

# スルースゲートをすぎる流れの運動量の定理 に基づく検討

羽田野袈裟義 (創成科学研究科建設環境系専攻) 荒尾慎司 (松江工業高等専門学校環境・建設工学科)  
李洪源 (SOMPO リスクケアマネジメント (株)) 天野卓三 (中電技術コンサルタント (株))

## Study on the Flow passing through Sluice Gates on the Basis of Momentum Theorem

Kesayoshi HADANO (Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Science and Engineering)

Shinji ARAO (Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Science and Engineering)

Hongyuan LI (SOMPO Risk Management & Health Care)

Takuzo AMAMO (Chuden Engineering Consultants Co. Ltd.)

**Abstract:** Hydraulics of the flow through the gates has been constructed based on the suggestion from Bernoulli's theorem so far. However, since they are set across and trap the flows, gates must produce a considerable energy loss to the flow. So it is considered that the conventional treatment of the gates ignoring energy loss contradicts the principle of hydraulics. From the point of this idea, the present paper deals with the hydraulics of the flow passing through sluice gates based on the momentum theorem which takes into account the flow resistance to obtain the mutuality between the discharge and the water depth of upstream of the gate. Estimations of both the upstream depth of the gate and the discharge showed good agreement with experiments.

**Key Words :** *sluice gate, free flow, momentum theorem, flow rate and upstream water depth, mutual dependence relationship*

### 1. はじめに

スルースゲートは灌漑水路などの流れの制御に用いられる施設である。スルースゲートの水理に関して我が国では、これまでもつぱらゲート前後のエネルギー保存条件を課すベルヌーイの定理に基づいて流量表現式の形を決め、そして縮流断面の諸量を用いて流量係数を実験的に与える方法が導入され、その路線で研究がなされているようである<sup>1)~7)</sup>。

しかしながら、ゲートは流れを止める横断構造物であるため、流れに対して少なからぬエネルギー損失をもたらすはずである。このため、エネルギー保存条件で成立するベルヌーイの定理に基づくゲート水理の取扱は、水理学の解析原理と照合すると疑問が残る。後述のように海外ではエネルギー損失やゲートの流水抵抗を考慮した取扱いがなされるようになっているが、その流れに沿った形で流量と水深の相互関係を定式化するまでには至っていない。また、ゲート水理の研究で一般的な縮流断面

の水理量を用いる整理方法は、縮流係数が単位幅流量や開度などの影響を受ける従属量であること、そしてゲートから流出直後の高速流により摩擦損失が有意と考えられることから、その取扱いに注意が必要である。摩擦損失に関しては、縮流断面より上流側では底面に向かう流れの成分があるため、壁面と平行な流れに比べてより大きな摩擦抵抗係数を取り、一方、縮流断面の下流の流水断面が拡大する部分では底面から離れる流れの成分があり摩擦抵抗係数の変化は上記の逆と考えられる。

本研究は、スルースゲートからの自由流出を対象とし、上記の課題をクリアした運動量の定理に基づき、流量・ゲート上流水深・ゲート開度との関係を無次元量との関係式として定式化する。そしてそれにより所定のゲート開度に対して流量とゲート上流水深との間での双方向の評価式を求め、その結果を実験データにより検証する。また、この流れの縮流断面までのエネルギー損失およびゲート上流面近傍の水位上昇について調べた結果を述べる。

