_0/U$  に関係しないという結果を得ており、この点、流入角度による相違がはつきり認められる。また、第2領域は  $45^\circ$  程度に流入角度が減少した流入口においてはほとんど無視でき、議論の対象にならないが、直角に近い角度で狭い幅の流入口から汚水を流入させる場合においては  $\varepsilon_2 > 1$  となり、 $p_i$  が  $v_0/U$  の増加につれて増大するという興味ある傾向を認めることができる。第3領域では一般に  $p_i$  は  $v_0/U$  と逆比の関係にある。

以上は汚水がある与えられた幅をもつ流入口から河川へ流入したときの流入速度または流入量と希釈率との関係を示すものであり、すでに建設された汚水流入口によつて汚水を有効に流入させるためには、原則として、 $v_0/U$  を第2領域と第3領域との境界値に等しくなるように制御すればよいわけで、河川幅に比較して幅の狭い流入口(実験結果では  $a/B = 0.02, 0.034$ ) から流入先河川の水と直角に近い角度で汚水を流入させる場合には、河川の平均流速程度にて流入させるのが希釈に対してもつとも効果的である。ただ、流入口幅が広くなり、流入角度が  $45^\circ$  流入実験のように小さいと、第2領域が明確にあらわれなくなつて、希釈率は  $v_0/U$  の増加とともに一方的に減少し、流入速度の制御による希釈効果の向上はほとんど期待できない。なお、流入角度と希釈率との関係については、まだ定量的な解析を十分行つていないが、直角流入と  $45^\circ$  流入とについて実験から得られた  $(b_T/a - v_0/U)$  の関係を比較してみると明確に有意の差が認められ、実験的には直角流入の方が希釈に対して有利となることを確かめている。

#### 4. 汚水流入量が一定の場合の流入速度または流入角度と希釈率との関係

$q = av_0$ ,  $Q = BU$  を用いると、式 (3-7) は次式のように書き改められる。

$$p_i \propto \left( \frac{a}{B} \right)^{1-\varepsilon} \cdot \left( \frac{q}{Q} \right)^{\varepsilon-1} \dots\dots\dots (3-7)'$$

上式において  $B$ ,  $q$ ,  $Q$  は一定とする。

前報文では、2種の流入口( $a/B = 0.02, 0.034$ )を使用した実験において、両者の結果に大きな相違がなかつたため、一応各領域における  $\varepsilon$  の値は  $a/B$  によつて変化しないと仮定した。しかしながら今回の実験からこの仮定は成立しないことがわかつたので、こうした  $a/B$  による  $\varepsilon$  の変化の影響をもふくめて以下に再検討してみる。ここで、 $\varepsilon$  が  $a/B$  によつて変化すると、式 (3-7)' からただちに  $p_i$  と  $a/B$  との関係を把握できなくなるが、以上の成果を利用して代表的な条件のもとに数値計算を行えば、所要の資料を得ることが可能であり、また汚染度の高い河川には多量の汚水が流入しており、こうした河川においては必然的に汚水流入速度も増大していると考えられるから、この際の実験条件としては  $v_0/U$  が第3領域の値をとる場合を取り上げれば、実際問題との関連も密接になる。

$q = 8, 15, 20, 30, 40 \times Q/50$ ,  $a = 5, 10, 20$  cm,  $B = 50$  cm を与え、図-4, 5, 6 に示される第3領域の  $(b_T/a - v_0/U)$  の関係にもつづいて、まず  $b_T/a$  を求めた。一方、対象地点を  $\varepsilon/U \cdot x/B^2 = 3, 6, 12 \times 10^{-2}$  として与え、さらに以下の計算に便利のように前もつて  $b_T/B$  と対象地点における  $b/B$  との関係を前報で提案した方法によつて求めておき、図-7 にプロットした。ついで先に得た  $b_T/a$  を  $b_T/B$  に換算し、図-7 によつて  $b/B$  を読みとり、式 (3-3) に代入して対象地点の希釈率  $p_i$  を計算した。ただし、ここでは流入点付近の水深は汚水の流入速度、流入量によつて変化しないと仮定している。得られた  $p_i$  は  $q/Q$  との関係に注目し、 $a$ ,  $\varepsilon/U \cdot x/B^2$  をパラメーターとして図-8 にプロットした。なお、図中の太実線は流入汚水が河水と完全混合したときの希釈率  $p_u$  と  $q/Q$  との関係を示し、この関係は次式で規定されている。

$$P_u = \frac{Q}{q} \dots \dots \dots (4-1)$$

図-8 において、まず、ある与えられた  $q/Q$  のもとで流入口幅が希釈率におよぼす影響を観察してみると、それぞれの流入口幅に対する  $P_i$  の計算値がほぼ一定した値をとり、図に示している曲線にすべて近似していることから、流入口幅の相違による有意の影響はほとんど認められない。またその他の特徴として、希釈率は、 $q/Q$  が小さい範囲では、 $q/Q$  値の増加につれて急激に減少している点を指摘できる。従つて、汚水流入速度が大きくなつて、 $v_0/U$  が第3領域に入つてくると、対象地点における希釈率は  $q/Q$  によつて一義的に決定されるわけであり、結局、この場合に河川の汚染度を軽減させるには流入汚水量を制限する以外に方法はないといえる。

