

二次元および三次元貯水池における内部段波
Internal surge in two and three dimensional reservoirs

東京工業大学工学部 正員 福岡 捷二
東京工業大学工学部 正員 角田 学
東京工業大学工学部 正員 ○ 稲葉 清美

1 はじめに

洪水時に、高濃度の濁水が貯水池に流入すると、濁水は長期にわたり滞流する。これを防止するためには、濁水の流動を明らかにし、適切に濁水の放水を行なうことが必要である。福岡、福嶋らは、流入濁水が下層密度流として運動する場合と中層密度流として運動する場合について、貯水池の幾何学的形状が、濁水先端部の運動にどのように影響するかを明らかにした。本研究の目的は、濁水先端部が下流端に達したときに反射して形成される内部段波について、段波の形成機構と段波内の流動を明らかにすることにある。特に、環境水の密度条件、濁水の放水条件、貯水池の幾何学的形状が、内部段波の形状、波高、遡上速度および濁水層内の流速分布、密度分布にどのように影響するかに着目し、検討した。

2 実験装置および実験条件

図-1に示すように二次元貯水池として水路(A)、水路(B)を、三次元貯水池としては水路(C)を用いた。

水路(A)は、幅5cmで越流堰によって水深が3.8cmに保たれるように工夫されている。流入口と放水口は、共に、高さ1cm、幅5cmのスリット型で、水路床より1.9cmの躍層の高さに設置した。座標原点は流入口の中心にとり、水平軸をx、鉛直軸をzとする。

水路(B)は、幅20cm、水路床勾配(i)が1/10である。上層と中層の厚さは、共に3.0cmである。放水口は、高さ2cm、幅18.5cmのスリット型で、二次躍層の10cm上方に設置されている。座標原点は、二次躍層が水路床と交わる位置にとり、水平軸をx、鉛直軸をzとする。

三次元水路(C)は、上流の3mの区間が幅20cmで、下流の3.6mの区間が20cmから52.7cmに様に増加する漸拡水路である。座標原点は、躍層が水路床と交わる位置にとり、水平軸をx、鉛直軸をzとし、この2軸と直角にy軸をとる。

実験条件を表-1に示す。実験は全て中層密度流で行なった。水路(A)を用いた実験では、流入水の密度を、躍層の上層の密度と躍層の下層の密度の平均値に等しく設定されている($\rho_d = (\rho_1 + \rho_2)/2$)。放水は濁水の流入と同時に開始する。水路(B)の実験では、200ml/sの流入水はplunging部で激しく希釈混合された後、水路床上を流下し、x軸、すなわち二次躍層に沿って流下する。二次躍層進入時の濁水流量は、混合により約1.0 l/sにも達し、濁水の密度は濁水上層の密度(ρ_2)に近くなっている($\rho_d - \rho_2 \ll \rho_3 - \rho_d$)。放水は、濁水先端部が一次躍層に達したときに開始する。水路(C)の実験では、躍層進入時の濁水の密度が、上層と下

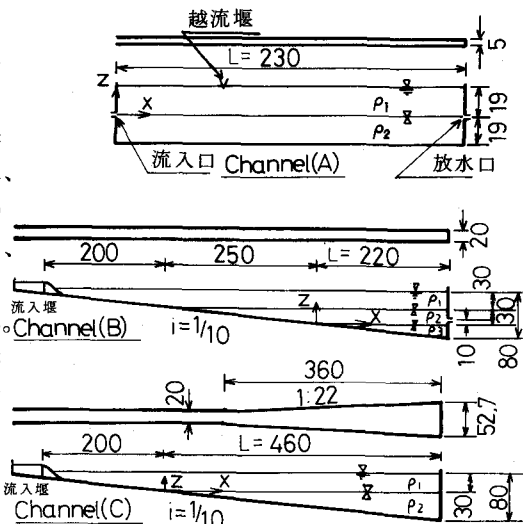


図-1 実験装置 単位 cm

表-1 実験条件

RUN No.	流入水 (濁水) ρ_{d0}		放水		貯水池水	
	相対密度差 ϵ_d	流入量 Q_0 (ml/s)	放水口の位置 z (cm)	放水量 Q_{out} (ml/s)	上層の密度 ρ_1 (g/cm ³)	層間の相対密度差 ϵ_0 (ϵ_d')
A-1	0.0150	100	—	0	0.9970	0.0300
A-2	0.0150	100	0	30	0.9991	0.0300
A-3	0.0150	100	0	50	0.9997	0.0300
A-4	0.0150	100	0	100	0.9997	0.0300
B-1	0.0100	200	—	0	0.9991	0.002000069
B-2	0.0100	200	10	400	0.9993	0.001900083
C-1	0.0165-176	200	—	0	0.9967-73	0.0087-91