## 2. 従来の研究

スルースゲートの水理の既往研究を、自由流出に重点を置いて主要な成果を整理する。Henry<sup>8)</sup>は自由流出と潜り流出について流量係数の決定のための広範な実験的研究を行なった。彼は流量係数  $C_d$  ~ ゲート上流水深・開度比  $h_0/a$  の関係を、自由流出では1本の曲線、そして潜り流出ではパラメータ  $h_2/a$  ごとに異なる曲線群として示した。Rajaratnam and Subramanya<sup>9)</sup>はゲートからの自由流出と潜り流出の流量係数の新しい定義を提案した。名合<sup>4) 10)</sup>は可視化実験によりゲート上流水深・開度比が一定で縦寸法が異なる場合の流線の相違を明示すると共に、水路幅・開度比を系統的に変えた実験で流量係数と縮流係数を調べた。またゲートの傾きやゲートの下部上流面の形状を変えた実験を行い興味ある実験データを与えている。Swamee<sup>11)</sup>はHenry<sup>8)</sup>の曲線をデジタル化し、そしてゲート上流の水深がゲート開度以下の時には流量係数がゼロと仮定して流量係数を決定する方程式を提案した。

Ferro<sup>12)</sup>は自由流出条件の流量を評価するためバッキンガムのπ定理を用いた。この方法は、ベルヌーイの式が示唆する流量表現に基づくため必ずと限界がある。この方法はAnsar<sup>13)</sup>とFerro<sup>14)</sup>により潜り流出条件に拡張された。Linら<sup>15)</sup>はゲートリップ形状が縮流係数に及ぼす効果を調べた。彼らは、丸みのあるリップでは縮流係数が増加することを報告した。Belaudら<sup>16)</sup>はエネルギー・運動量平衡により自由流出と潜り流出の条件下での縮流係数を評価する理論的枠組みを報告した。

Lozanoら<sup>17)</sup>は潜り流出の条件で稼働している灌漑用水路の中のゲートを検討し、大きい潜り度では縮流係数とエネルギーロスが流量係数に大きい影響を及ぼすことを見出した。Habibzadehら<sup>18)</sup>はゲートのエネルギーロスが流量係数に及ぼす役割を調べた。彼らはエネルギーロスに注目することは流量の正確な見積りに必要と報告している。Cassan and Belaud<sup>19)</sup>はゲートの上・下流の流れを水理実験とRNG-k-ε (Re-Normalization Group) およびRSM (Reynolds Stress Model) 乱流モデルにより検討し、縮流係数は大きい開度では潜り度の増加と共に増大することを明らかにした。

ここでゲートの自由流出の流量係数の既往研究の提案式を示す。本研究では、単位幅流量を  $q$ 、ゲートの開度を  $a$ 、ゲート上流の水深を  $h_0$ 、ゲート直下流の縮流断面の水深を  $C_c a$  ( $C_c$  は縮流係数)、ゲート下流のほぼ一様水深を  $h_2$  として表記する。特に重要な量は次式で定義される流量係数  $C_d$  である。

$$C_d = \frac{q}{a\sqrt{2gh_0}} \quad (1)$$

Rajaratnam and Subramanya の式<sup>9)</sup> :

$$C_d = \frac{0.611}{\sqrt{1 - 0.611^2 (a/h_0)^2}} \quad (2a)$$

Larsen and Misha の式<sup>20)</sup> :

$$C_d = 0.489 \left( \frac{a}{h_0} \right)^{0.075} \quad (2b)$$

Swamee の式<sup>11)</sup> :

$$C_d = 0.611 \left( \frac{h_0 - a}{h_0 + 15a} \right)^{0.072} \quad (2c)$$

Alhamid の式<sup>21)</sup> :

$$C_d = 0.6113 \left( \frac{h_0 - a}{h_0 + 15a} \right)^{0.0649} \quad (2d)$$

Garbrecht の式<sup>22)</sup> :

$$C_d = 0.6468 - 0.1641 \sqrt{\frac{a}{h_0}} \quad (2e)$$

Noutsopoulos and Fanariotis の式<sup>23)</sup> :

$$C_d = 0.62 - 0.15 \sqrt{\frac{a}{h_0}} \quad (2f)$$

Nago の式<sup>24)</sup> :

$$C_d = 0.6 \exp \left( -0.3 \frac{a}{h_0} \right) \quad (2g)$$

## 3. スルースゲート水理への運動量の定理の適用

スルースゲート周辺の流れと圧力分布を Figure 1 のようにモデル化する。上流面の圧力は、既往の文献<sup>25)</sup>と刃形堰の研究結果<sup>26)</sup>を参照し、基本形を全水頭高さでゼロ、その下方で静水圧分布となる台形分布と仮定する。

