

# 開水路底流型水門の自由流出に関する基礎的研究

## BASIC INVESTIGATION ON FREE EFFLUX FROM AN UNDERFLOW GATE IN A HORIZONTAL OPEN CHANNEL

名 合 宏 之\*  
By Hiroshi NAGŌ

### 1. 緒 言

流量ならびに水位を制御するために設置される水門の水利機能の解析は、多くの研究者が行ってきた水理学の基本課題の一つである。一方、水問題とそれを取りまく環境の変化は、この課題を新しく見直す水工学的・水理学的の必要性をもたらし、水門の流れにおよぼす調節機能は水理学的興味のみならず、水利用における効率的運用、河川水の統合管理に関する技術的側面を分担する重要課題として認識されるようになってきた。

本研究は上述の実情を背景とし、各種水門の調節機能を水理学的に解明していく研究の第一歩として、もっとも基本的な形状である底流型水門を対象とし、その自由流出時の水理解析を行うにあたっての力学的基礎を明らかにしようとするものである。すなわち、この種の水門の水理解析の基礎となる縮流係数ならびに流量係数に関する従来の研究成果を整理するとともに、現在未解明の問題点の一つである、水理模型実験における縮尺効果の特性について実験的な検討を行い、これら諸係数の実物における水理学的挙動を明らかにし、あわせて、従来より行われてきた理論的かつ実験的な解析結果の適用性について検討しようとするものである。

### 2. 従来の研究の概要とその問題点

図-1 に示されるような、底流型水門の自由流出時の水理学的挙動は、縮流係数  $C_c$  を与えることによってほぼ明らかにされる。したがって、従来の基礎的な研究においては、縮流係数の特性を解明することが基本的な課題とされてきた。また、水門の水利機能設計を行うという実用的な観点からは、水位と流量の関係、結論的には流量係数の特性を解明することが重要な課題とされてき

た。ここでは、これら諸係数について行われてきた従来の研究の概要を述べ、すでに明らかにされた事項を要約するとともに、現在未解明な水理学的問題点を示

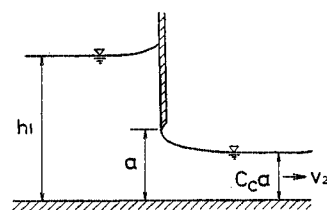


図-1 自由流出模式図

し、以下に述べる本研究の方針を明らかにしておこう。

#### (1) 縮流係数に関する研究

水門の縮流係数に関する本格的な研究は、1920 年代における Koch と Carstenjen の理論的な研究<sup>1)</sup>に始まるようである。彼らは、水門上流側流出口近傍の流速分布を仮定し、流体に作用する力のつり合い条件より簡単に縮流係数を求める方法を提案した。この方法および得られた解は、後に Horton<sup>2)</sup> や Knapp<sup>3)</sup> によっても用いられているが、仮定された流速分布の妥当性が明確でないこと、また、その取り扱い法では、水門に作用する流体力の説明に無理が生じることなどのため、現在ではほとんど用いられていない。彼らより約 10 年ほど遅れて 2次元ポテンシャル理論による取り扱いが Müller<sup>4)</sup> によって導入されている。このような取り扱いは、自由流線理論に基づいた Cisotti<sup>5)</sup> や v. Mises<sup>6)</sup> による容器からの流出問題の解析、あるいは、Betz と Petersohn<sup>7)</sup> による格子状に配列された板のまわりの流れの問題の解析にその基礎を置いている。Müller は Betz らの解をそのまま水門のまわりの流れに適用したが、この解は重力場における自由表面の条件を満足していないため、適用範囲は重力の影響（下流自由表面における速度変化、上流側における水位上昇）がほとんど無視される場合に限られた。以後、この重力の影響の問題について、Pajer<sup>8)</sup> を始めとして、多くの研究者によって検討され、種々の修正解が提案されるとともに、今日では電子計算

\* 正会員 工博 岡山大学助教授 工学部土木工学科

表一 縮流係数の理論解

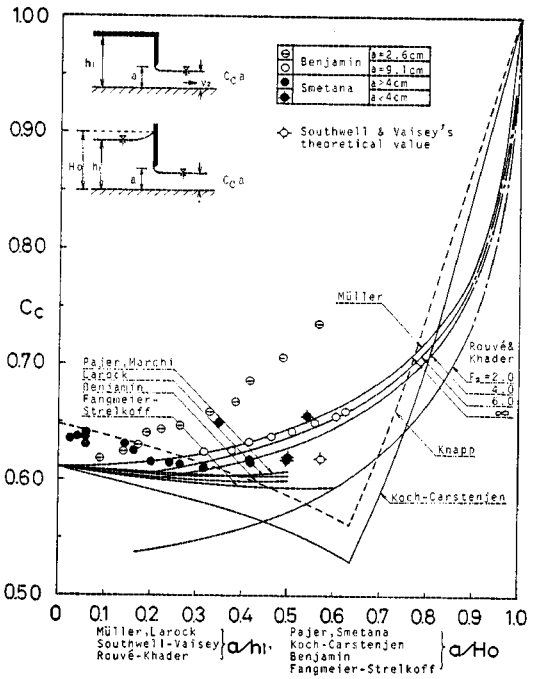
研究者	年代	モデル・解析法・解の特徴	水門上流側
Koch-Carstenjen	1926	Kochの仮定(Knappによる)を用い、流出口近傍の流体に作用する力の釣合条件より求める	開水路
Müller	1935	重力の影響無視・Betz-Petersohnの解を水門に適用	開・管水路
Pajer	1937	2次元ポテンシャル理論 流出断面および縮流断面においてのみ自由表面条件満足	傾斜角 90° 傾斜角 任意
Marchi	1953		
Benjamin	1956	定常孤立波理論によりPajerの解を修正	"
Southwell-Vaisey	1946	上流・下流とも自由表面条件を満足	電子計算機使用
Fangmeier-Strelkoff	1968		
Larock	1969	上流水面水平・下流自由表面条件満足、計算時間少	開・管水路
Rouvé-Khader	1969	フルード数をパラメーターとして解を得る	管水路