5. 結 語

直角流入に関する実験に継続して行つた  $45^\circ$  流入の実験から河川または水路の片側から汚水が連続して流入する場合の希釈特性について検討したが、その成果を要約すると次のようになる。

一般にある与えられた流入口幅に対する希釈率 ( $=c_0/\bar{c}$ ) は  $v_0/U$  と密接な関係があり、また、その相対関係は  $v_0/U$  の値によつて相違すると同時に、流入口幅、流入角度に支配される。すなわち、鋭角流入の場合の希釈率は、 $v_0/U$  の小さい第1領域において、 $v_0/U$  の増加とともに減少する傾向にあり、一方、流入角度が直角に近い流入汚水では  $v_0/U$  に影響されなくなる。第2領域では、直角流入形式の幅の狭い流入口であれば、 $v_0/U$  の増加に従つて希釈率も増大するが、幅の広い、流入角度の小さい流入口ではこの領域は次第に消滅する。第3領域においては、一般に  $v_0/U$  の増加に対して希釈率は逆に減少し、さらに、流入角度が  $45^\circ$  程度に減少すれば、流入口幅の増大につれて  $v_0/U$  と希釈率との関係が第1領域のそれに近似してくる。以上の諸特性に注目すると、流入口幅が河川幅に比較して十分小さく、流入角度が直角に近い汚水流入では、流入速度の制御によつて希釈効果の向上が可能となり、河川の平均流速程度で汚水を流入させるのが有利という結果も導けるが、流入口幅が増大し、かつ、流入角度も減少してくると、こうした制御の効果は次第に期待できなくなる。また、以上の点もふくめて、汚水は流入先河川の流向に対してできるだけ直角になるように流入させた方が希釈効果は高いわけで、最後に、高汚濁河川で認められることの多い第3領域の  $v_0/U$  をとる場合について数値計算にもとづく検討を行い、このときの希釈率が汚水流入量と河川流量との比によつてほぼ一義的に決定されることを明らかにした。

水域内汚染度分布を解析するに当つては  $b_T$  を推定しなければならない。ここで、比較的幅の広い支川によつて汚染物質が搬入される場合などを対象にすれば、以上の検討から明らかなように  $b_0 = b_T$  が成立し、初期条件を与える地点において断面内汚染度分布を測定することにより、ただちに  $b_T$  を求めることができる。いま一つの未知数である横断方向平均拡散係数  $\epsilon$  は、淀川中流部にて実測した結果では、流量に異常な変動がない限り、一定した値をとつていた。従つて、一度、対象河川についてこの  $\epsilon$  値を実測により求めておけば、洪水、渇水時など、特殊な状態を除いた平常時の汚染度分布の推定に十分利用できるわけである。事実以上の成果にもとづき、桂川汚水の流入によつて汚染された淀川中流部の汚染度分布を実際に解析した結果は満足すべきものであつた<sup>2)</sup>。なお淀川を対象に水質管理の具体策についても詳細な検討を行つており、その結果については別に発表したい。

終りに臨み、本研究を行うに際し終始御指導をいただいた京大教授 岩井重久博士、同助教授 合田 健博士、また実験に当つて御協力いただいた京大防災研教授 矢野勝正博士に厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 南部：放流汚水の拡散希釈に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 59 号，26号，昭 33
- 2) 岩井・合田・南部・松永：汚濁河川における汚染度分布の解析，水道協会雑誌，（第 304 号，29，昭 35）

図-7  $\epsilon/U \cdot x/B^2, b_T/B$  に対する  $b/B$  の理論値

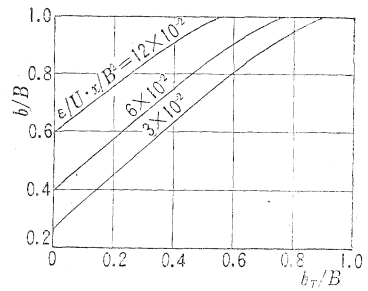


図-8  $\epsilon/U \cdot x/B^2$   $\alpha$  をパラメーターとして示した  $P_i$  と  $q/Q$  の関係