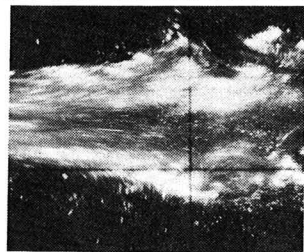
$$\epsilon_d = (\rho_{d0} - \rho_1) / \rho_1 \quad \epsilon_0 = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$$
$$\epsilon'_0 = (\rho_3 - \rho_2) / \rho_2$$

層の密度の平均値に等しくなるように実験条件と設定した($\rho d = (\rho_1 + \rho_2) / 2$)。以後、実験条件は(A)の水路を用いた場合をA-1のように表わす。

3. 二次元貯水池における内部段波

3-1 段波の形成と遡上形態 濁水先端部が下流端に達すると、濁水層は急激に厚さを増し段波が形成される。写真-1はこの瞬間を撮ったものである。トレーサーとしてアルミ粉末を用いた。図-2に、放水がないA-1の場合と放水があるA-4の場合の段波の遡上の様子を示す。記号 t は、濁水先端部が下流端に達してからの時間経過を示す。

写真-1



濁水の反射
(A-1)

段波は、濁水の密度が上層の密度と下層の密度の平均値に等しいために上・下対象な形状をとる。放水がある場合でも、放水口が躍層の位置に一致しているA-2、A-3、A-4の条件では、図-2-(b)に示すように上・下対象な段波となる。

B-1、B-2の場合は、希釈濁水の密度が下層の密度より十分小さく下層側に進入できないために、上層側での波高が卓越した段波となる(図-8-(a)、(b)参照)。

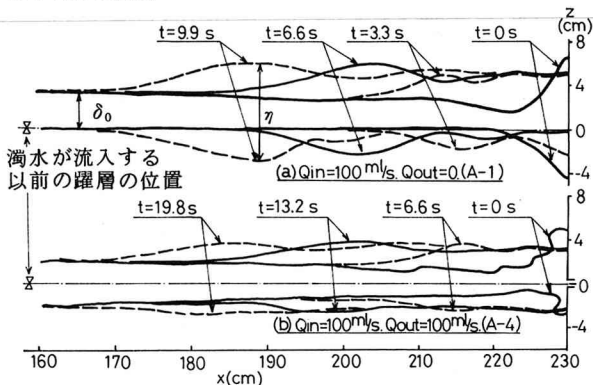


図-2 段波の遡上形態

3-2 段波の厚さおよび遡上速度 図-3は、図-2-(a)に示した段波の厚さ η の距離的变化を示したものである。放水がないA-1の場合、 η はほぼ一定の厚さを保って伝播する。放水量が小さいA-2の場合も、 η はほぼ一定となる。放水量が大きいA-4の場合は、 η の減少が明確である。

図-4は、遡上段波が上流端に達したときの、各地点における濁水層の厚さ δ' を示したものである。A-1、A-2の値はほぼ等しくなっているが、A-4の場合は δ' の減少が大きい。

図-5に段波の遡上速度変化を示す。放水量の大小が、段波の遡上速度に顕著な影響を与えている。図-3で示したように段波の厚さ η は、各実験条件で一定の値を示すため、段波の遡上速度もほぼ一定値を表わしている。

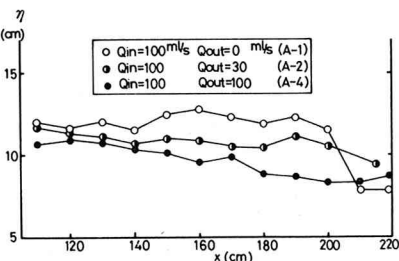


図-3 段波の厚さ η の距離変化

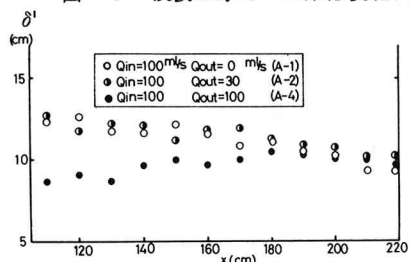


図-4 段波フロント通過後の濁水層厚 δ'

3-3 段波遡上に伴う流速分布の変化 流速分布の測定には水素気泡法を用いた。測定断面は $x = 140\text{ cm}$ と $x = 210\text{ cm}$ の2箇所である。この2断面にカメラを固定して、段波遡上に伴う流速分布の変化を調べた。測定結果を図-6に示す。記号 t は図-2の場合と同様に、濁水先端部が下流端に達してからの時間経過を表わしている。

A-1の実験における $t=0\text{ s}$ の流速分布は、定常部のものである。この分布形は、段波が通過するまでほとんど変化しない。 $x = 210\text{ cm}$ の $t = 10\text{ s}$ の流速分布は、段波のフロントがその位置に到達するす前のものであり、濁水層が急激に厚くなっている。 $t = 20\text{ s}$ では、段波フロントが $x = 140\text{ cm}$ の直前に