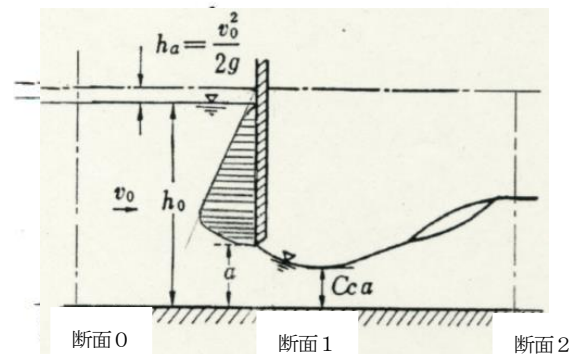


Figure 1 Simplified model for analysis

## (1) 流量とゲート上流水深の基本的関係

Figure 1 においてゲート上流面には水圧が作用し、その反作用としてゲートは水を上流向きに押し、この力を単位幅当たりで評価したものを  $F_D$  とし、ゲートから縮流断面までの単位幅当たりの摩擦抵抗を  $F_f$  とする。この設定でゲート上流の流水断面（断面 0）とゲート流出後の縮流断面（断面 1）の間の水に運動量の定理を適用すると次式を得る。

$$\rho \left( \frac{\beta q^2}{C_c a} - \frac{q^2}{h_0} \right) = \frac{1}{2} \rho g h_0^2 - \frac{1}{2} \rho g (C_c a)^2 - F_D - F_f \quad (3)$$

ここで  $\beta$  は縮流断面の運動量補正係数、 $C_c$  は縮流係数である。文献<sup>2)</sup>によると縮流断面では運動量補正係数が 1 と置けないことが示唆されるため、 $\beta \neq 1$  と考えておく。

Figure 1 の圧力分布では、 $F_D$  は次式で置けよう。

$$F_D = K_D \frac{1}{2} \rho g \left\{ h_0 + \frac{1}{2g} \left( \frac{q}{h_0} \right)^2 - a \right\}^2 \quad (4)$$

ここで  $K_D$  は無次元の係数である。また、ゲートから縮流断面までの摩擦抵抗  $F_f$  は、この間の平均的な摩擦応力係数を  $f$ 、平均的な流速を  $u$ 、ゲート下端と縮流断面の間の水平距離を  $ka$  として次のように置く。

$$F_f = \frac{1}{2} f \rho u^2 ka = \frac{1}{2} f \rho \left( \frac{q}{a} \right)^2 ka \quad (5)$$

ただし、前述のように、 $f$  はゲート位置の流線の曲がりの影響のため  $f$  は平行流に比べて大きく  $h_0/a$  に依存すると考えておく。また、縮流断面より下流では、流線が底面に向かうのとは逆に底面から離れる方向を向くため、 $f$  は平行流に比べて小さいと考えられる。

以上の仮定により運動量の式は次のように書かれる。

$$\rho \left( \frac{\beta q^2}{C_c a} - \frac{q^2}{h_0} \right) = \frac{1}{2} \rho g h_0^2 - \frac{1}{2} \rho g (C_c a)^2 - K_D \frac{1}{2} \rho g \left\{ h_0 + \frac{1}{2g} \left( \frac{q}{h_0} \right)^2 - a \right\}^2 - \frac{1}{2} f \rho \left( \frac{q}{a} \right)^2 ka \quad (6)$$

この式を変形すると、 $K_D$  の表現として次式を得る。

$$K_D = \frac{h_0^2 - C_c^2 a^2}{\left( h_0 + \frac{1}{2} \frac{h_c^3}{h_0^2} - a \right)^2} - 2 \frac{\beta h_c^3 / C_c a - h_c^3 / h_0 + h_c^3 f k / 2a}{\left( h_0 + \frac{1}{2} \frac{h_c^3}{h_0^2} - a \right)^2} \quad (7)$$