機を用いることにより、ほぼ厳密な解が得られるに至っている<sup>9)~16)</sup>。すなわち、水門の上流・下流ともに開水路状態の場合については Fangmeier と Strelkoff<sup>14)</sup> が、また、水門上流側が管路状態の場合については Rouvé と Khader<sup>16)</sup> がそれぞれ解を得ている。表一には、上述の理論的研究の代表的なものの特徴がまとめて示されている。また、図一2には、鉛直刃形水門について得られた理論解が、Benjamin<sup>10)</sup> および Smetana<sup>17)</sup> の実験値とともに示されている。図中の記号  $a$  は水門の開き高、 $h_1$  は上流水深（あるいは管路の高さ）、 $H_0$  は上流側比エネルギー、 $F_2$  は縮流断面のフルード数、 $V_2$  は縮流断面の流速、 $g$  は重力加速度である。これらの表および図より、縮流係数に関する従来の理論的・実験的研究結果は次のように説明される。

① 上流側が開水路状態を対象とした Pajer<sup>8)</sup>、Marchi<sup>9)</sup>、Larock<sup>15)</sup> および Benjamin<sup>10)</sup> らの解は、重力の影響を考慮した近似解であるが、厳密解である Fangmeier らの解と量的にはほとんど差はない。特に、Larock の解と Fangmeier らの解との差は、上流水面を水平面で近似した場合の縮流係数の増加量を示すが、これは最大約 2% 程度である。

② Southwell<sup>11)</sup> らの解は、理論解析上の仮定だけを考えて、Fangmeier らの解と一致すべきものであるが、かなりの差が認められる。これは、計算法の違いによる精度の差が現われたものとみなさなければならない。

③ 上流側が管路状態に対する Rouvé<sup>16)</sup> らの解は、 $a/h_1$  が一定の場合、縮流断面のフルード数  $F_2$  が大きくなる（上流の圧力水頭が上昇する）にしたがって、縮流係数が増大していくことを示し、その上限は重力の影響がない場合 ( $F_2 = \infty$ ) で Müller の解に一致する。



図一2 縮流係数

④  $a/h_1$  を一定にした場合、上流側が開水路になる状態は  $F_2$  の最小値を与える。したがって、管路状態から開水路状態に変化する場合、2次元ポテンシャル理論に基づく解は、Müller の値（最大値）から、Fangmeier の値（最小値）にまで変化する。Rouvé らは Fangmeier らの曲線より下の領域の縮流係数についても計算しているが、このような領域は上流側水面の圧力が下流側水面のそれよりも小さい場合に相当し、実用上まったく意味のない解といえる。

⑤ Koch らの理論解は、2次元ポテンシャル理論による解 (Fangmeier) に比べて、 $a/h_1$  の大きな領域でかなり小さな値を与える。なお、図中の Knapp の曲線は、Koch らの理論解を 1.06 倍したものであるが、これは Smetana の実験値を参考にし、縮流係数の実用的な値として推奨しているものである。

⑥ 実験値はすべて上流側が開水路の状態について得られたものであるが、これらの実験値の特性はいずれの理論解によっても単純に説明しうるものでない。特に、Benjamin の実験値では、開き高  $a$  の変化に対し、縮流係数が著しく変化し、顕著な縮尺効果が存在することを示している。

上述のように、縮流係数に関する理論的な研究は従来より数多くなされ、鉛直刃形水門については、理論解の特性はほぼ明らかにされている。一方、実験的な研究の結果では、実験値に顕著な縮尺効果が存在することが示されているが、その一般的特性は明らかにされておら

ず、現実の縮流係数の示す挙動は未解明の状態である。このことは、上述の理論解の適用性も明らかにされていないことを意味しており、今後、縮流係数に関する研究、さらに一般に、水門からの流出の解析をすすめていくうえにおいては、まず、模型によって得られる実験値の特性、特に実物における現象との対応について十分検討しておくことが必要であるといえよう。

(2) 流量係数に関する研究

図一3は、もっとも単純な流出モデルである水平床上の鉛直水門について得られている、流量係数の理論的ならびに実験的な研究結果を示したものである<sup>2), 17)~23)</sup>。なお、流量係数は次式の形に整理されている。

$$C = \frac{Q}{Ba\sqrt{2gh_1}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $C$  は流量係数、 $Q$  は流量、 $B$  は水路幅、 $g$  は重力加速度である。図中の Müller および Fangmeier らの理論曲線は、図一2 に示された縮流係数に対するそれぞれの理論解を用い、次式によって計算されたものである。

$$C = C_c / \sqrt{1 + C_c a / h_1} \dots\dots\dots (2)$$

さきに述べたことからわかるように、開水路水門に対する理論曲線としては、これらの曲線のうち重力の影響が考慮された Fangmeier らの曲線が用いられるべきであり、Müller の曲線は参考値として示したものである。実験値は、縮流係数の場合と同様に、著しくばらつく

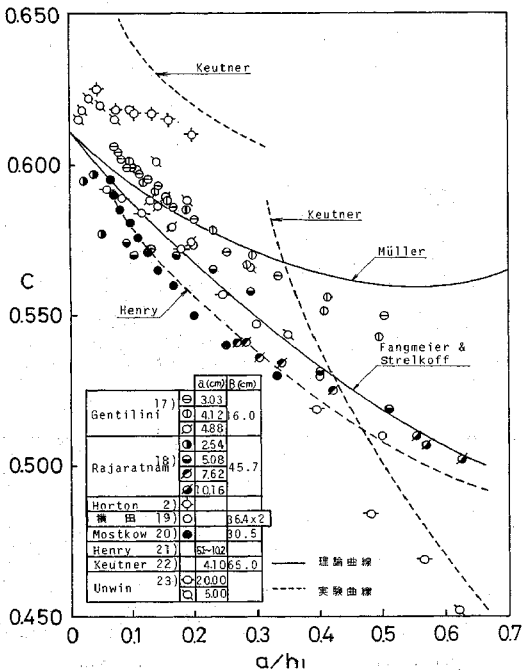
ことがわかる。ばらつきの範囲は同一の  $a/h_1$  に対して最低値より 10 ないし 15% に及ぶが、そのばらつき方には次のような2つの性質が認められる。一つは、Gentilini, Rajaratnam あるいは Unwin などの実験値においてみられるように、水門の開き高の変化によって同一の  $a/h_1$  に対する流量係数の値が変化することであり、いま一つは、各研究者ごとの実験値群にかなりの差が認められることである。前者の差は、縮流係数の実験値において認められたのと同様な縮尺効果が現われているとみなしてよい。Rajaratnam らの実験値では、同じ  $a/h_1$  に対して開き高が大きくなると流量係数は若干小さくなることを示している。しかし、ここに示された実験値のみでは縮尺効果の一般的特性を知ることは困難であり、さらに、系統的な研究が必要である。次に、後者の差は図中に示された水理条件の差によって説明しうるものでなく、むしろ実験におけるほかの要素、たとえば、水門板先端形状のわずかな違い、水路境界面の粗滑状態の差あるいは流量測定誤差などの影響が総合された結果とみなさなければならない。特に、水門板先端の形状は流出流量に大きく影響するといわれている<sup>24)</sup>、その定量的な評価を行うための資料はほとんどなく、詳細な検討が必要とされることである。