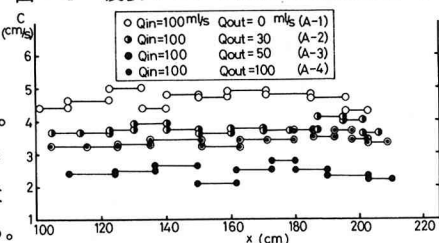


図-5 段波の遡上速度

達しており、濁水層は厚さを増し流速が減少している。このとき、すでに、段波が通過している $x = 210\text{ cm}$ の流速分布は、平均的に零になっている。 $t = 30\text{ s}$ は、段波が $x = 140\text{ cm}$ の断面を通過した直後であり、平均流速は零に変化している。さらに段波が遡上しても、この流速が零の状態は両断面とともに持続している。このように、段波が通過することによって流速が零に減ずる現象は、段波内部における濁水の流動を可視化することによって、確認することができる。

写真-2-(a)、2-(b)は、流速分布の測定箇所段波を撮影したものである。写真-2(a)において、定常部の濁水が遡上する段波との間で跳水を起こし、段波背後へ進入することを防げられている。写真-2-(b)においても同様に、定常部の濁水は、遡上段波との間で跳水を起こし、段波の厚さに変換されている。この段波形成のプロセスは、連続かつ一様に生じ、段波は一定厚さ、一定速度で遡上する(図-3、図-5 参照)。

図-6-(b)は、A-2の実験における流速分布である。 $t = 0\text{ s}$ の流速分布は定常部のものである。 $t = 25\text{ s}$ は測定断面に段波が達したとき、 $t = 35\text{ s}$ 、 60 s は段波フロント通過後である。放水があるため、A-1と異なり、段波通過後も流速分布をもつ。段波通過後は、流速が時間とともに減少を続け、最終的に段波内を通過する濁水流量は、放水流量と等しくなる。この段階に達すると、流速分布は定常となる。

図-6-(c)は、A-4の実験における $x = 140\text{ cm}$ の流速分布である。 $t = 30\text{ s}$ で段波のフロントは、この測定断面に達している。流速分布形は、 $t = 30\text{ s}$ 以後ほとんど変化しておらず、段波フロントの通過後も定常状態が保たれている。これは、濁水の流入量と放水量が等しいため、直ちに定常状態が達成されるためである。写真-2-(c)は、A-4の実験における内部段波の流動を可視化したものである。濁水は、段波内で滞流せず、段波背後へ流下している。

図-7は、濁水が二次躍層上を進入するB-1、B-2の実験における、段波フロン通過前後の流速分布、密度分布を示したものである。流速分布、密度分布は、共に $x = 100\text{ cm}$ と $x = 180\text{ cm}$ の2箇所測定した。図

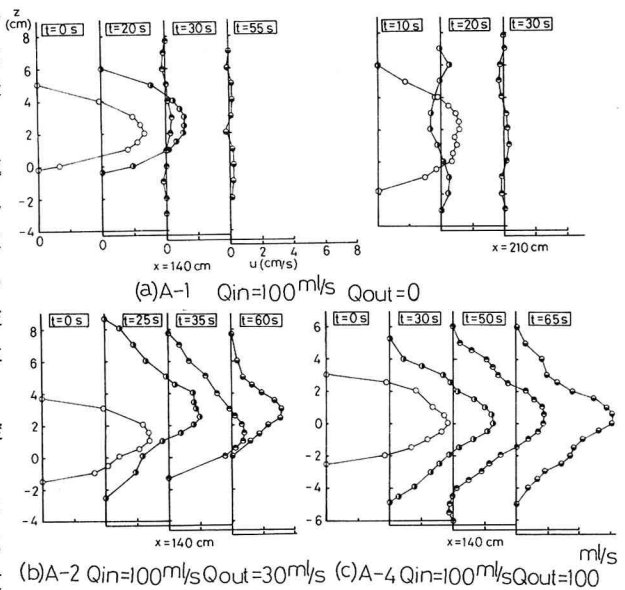
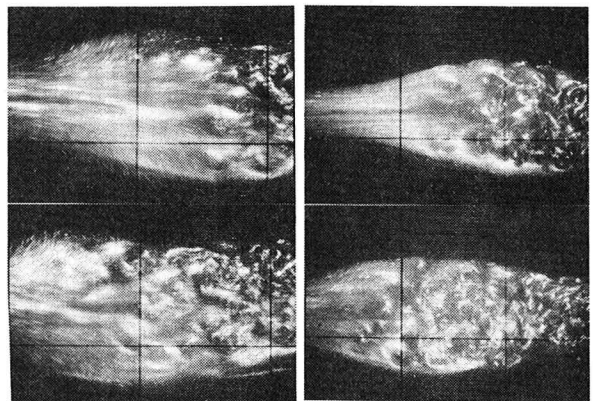
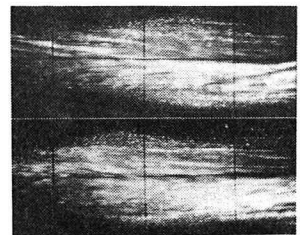