ここで  $h_c$  は限界水深で重力加速度  $g$  を用いて  $h_c = (q^2/g)^{1/3}$  と表される。 $C_c$ 、 $k$  および  $\beta$  の値の変化は小さいと考えられるから、上式より  $K_D$  は近似的に 2 つの独立なパラメータ  $h_0/a$  および  $h_c/a$  だけに依存することになる。したがって、 $K_D$  のある特定の値に対して  $h_0/a$  と  $h_c/a$  の間に一定の関係が存在することになる。すなわち、

$$\frac{h_0}{a} = F \left( \frac{h_c}{a} \right) \quad (8)$$

これが流量とゲート上流水深を関係づける式である。

## 4. 実験結果によるパラメータ関係の特定と理論の検証

上の理論を実験データにより検証する。具体的には、式(8)の関係を特定して流量およびゲート上流水深の表現式を求める。これらは名合・岩佐の実験データ<sup>2)</sup>と今回新たに行なった実験のデータを用いて行なう。今回新たに行なった実験の概要を以下に示す。

## (1) 実験装置及び実験方法

## a) 実験装置と測定項目

実験は松江工業高等専門学校の水理実験室の循環式水路を用いて行った。実験水路は長さ 10.3m × 幅 30cm の長方形断面を有する可変勾配の水路であり、模型ゲートは水路上流端から 4.5m の位置に厚さ 1cm のアクリル板で成型したものを設置した。模型ゲートの両端と水路側壁の間からの漏水を防止するため、止水用のゴムを貼った (Figures 2, 3 参照)。止水用のゴムは同図の中で濃い黒に映っている。

実験では式(8)の検証のためゲート上流水深と流量を測定し、そしてゲート下流の水位を徐々に上げて自由流出の限界状態におけるゲート下流水深を求めた。さらに、ゲート上流面とその近傍における水面の上昇の性状を調べるためゲート上流面から 0.7cm および 10cm 離れた位置の水深を測定した。位置測定にはゲート上流面を基準に上・下流方向に設置したメジャー、水深測定にはポイントゲージをそして流量測定には水路下流端に設置し

た流量測定升（最大貯水量480リットル）を使用した。

b) 流量とゲート上流水深に関する実験の方法

実験は以下の手順で行った。

- 1)ゲートを所定の開度に設置する。
- 2)水路に水を所定の流量で通水（循環）する。
- 3)ゲート下流の縮流断面，ゲート上流面上流10cm地点および上流0.7cmの位置で水深を測定する。
- 4)水路末端の流量測定枡への貯水量を貯水時間で除して流量を求める。流量は5回計測し，その平均値を採用する。本実験では，各々の流量設定における流量測定値の差は1%未満であった。
- 5)流量を変化させ，2)から4)を繰り返し行う。

ゲート開度は，式(8)の定式化のための本実験として，岩佐・名合による既往研究<sup>2)</sup>と合わせ2cm, 4cm, 6cm, 8cmとした。その後，式(8)の定式化により得た関係式の検証用に開度を3cm, 5cm, 7cmとして実験を行った。