このように、流量係数の実験値は著しくばらつくが、従来の研究では、その原因である縮尺効果の特性あるいは水門板先端形状の影響などについてはほとんど解明されていない。このことは単に理論解の適用性が明らかでないのみならず、現実の問題として、各種水門の流量係数を水理模型実験によって求めることの力学的基礎がきわめて不明確といわざるをえない。

以上、縮流係数および流量係数に関する従来の研究結果について概述したが、いずれについても、模型によって得られる実験値の特性、特に縮尺効果の特性が明確にされていないことが、それぞれの研究をすすめていくうえにおいて大きな支障となっているといえよう。この点を考慮し、以下では、各種底流型水門の自由流出時の水理特性を解明するための基礎として、形状的にもっとも単純な鉛直刃形水門を対象とし、その縮流係数および流量係数における縮尺効果の特性を実験的に明らかにし、その結果に基づいて、実物におけるこれら諸係数の水理学的挙動の推定を行い、あわせて従来から行われてきた水理解析結果の適用性について検討することにする。

3. 流出現象の相似条件と縮尺効果

縮流係数および流量係数における縮尺効果は、模型の大きさを変えた場合の流出現象の非相似性の結果として現われるものである。ここでは、これら諸係数の縮尺効



図一3 流量係数

果を実験的に検討するに際し、まず、流出現象が相似であるための条件を次元解析的に明らかにするとともに、縮尺効果の発生原因および縮尺の変化に伴う流況の変化特性を明らかにしておこう。

水平開水路に設置された鉛直刃形水門からの自由流出を支配する重要な物理量としては、次のようなものが挙げられる。

水門の開き高	$a$
水路幅	$B$
上流水深	$h_1$
流量	$Q$
重力加速度	$g$
密度	$\rho$
粘性係数	$\mu$
表面張力	$\sigma$

ここでは、上流水深  $h_1$  および流量  $Q$  を示したが、これらの物理量は、自由流出においては互いに従属関係にある。すなわち、ほかの物理量を与えられた場合、 $h_1$  を与えると  $Q$  は一義的に決定される。したがって、現象を支配する独立な変数としてはいずれか一方を用いなければならない。

$h_1$  を独立変数として用いた場合は、流出に伴う定量的な性質  $A$  は次のように表わされる。

$$A = f_A(a, B, h_1, g, \rho, \mu, \sigma) \dots\dots\dots (3)$$

また、 $Q$  を用いた場合は、

$$A = f'_A(a, B, Q, g, \rho, \mu, \sigma) \dots\dots\dots (3')$$

と表わされる。いま、次元の基本量として、 $a, g$  および  $\rho$  を用いて次元解析を行うと、式 (3) に対応する無次元の関係式として次式が得られる。

$$\pi_A = \varphi_A \left( \frac{a}{B}, \frac{a}{h_1}, Re, We \right) \dots\dots\dots (4)$$

また、式 (3)' に対応して次式が得られる。

$$\pi_A = \varphi'_A \left( \frac{a}{B}, Fr, Re, We \right) \dots\dots\dots (4')$$

これらの式に含まれる  $Fr, Re$  および  $We$  はそれぞれ次のように表わされる。

$$Fr = \frac{Q}{\sqrt{ga} \cdot a^2}, Re = \frac{\sqrt{ga} \cdot a}{\mu/\rho}, We = \frac{\sqrt{ga}}{\sqrt{\sigma/a\rho}} \dots\dots\dots (5)$$

式 (4) および式 (4)' より、自由流出における定量的性質は、無次元量  $a/B, a/h_1$  (あるいは  $Fr$ )、 $Re$  および  $We$  によって記述されることがわかる。なお、式 (4) と式 (4)' とは、現象を記述するパラメーターとして、 $a/h_1$  を含むか、あるいは  $Fr$  を含むかの点で異なっている。上述のように、現問題ではいずれの表現を用いてもよいわけであるが、従来より、水門からの流出現象の説明にさいしては、パラメーターとして  $Fr$  よりも開度  $a/h_1$  が用いられることが多い。この点を考慮し、本研究では、

$a/h_1$  の現象を記述するパラメーターとして用いることにする。

さて、流出模型が実物と力学的に相似であるということは、模型における  $\pi_A$  の値が実物のそれと等しいことを意味するが、そのためには、上述のすべての無次元量の値が両系で等しくなければならない。ところが、よく知られているように、実物と同じ流体である水を用いる水理模型実験では、これらの無次元量の値をすべて実物における値と等しくすることは不可能である。このため、水理模型実験では、現象を支配する要素のうちで卓越したものを取り上げ、その無次元量の値を等しくするような相似則が採用される。流出現象を対象とした場合は、粘性力および表面張力の影響が、実物ではほとんど無視されることを前提とし、その模型実験は、固定境界面の相似性を保ち、かつ、 $a/h_1$  (あるいは  $Fr$ ) を実物と一致させるという、いわゆるフルードの相似則を適用して行われる。この場合、式 (5) からわかるように、模型寸法 (開き高  $a$  によって代表される) が小さくなると、 $Re$  および  $We$  はともに小さくなり、実物では問題にならないとされている粘性力あるいは表面張力の影響が現れ、流出機構に変化が起り、実物とは異なった現象が生起する。すなわち、縮尺効果が発生することになる。