図-6 段波遡上に伴う流速分布の変化



A-1 $Q_{in}=100\text{ ml/s}$ $Q_{out}=0$



(c) A-4 $x=140\text{ cm}$

$Q_{in}=100\text{ ml/s}$ $Q_{out}=100\text{ ml/s}$

写真-2 段波内部の濁水流動の可視化

中の記号 t は、濁水先端部が一次躍層に達してから時間経過を表わしている。 t_2 は、濁水先端部が二次躍層を進入し、下流端に達したときの時刻である。

t_3 は、形成された段波が上流の測定断面である $x = 100 \text{ cm}$ の位置を通過した時刻である。○印が密度分布、実線が流速分布である。●印は濁水が存在する範囲の密度分布を表わしている。

(1) 放水がない場合、B-I 図-7-(a)

において、時刻 t_2 と時刻 t_3 の密度分布を比較

すると、 t_3 では、段波通過により濁水（密度： ρ_d ）の厚さが増加して、一次躍層と二次躍層間の層厚（密度： ρ_2 ）が減少している。このことから、段波通過時に、一次躍層と二次躍層の間で濁水と密度 ρ_2 の周囲水が混合し、濁水化が進んでいることがわかる。時刻 t_3 における2断面の流速分布を比較すると、下流の $x = 180 \text{ cm}$ では段波内の流速が零になり、段波フロントが通過した直後の $x = 100 \text{ cm}$ では、流速が減少しているものの、いままお下流向きの流速が存在している。

以上より、一次躍層と二次躍層間の段波内の濁水流動を模式的に表わせれば図-8-(a)のようになる。すなわち、濁水の大部分は直接的に段波の厚さになり、残りの濁水は段波内へ進入し段波背後の厚さを増加させる。しかし、この段波の形成は、全体的にA-1の場合と同じである。

(2) 放水がある場合、B-2 図-7-(b)に示されている流速分布、密度分布を、放水がない場合と比較すると次のようになる。i)、段波通過による濁水層の増加の割合は、放水がない場合と差異はない。ii)、下流側の測定断面の流速は、段波フロント通過後に減少するが、放水がない場合のように零にはならない。iii)、上流側の測定断面の流速分布は、段波フロントの通過直後に、殆んど変化が見られない。