写真-1 は、 $a/h_1$  を一定 (0.25) にして模型の大きさを変えた場合の水門上流部の流況の変化を示したものである。トレーサーとしてはフロロルエッセンが用いられている。この写真より、模型の大きさによって流況が著しく変化することがわかる。すなわち、 $a=6\text{ cm}$  の場合は、死水域とみなせる領域は、隅角部のごくわずかな部分であるが、 $a$  が小さくなるにつれてその領域が大きくなり、 $a=2\text{ cm}$  および  $a=1\text{ cm}$  の場合では、上層部の流れは、 $a=6\text{ cm}$  の場合に比べてまったく異なってい

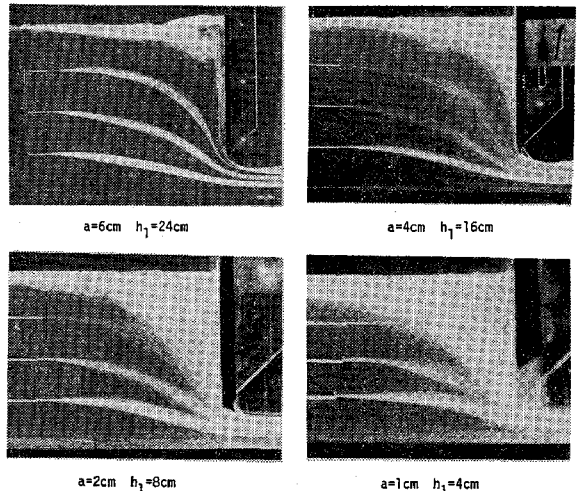


写真-1 縮尺を変えた場合の流況の変化

る。このような死水域の大きさの変化は、流出端近傍における流線曲率と密接に関係し、さらに縮流係数、したがってまた流量係数の大きさに影響することが予想される。このように、流出現象では、模型の大きさの変化に伴い流出機構が変化し、写真に示されるような流況の変化が現れ、その結果として、縮流係数あるいは流量係数における縮尺効果が現れると推察される。

なお、後述するように、 $a=6\text{ cm}$  の流出模型を用いた実験では、縮尺効果はほとんど認められない。したがって、ここに示された  $a=6\text{ cm}$  に対する流れは、ほぼ実物と同じ流況を示しているとみなしてよい。

#### 4. 縮尺効果の特性に関する実験的検討

##### (1) 実験方法および実験装置の概要

上述のように、流出現象における縮尺効果は、粘性力あるいは表面張力の影響の結果として現れるものである。したがって、その特性は、 $R_e$  あるいは  $W_e$  に対する現象の変化特性を知ることによって明らかにされる。ところが、実験によって  $R_e$  あるいは  $W_e$  の影響を個々に明らかにするには、実験に用いる流体の性質（粘性係数あるいは表面張力）を変えることが必要であり、その実験は容易でない。ここでは、流体としては水を用い、模型の大きさを変化させるといふ、より直接的な手法を用いて、縮尺効果の特性を検討することにする。すなわち、開度  $a/h_1$  および  $a/B$  を一定にして、開き高  $a$  を変化させた場合の縮流係数および流量係数の変化特性を検討する。この場合、 $a$  の変化に対して  $R_e$  および  $W_e$  は、図-4 に示されるように、同時に変化する。したがって、模型の大きさを変えることによって現れる現象の変化は、 $R_e$  および  $W_e$  の両者が影響した結果とみなさなければならない。

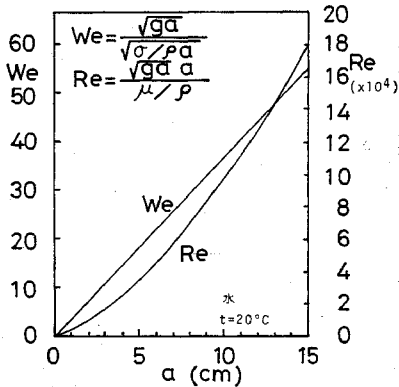


図-4 水を用いた実験における  $R_e$  および  $W_e$  と  $a$  との関係

このような手法による実験には、 $a$  および  $B$  の値を種々変化させることが必要である。このため、実験水路には、幅が 10, 15, 20, 30 および 40 cm のアクリライト製水平直線水路が用いられ、また、水門の開き高としては、1 cm から 15 cm までの数種の値が採用された。水門板としては、幅が 10 および 15 cm の水路については合成樹脂板

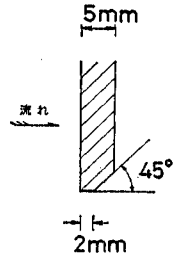


図-5 水門板先端形状

が、また、そのほかの水路についてはステンレス板が用いられ、いずれも先端の形状は図-5 に示されるようである。水深の測定は 0.1 mm まで測定可能なポイントゲージによって行われた。縮流水深は、水路中心線に沿う水深のうち最小のものとしたが、その現れる断面は、流出断面より開き高の約 2 倍の距離に存在する。上流水深  $h_1$  としては、水面がほぼ水平で、上流一様流の水深と実用上同じとみなしうる、水門より開き高の約 20 倍の距離の水深が測定されている。

##### (2) 縮尺効果の特性

図-6 から 図-10 までは、縮流係数の実験結果を示したものである。各図には、比較の基準として、2 次元ポテンシャル流の仮定に基づいて得られる理論解のうち、もっとも厳密な取り扱いがなされている Fangmeier らの理論曲線が示されている。なお、ほかの代表的な研究結果との比較は 図-16 に示されている。これらの図に示される Fangmeier らの理論曲線は、図-2 に示された値を  $a/h_1$  に対する値に修正したものである。これ