以上のi)、ii)、iii)、を考慮すると、放水がある場合の濁水の流動は、図-8-(b)のように模式化できる。すなわち、濁水の—

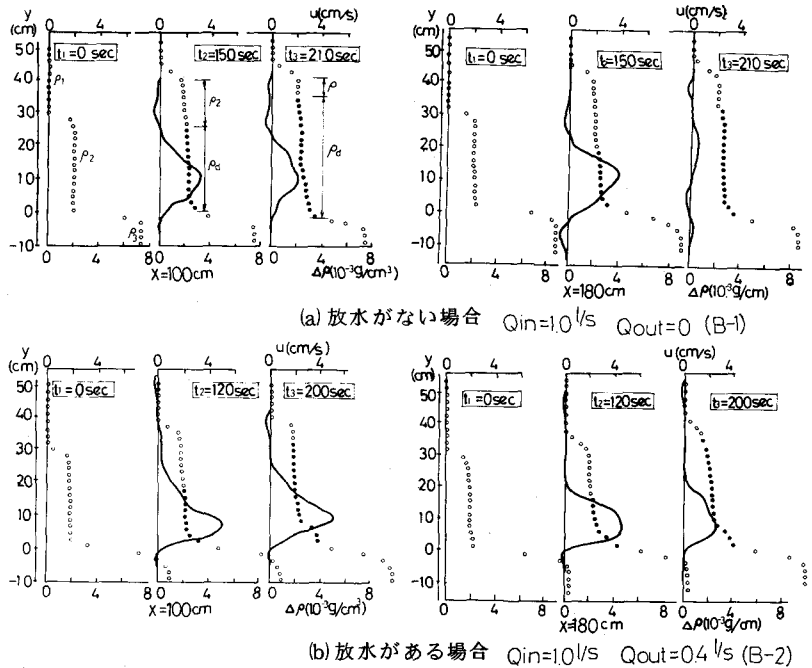


図-7 二次躍層上を遡上する段波フロントの通過前後の流速分布、密度分布

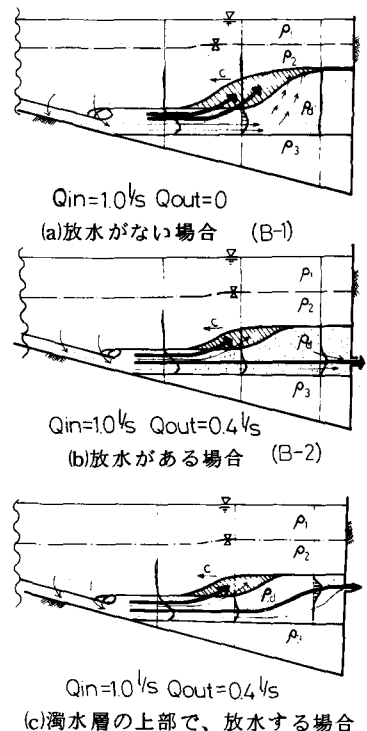


図-8 二次躍層上を遡上する段波の形成機構

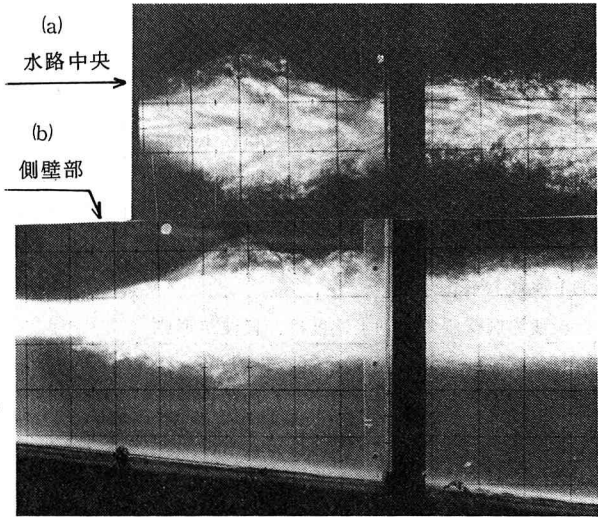
部は、段波のフロント部および段波の背後部に進入して濁水層の厚さに変換されるが、残りの濁水は段波内を流下して放水される。このため、段波の波高および遡上速度は減少するが、段波背後部の濁水厚は、放水がない場合とほぼ等しくなる。この段波遡上時における濁水流動は、A-2の場合に近い。これは、実験条件、主に濁水の流入量と放水量の大小関係が、濁水の流動を強く支配しているためである。

また、放水口を二次躍層の20 cm 上方 ($z = 20 \text{ cm}$) に設置し、B-2 の条件で実験を行なうと、段波の形成機構は図-8-(c) のようになり、B-2 の場合 (図-8-(b)) と類似する。これは、躍層に対する放水口の位置よりも、濁水と周囲水との密度の相対的な関係が、段波の形成を強く支配しているためである。

4. 三次元貯水池における内部段波

4-1 段波の形状 三次元水路の漸拡部 3.6 m の区間に、水路の側面および上面より幅 5 cm のスリット光源をあて、内部段波の平面形状と縦断形状を写真撮影した。写真-3-(a) は水路の中心線沿いの、3-(b) は側壁より 5 cm の位置の、段波の縦断面を撮影したものである。トレーサーは、流入水にアルミ粉末を混ぜたものである。

図-9-(a) は、躍層より 15 cm 上方、($z = 15 \text{ cm}$) の、段波の平面形状の変化である。9-(b)、9-(c) は、写真-3-(a)、3-(b) に示した段波縦断面の写真をスケッチしたものである。段波の形状変化は、10 秒毎に記入した。この形状変化より、漸拡水路における内部段波には、次の特徴がある。



(段波の遡上位置 : $x = 250 \text{ cm}$)
写真-3 漸拡水路を遡上する内部段波

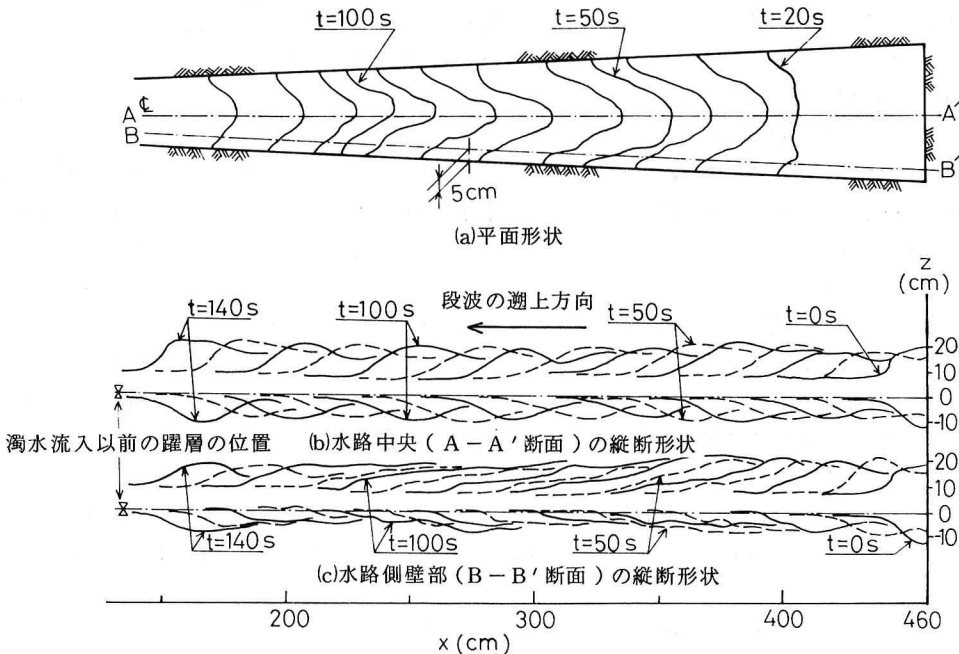


図-9 三次元水路 (漸拡水路) における段波の形状変化

段波は、形成後、遡上を始めると側壁付近の伝播が速くなり、両側で突出した平面形状をとる。このとき、段波の中央部では、フロント部の波高が大きくなり、側壁部の縦断形状は、段波背後部の方がフロント部よりも厚さが大きくなる。段波が、漸拡水路の中流部を遡上する頃から、側壁部が突出した平面形状は次第に弱まっていき、上流部を遡上するときには、横断方向にほぼ一般的な平面形状に変化する。縦断形状も、中流部から上流部にかけて徐々に変化していき、中央部と側壁部の形状の違いはほとんどなくなる。

以上のような、漸拡水路における段波の平面形状および縦断形状の変化は、後述する流速分布の変化を検討することにより、明らかとなる。

4-2 段波の厚さおよび遡上速度の変化

図-10は、水路中央部における段波の厚さ η の遡上方向変化と、段波の遡上速度の変化を表わしたものである。遡上速度は、上層界面と下層界面とに分けて表示している。以後、前者を上部段波、後者を下部段波と呼ぶことにする。また、段波フロント部の側壁側での遡上速度も示した。

段波の側壁側での遡上速度は、段波が形成された直後は大きな値を示す。このため、図9-(a)のように側壁側が突出した形状になる。上部段波と下部段波の遡上速度は、 $x=210$ cm迄ほぼ同じ割合で増加し、等しい値を示している。このとき、段波の厚さも徐々に増加

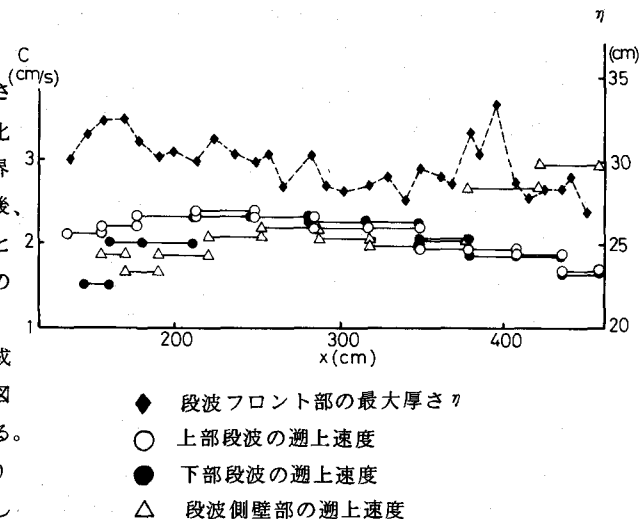


図-10 段波の厚さと遡上速度の変化

を続けている。これは、水路幅が、段波の遡上方向に狭くなるためである。 $x=210$ cmより上流では、上・下段波は共に遡上速度を減じる。特に、下部段波の減少の割合は大きい。これは、濁水層下部と水路床との距離が接近し、下部段波の運動が制限されるためである。段波側壁部の遡上速度は、漸拡水路の中流部から減少している。このため、図-9-(a)に示したように、側壁側が突出す形状は次第に変化していく。

4-3 段波遡上に伴う流速分布の変化

横断流速分布と縦断流速分布を、 $x=150$ cm、 250 cm、 350 cm、 430 cmの4箇所測定した。横断流速分布は、流速が最大となる躍層の3 cm上方で測定した。縦断流速分布の測定は、水路中心線沿いと側壁より5 cm離れた位置で行なわれた。濁水先端が下流端に達したときを $t=0$ sとし、それ以後5秒毎に各断面で水素気泡を撮影して、これを解析した。測定結果を図-11に示す。図-11における、 $t=15$ s、 50 s、 90 s、 140 sは、段波フロントが各測定断面を通過してから10秒経過した時刻である。

図-11-(a)の横断流速分布を見ると、段波フロント通過後に、 $x=430$ cm、 350 cm、 250 cmでは、水路中央部の流速が減少して、側壁部に逆流が生じている。この、水路中央部の順流、側壁部の逆流は、さらに時間が経過しても持続している。縦断流速分布を見ると、段波フロント通過後に、横断流速分布と同様の变化をしている。このことから、段波フロント通過後には、水路中央部に順流、側壁部に逆流が、濁水層の全水深にわたり生じていることがわかる。