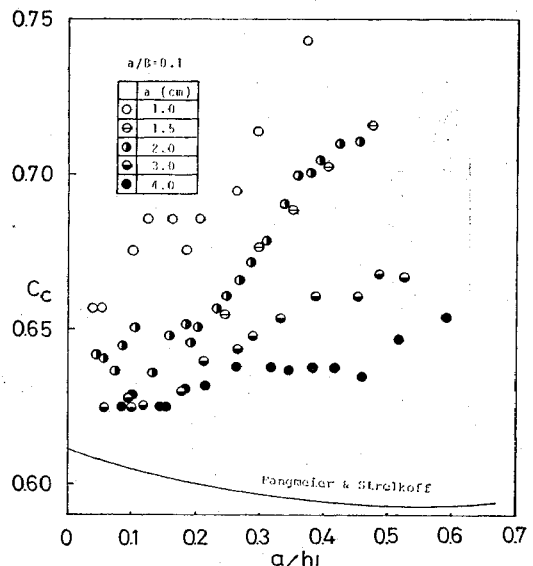


図-6 縮流係数 ( $a/B=0.1$ )

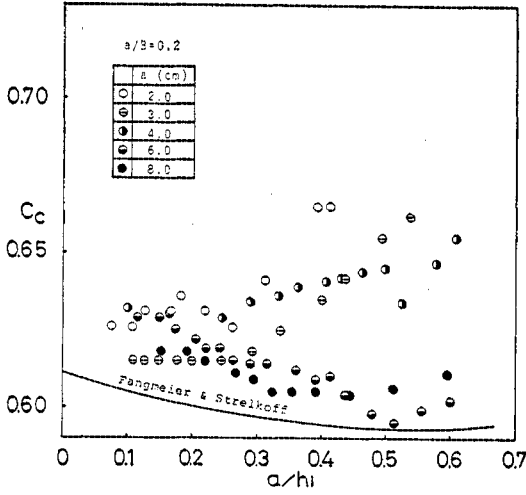


図-7 縮流係数 ( $a/B=0.2$ )

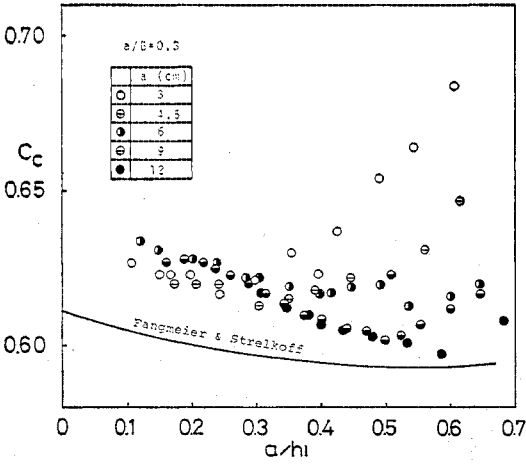


図-8 縮流係数 ( $a/B=0.3$ )

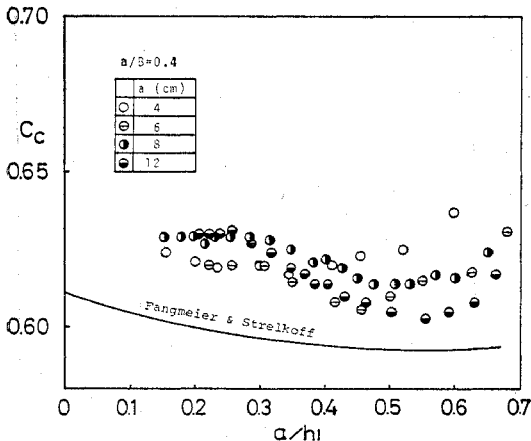


図-9 縮流係数 ( $a/B=0.4$ )

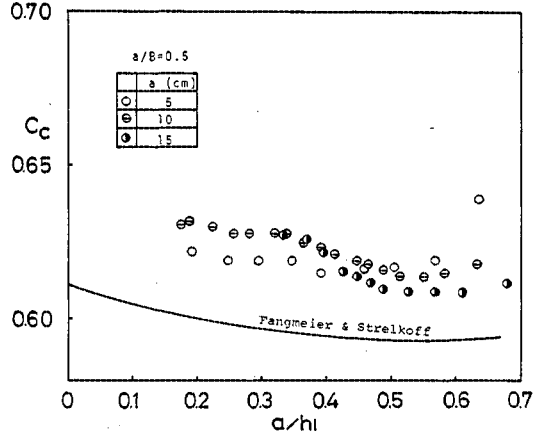


図-10 縮流係数 ( $a/B=0.5$ )

らの各図より、 $a/B$  および  $a/h_1$  が一定の場合、模型の大きさ ( $a$  の大きさ) が変化すると縮流係数の値が変化する、すなわち、縮尺効果が現れていることがわかる。さらに、これらの実験値より次のことがわかる。

① 模型が小さい場合は、縮流係数は縮尺効果によって一般に大きな値を示すが、この傾向は開度  $a/h_1$  が大きな領域でとくに著しい。

②  $a/h_1$  が一定の場合、模型が大きくなるにつれて縮流係数は小さくなり、ある一定値に収れんする傾向を示す。

③ 模型がある程度以上大きくなって、縮流係数がもはや変化しない状態は、縮尺効果を無視しうる状態であり、その模型は実物と相似な模型とみなせるが、このような模型をうるための最小寸法としては、 $a/h_1$  の大きな領域ほど大きなものが必要である。これらの図では、最

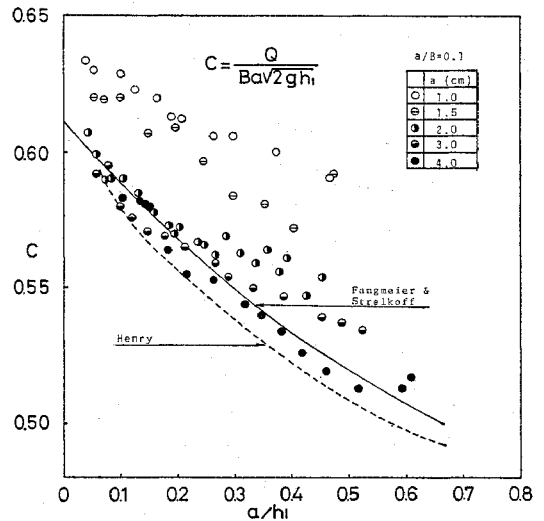


図-11 流量係数 ( $a/B=0.1$ )

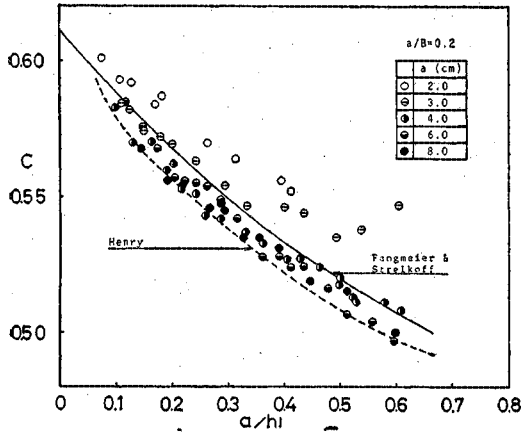


図-12 流量係数 ( $a/B=0.2$ )

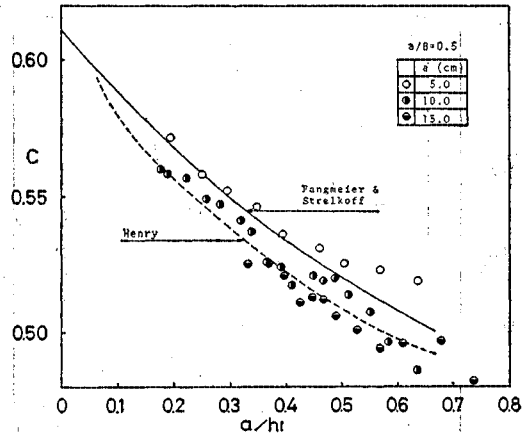


図-15 流量係数 ( $a/B=0.5$ )

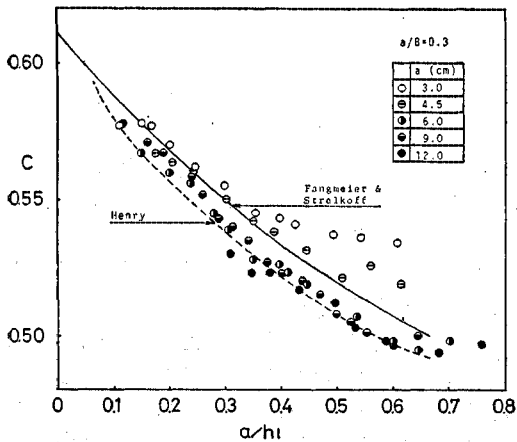


図-13 流量係数 ( $a/B=0.3$ )

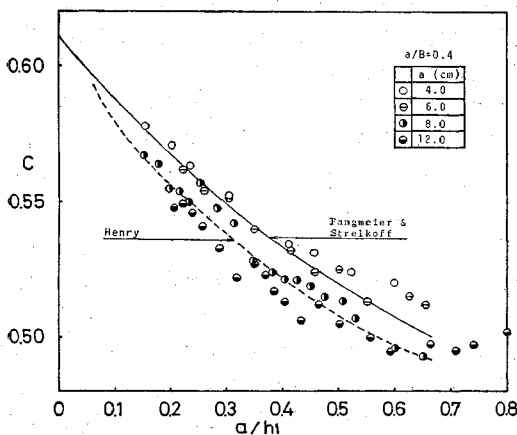


図-14 流量係数 ( $a/B=0.4$ )

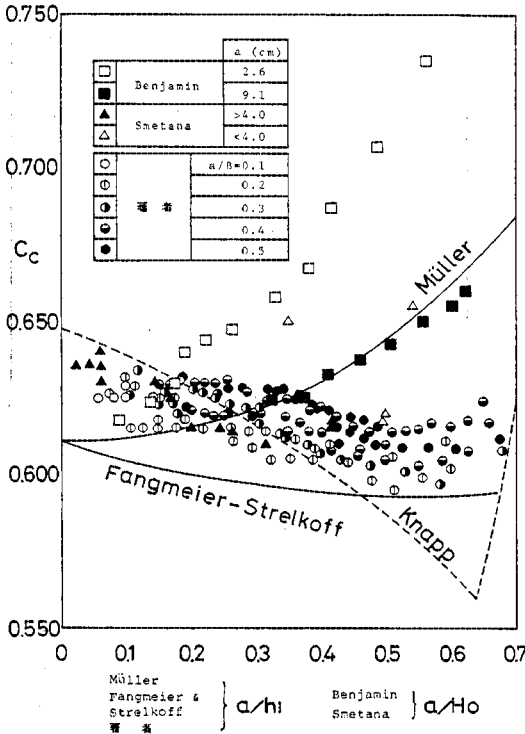
にわたって縮尺効果を無視しうる状態が現われているとみなすことができる。

図-11 から 図-15 までは、流量係数の実験結果を示したものである。図中の実線は Fangmeier らの理論曲線であり、破線は Henry の実験曲線を示している。これらの各図より、流量係数の実験値には、縮尺係数の場合と同様に、顕著な縮尺効果が現れることがわかる。模型が小さくなると一般に流量係数は大きくなるが、さらに、図-11 に示されるように、開き高が 1 cm 程度になれば、Henry の実験曲線を基準にして、約 10~15% 程度まで大きくなることがわかる。縮尺効果を無視しうる状態が現われる模型の大きさの特性は、縮尺係数に対する場合と同様とみなしてよい。