$x=150$ cmでは、段波フロント通過後の逆流は小さく、この位置より下流の3断面で見られるような顕著な順流、逆流の分布は生じない。このことは、前に述べた、段波フロントの平面および縦断形状の変化と関連している。

すなわち、側壁側で突き出す段波フロント部の形状特性が、遡上するにつれて弱まっていくのは、側壁部に生じる逆流の減少により、段波の側壁部での伝播速度が減じるためである。このように、上流部では、段波内の濁水流動が、三次元的なものから二次元的なものに変化することがわかる。

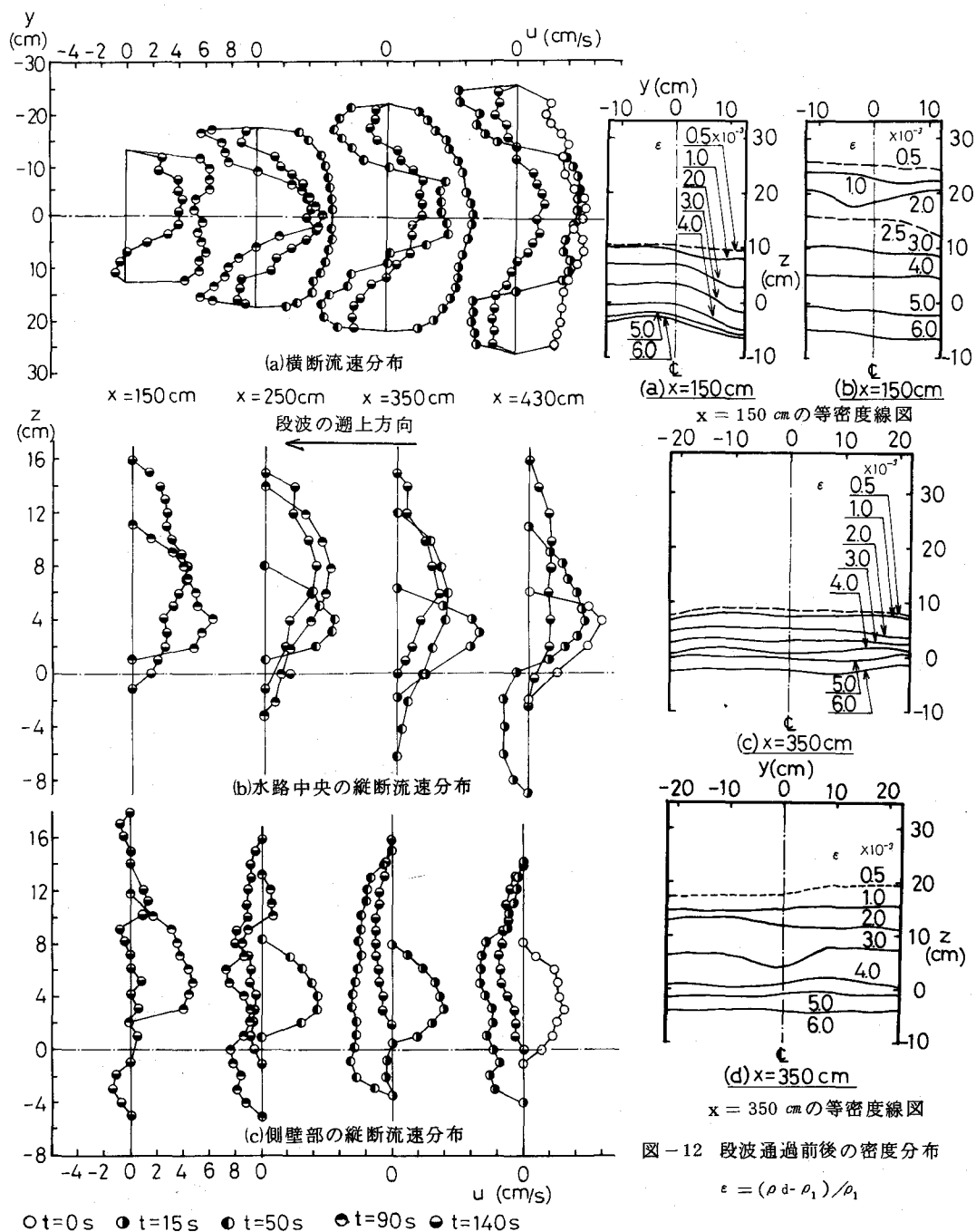


図-11 段波遡上に伴う流速分布の変化 (C-I)

4-4 段波遡上による密度分布の変化 導伝率計を $x = 150 \text{ cm}$ と $x = 350 \text{ cm}$ の位置に設置し、段波通過前後の濁水層の密度を測定した。図-12-(a)、12-(c)は、段波フロント通過前の定常部における等密度線図であり、図-12-(b)、(d)は、段波フロント通過後の等密度線図である。図中の数字は、 $\varepsilon = (\rho_d - \rho_1) / \rho_1 \times 10^{-3}$ (ρ_d : 濁水の密度、 ρ_1 : 上層の密度)を示している。