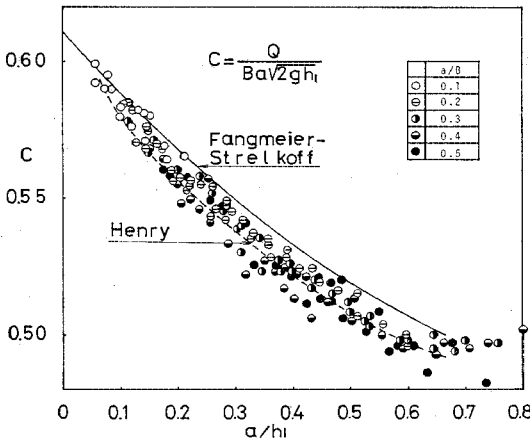
### (3) 縮尺効果を無視しうる流れの特性

図-16 は、図-6 から 図-10 に示された縮流係数の実験値のうちで、縮尺効果を無視しうる状態での値のみを示したものである。この図には、図-2 に示された縮流係数の理論曲線の一部および実験値が同時に示されている。この図より、まず、縮尺効果を無視しうる状態での縮流係数は、 $a/B$  が 0.5 以下では、水路幅による差はほとんどないとみなせよう。次に、これらの実験値は、Smetana の実験値のうち、開き高が 4 cm 以上に対するものとほぼ同程度であることがわかる。このことは、Knapp が、Smetana のこれらの実験値を参考にし、Koch らの理論曲線を修正して示した曲線が、ある程度妥当であることを示している。さらに、Fangmeier らの理論曲線と比較すると、実験値は全体的に若干大きな値を示すが、平均的な値の  $a/h_1$  に対する変化の傾向は、理論曲線のそれとほぼ一致している。Benjamin の実験値のうち、開き高が 9.1 cm に対する値は、本実験結果から考えると、縮尺効果を無視しうる状態の模型によ

小寸法に関して  $a/B$  による明確な差は認められず、 $a$  が 3 cm 程度の模型では、 $a/h_1$  が 0.2 以下の領域で、また、 $a$  が約 6 cm 程度の模型では、 $a/h_1$  が 0.6 以下の全領域



図一16 縮尺効果を無視しうる状態の縮流係数



図一17 縮尺効果を無視しうる状態の流量係数

て得られたものとみなされる。しかし、その値は、本実験結果よりも、特に  $a/h_1$  の大きな領域で、かなり大きな値を示している。この原因の一つとして、両者の実験における縮流断面の取り方の違いをあげることができよう。すなわち、本実験の結果では、縮流断面は水門より開き高の約2倍の距離に現れ、それ以後、水深は徐々に増加することが認められている。ところが、Benjaminは、どの場合も縮流水深として、開き高の4倍の距離における値を採用している。このため、縮流係数の値が実

際より大きく与えられていると考えられる。

図一17は、縮流係数の場合と同様に、縮尺効果を無視しうる状態での流量係数の実験値を示したものである。この図より、流量係数の実験値においても、水路幅による明確な差を認めることはできない。また、実験値の平均的な値は、Fangmeierらの理論曲線よりは若干小さく、Henryの実験曲線程度であるといえる。なお、縮流係数の実験値が、Fangmeierらの理論曲線よりも、全体に大きいのに反し、流量係数の実験値がこのように理論曲線よりも小さな値を示すのは、流量係数を構成する縮流係数以外の要素、たとえば、流出に伴うエネルギー損失などの影響が現れているとみなさなければならない。

### 5. 縮流係数に及ぼす粘性力の影響に関する実験結果

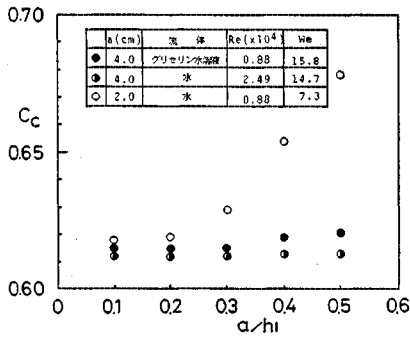
以上は、縮尺効果の特性を模型の大きさとの関連で論じた。しかし、さきに述べたように、模型の大きさの変化は、力学的には  $R_e$  あるいは  $W_e$  の変化を意味し、これらの要素の影響の結果として縮尺効果が発生する。したがって、縮尺効果の特性をさらに明確にするためには、これらの力学的要素の現象に及ぼす影響を明らかにしていくことが必要である。

水門からの流出において、粘性力に起因する現象としては、水路底面における境界層の発達、水門上流部における死水域の形成などがあげられる。また、表面張力は、流出直後の曲率の大きな部分に作用し、表面の速度変化、および水深の変化に影響する。このような流出に伴う諸現象と各力学的要素との関連については、若干議論されているが<sup>25), 26)</sup>、縮尺効果を説明しうるまでには至っていないのが現状である。

ここでは、縮流係数に及ぼす粘性力の影響を知るために行った実験結果を示し、今後、各力学的要素と縮尺効果との関係を究明していくにさいしての一つの資料として示す。

実験は、模型の大きさを同じにして、流体の粘性係数を変化させる手法によって行われた。用いられた流体はグリセリン水溶液であり、その濃度は34.4% (動粘性係数約  $2.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ) である。この溶液の  $R_e$  は、同じ大きさの模型で水を用いた場合の  $R_e$  の約0.35倍であり、これは、式(5)から計算されるように、模型の大きさが1/2の水を用いた模型の  $R_e$  に等しい。また、この溶液の表面張力は、約63 dyne/cmであり、同じ大きさの模型で水を用いた場合の  $W_e$  に対して約1.08倍である。これはまた、式(5)からわかるように、1.08倍の大きさの模型で水を用いた場合の  $W_e$  に対応してい





図一八 縮流係数におよぼす  $R_e$  の影響

る。したがって、表面張力の影響があるとしても、開き高が 4 cm 程度以上であれば、さきに得た水に対する実験結果からもわかるように、その影響はわずか ( $a/h_1$  が 0.5 に対して縮流係数の変化量は最大 0.01 程度) である。

図一八は、上記のグリセリン水溶液を用い、幅が 20 cm の水路で、開き高を 4.0 cm にして行った実験結果を、水を用いた実験結果と比較したものである。この図では、グリセリン水溶液を用いた場合の縮流係数は、水を用いた同じ大きさの模型の値とほぼ一致しており、 $R_e$  がほぼ等しい模型 ( $a=2.0$  cm) による実験値とは大きな差が認められる。この結果のみから判断すると、縮流係数に対しては、粘性力はあまり大きな影響を及ぼしていないとみなすことができよう。このことはまた、縮流係数の縮尺効果には、いまひとつの力学的要素である。表面張力がかなり影響していると考えることができ、今後、縮尺効果の特性を解明していくにあたっては、表面張力の影響について詳細な検討が必要であるといえよう。また、ここでは、粘性力の縮流係数に対する影響について検討したが、流量係数を対象とした場合には、その特性は縮流係数の特性のみでは決定されず、エネルギー損失の特性を考慮しなければならない。したがって、粘性力の影響に関しては、今後はさらにエネルギー損失に対する影響について検討をすすめていく必要があろう。

## 6. 結 語

本研究では、各種開水路底流型水門の水利機能を解明するための基礎として、水利模型実験において現れる、縮流係数ならびに流量係数における縮尺効果の特性を鉛直刃形水門を対象として実験的に検討した。その結果明らかにされた主な事項は次のようである。

(1) 小模型によって得られる縮流係数および流量係数の実験値は、縮尺効果によって、一般に実物における値よりも大きな値を示すが、この傾向は特に開度の大き

な領域で著しい。

(2) 縮尺効果を見捨てる模型、すなわち、相似模型の最小寸法としては、開度の大きな領域ほど大きな値を必要とするが、流体として水を用いた場合、開き高が約 6 cm 程度以上の模型では、開度が 0.6 以下の全領域にわたって、縮尺効果を見捨てる状態が現れているとみなしてよい。

(3) 相似模型によって得られる縮流係数ならびに流量係数の値は、 $a/B$  が 0.5 以下では、水路幅によってほとんど変化せず、縮流係数は Smetana の実験値と、また、流量係数は Henry の実験値とほぼ一致する。また、いずれも、重力の影響を考慮して得られる 2 次元ポテンシャル理論による解によってほぼ近似される。

以上、本研究によって、相似模型の大きさの限界が示されるとともに、従来より統一的に表現されえなかった縮流係数および流量係数の実物における水理学的挙動が明らかにされ、また、従来の理論的ならびに実験的な研究結果の適用性が示された。このように、本研究では、開水路底流型水門からの自由流出を水理学的に解析していくに際しての基礎的問題点がある程度明らかにされたものとする。しかし、縮尺効果の発生原因となる粘性力あるいは表面張力などの流出現象に及ぼす力学的機構はなお未解明の状態であり、今後さらに詳細な検討をすすめていくことが必要である。

本研究を遂行するにあたっては、終始、京都大学の岩佐義朗教授の懇篤なご指導を賜った。また、京都大学の石原藤次郎名誉教授ならびに広島大学の金丸昭治教授からは、多くの有益な助言を賜った。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

## 参 考 文 献

- 1) Koch, A. und Carstenjen, M. : Von der Bewegung des Wassers und den dabei auftretenden Kräften, Springer, Berlin, 1926.
- 2) Horton, R.E. : Discharge Coefficients for Tainter Gates, Eng. News-Record, Jan. 4, 1934.
- 3) Knapp, F.H. : Ausfluss, Überfall und Druchfluss im Wasserbau, G. Braun, Karlsruhe, 1960.
- 4) Müller, H. : Rechnerische Ermittlung der Strömungsvorgänge an scharfkantigen Planschützen, Wasserkraft und Wasserwirtschaft, Heft 24, Dec. 1935.
- 5) Cisotti, U. : Vene fluenti, Rendiconti del Circolo Mathematico di Palermo, Tomo 25, 1908.
- 6) v. Mises, R. : Berechnung von Ausfluss- und Überfallzallen, V.D.I. 20 Mai, 2 Juni, 9 Juni, 1917.
- 7) Betz, A. und Petersohn, E. : Anwendung der Theorie der freier Strahlen, Ingenieur-Archiv, 1931.
- 8) Pajer, G. : Über den Strömungsvorgang an einer unterströmten scharfkantigen Planschütze, ZAMM, Heft 5, 1937.
- 9) Marchi, E. : Sui fenomeni di efflusso piano da luci a battente, Annali di Matematica Pura ed Applicata, 35, 1953.
- 10) Benjamin, T.B. : On the Flow in Channels when

- Rigid Obstacles are placed in the Stream, Jour. Fluid Mechanics, Vol. 1, 1956.
- 11) Southwell, R.V. and Vaisey, G. : Relaxation Method Applied to Engineering Problems, 12, Fluid Motions Characterized by "Free" Stream-lines, Philosophical Trans., Royal Society, London, series A, Vol. 240, 1948.
  - 12) Boor, de C. : Flow under Sluice Gate, Project Report under Contract, 1866(34), Harvard Univ., Cambridge, Mar., 1961.
  - 13) Klassen, V.J. : Flow from a Sluice Gate under Gravity, Jour. Mathematical Analysis and Applications, Vol. 19, 1967.
  - 14) Fangmeier, D.D. and Strelkoff, T.S. : Solution for Gravity Flow under a Sluice Gate, Jour. EM-Div., Proc. ASCE, Feb. 1968.
  - 15) Larock, B.E. : Gravity Affected Flow from Planar Sluice Gate, Jour. HY-Div., Proc. ASCE, July 1969.
  - 16) Rouvé, G. and Khader, A. : Transition from a Conduit to Free Surface Flow, Jour. Hydraulic Research, 7, No. 3, 1969.
  - 17) Gentilini, B. : Efflusso dalle luci soggiacenti alle paratoie piane inclinate e a settore, L'Energia Elettrica, Giugno, 1941.
  - 18) Rajaratnam, N. and Subramanya, K. : Flow Equation of the Sluice Gate, Jour. Irrigation and Drainage Div., Proc. ASCE, Sept., 1967.
  - 19) 横田周平 : 水門の流出状態に関する実験的研究, 土木試験所報告, 第 49 号, 昭和 15 年 1 月.
  - 20) Mostkow, M.A. : Handbuch der Hydraulik, VEB. Berlin, 1956.
  - 21) Henry, H.R. : Discharge Characteristics of Sluice Gate, Proc. ASCE, Vol. 75, Dec., 1949.
  - 22) Keutner, C. Wasserabführungsvermögen von scharfkantigen und abgerundeten Planschützen, Die Bau-technik, Heft 21, Mai, 1932.
  - 23) Unwin, W.C. : Hydromechanics, "Encyclopaedia Britannica" 9th ed. Vol. 12, 1875.
  - 24) 前出 3) p. 423.
  - 25) 前出 10)
  - 26) Gurevich, M.I. : Influences of Capillary Forces upon the Coefficient of Contraction of a Jet, Jour. Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 25, No. 6, 1961.

(1978.11.17・受付)