いずれの図の等密度線も、ほぼ等しい間隔になっており、濁水層内の密度が、鉛直方向にほぼ直線的に変

化していることがわかる。また、横断方向に密度の変化は少く、密度分布には三次元性が現われていない。段波フロント通過後の流速分布と考え合わせると、密度分布が横断方向に一樣であることは、定常部より段波内へ進入した濁水が、下流端で幅方向に拡がり、側壁に沿って逆流することを示している。

福岡らは、三次元下層密度流の先端部背後の密度分布を調べている。そこでは、側壁付近の流体の密度が、濁水層のいずれの高さでも、中央付近よりも大きくなっている。これは、先端部内の流れの構造が、本研究で対象としている段波内の流れの構造と異なり、フロントの先端の、密度の高い流体が、先端部背後の側壁付近に回り込んだためである。

5. 二次元内部段波と三次元内部段波の比較

三次元段波内の密度分布は、図-12-(b)、12-(d)で示したように三次元性が弱い。

図-13は、定常部の濁水層の厚さ δ_0 と、段波が上流端に達したときの、段波フロント背後の濁水層厚 δ' の比を比較したものである。三次元段波の場合、段波の特性が、二次元的なものから二次元的なものに変化する上流部を除けば、 δ'/δ_0 はほぼ一定の値を示している。二次元段波の場合は、完全跳水となるため、 $\delta'/\delta_0 \approx 2.0$ である。このことから、二次元貯水池および三次元（漸拡）貯水池における段波の形成機構は、図-14-(a)・(b)のように表わすことができる。

(a)二次元段波の場合；定常部より流入する濁水は、段波フロントにおいて完全に跳水を起こし、直接的に段波の厚さに変換される。この現象は、段波の遡上に伴い、連続かつ一様に起こり、段波は、一定厚さ、一定速度で遡上する。

(b)三次元段波の場合；定常部より段波内へ進入した濁水は、水路の中央部をそのまま流下し、下流端で幅方向に拡がり、側壁付近を逆流する。この、濁水の逆流現象は、連続して起こるため、段波のフロント部は、側壁側でやや突出した平面形状をとる。

最後に、本研究は、昭和56年度、昭和57年度文部省科学研究費試験研究(1)（代表者；早稲田大学、吉川秀夫教授）の補助により行なわれたことを付記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1); 福岡、福嶋、宮本、第25回水講1981
- 2); 稲葉、福岡、第36回水講1981
- 3); 稲葉、福岡、角田、第37回水講1982

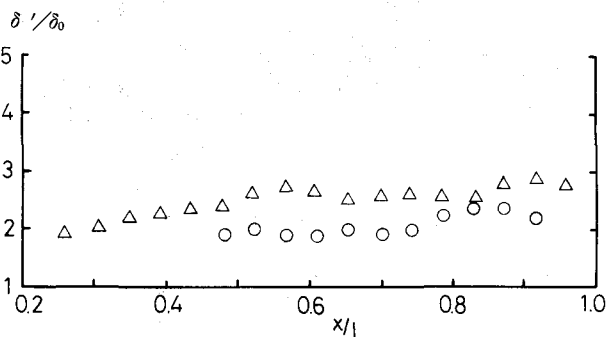
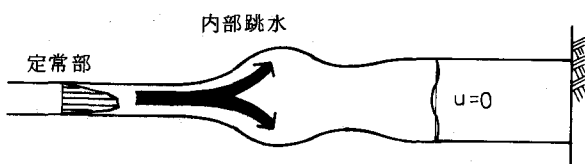
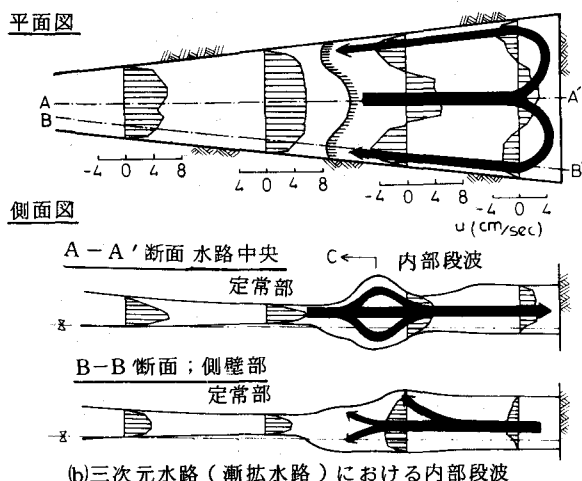


図-13 二次元段波と三次元段波の δ'/δ_0 の比較

○ 二次元段波 (A-1)
△ 三次元段波 (C-1)



(a)二次元水路における内部段波



(b)三次元水路（漸拡水路）における内部段波

図-14 二次元段波と三次元段波の形成機構