c) 自由流出の限界状態に関する付記

本研究では自由流出の限界について水理学的検討を行なわないが，現象を簡単に述べておく。上記と同様の方



Figure 2 Experimental flume and gate

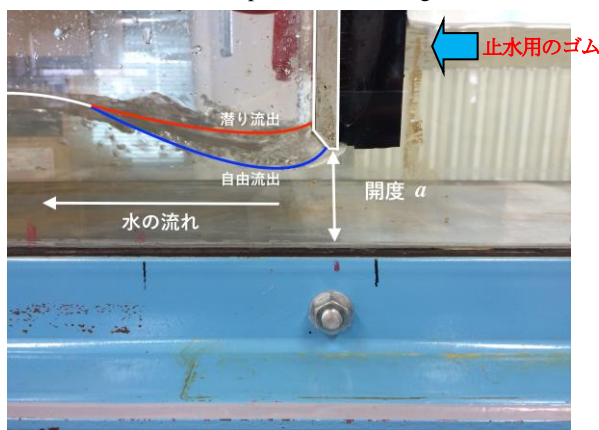


Figure 3 Free flow and submerged flow alternately formed

法で水を流すと，跳水を経て下流のほぼ一定水位の流れに接続するが，水路下流端に設置された可動堰を徐々に上げると，跳水位置はゲートに近づき，自由流出と潜り

流出が交互に発生する状況となる (Figure 3 参照)。

(2) 自由流出の流れの実験結果と考察

a) 式 (8) の分析結果

ゲート開度 2cm, 4cm, 6cm, 8cm で行なった実験のデータを用いて流量とゲート上流水深の関係の規定する式(8)の関係を分析する。式(8)は無次元量  $h_0/a$  と  $h_c/a$  の間の関係となっている。この分析には，本実験のデータに加え既往研究<sup>2)</sup>のデータを用いた。Figure 4 に  $h_0/a$  と  $h_c/a$  の間の関係を示す。同図によると， $h_0/a$  と  $h_c/a$  の関係は，実験条件の範囲内でほぼ一本の曲線に沿って分布しており，流量係数とゲート上流水深/ゲート開度比の関係を示すグラフ<sup>2)</sup>に比べてデータのまとまりがよい。したがって Figure 4 の関係は普遍的とみられ，本研究の取扱が従来方法よりも合理的であることが示唆される。

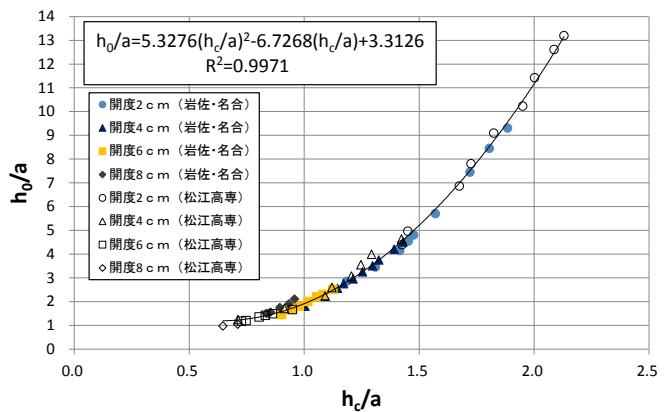


Figure 4 Relation between  $h_0/a$  and  $h_c/a$

図中の曲線は両者の関係を2次曲線近似した結果で，次式で与えられる。

$$\frac{h_0}{a} = A \left( \frac{h_c}{a} \right)^2 + B \left( \frac{h_c}{a} \right) + C \quad (9)$$

ここで， $A=5.3276$ ， $B=-6.7268$ ， $C=3.3126$ である。なお，式(9)では流量に相当する  $h_c$  を右辺に置き，ゲート上流の水深  $h_0$  を左辺においた。この与え方は，流量係数を左辺に置いて流量を未知数とする従来の与え方と逆である。これは，水理現象として，所定の開度に対して流量が与えられた時にゲート上流の水深がどれだけか，を考えるのが自然な推論であることを考慮している。すなわち，水理現象としては，流量が独立量でゲート上流水深が従属量となるべきと考える。これは工学的立場として，ある流量を流すとするとき，ゲート開度に応じた所要のゲート高さの見積りを与える。

また，上とは逆に，取りうる上流水深  $h_0$  が与えられた時，所定の開度  $a$  に対してどれだけの流量を流しうるか，の見積りも求められる。この答えは，式(9)を  $h_c/a$  に

関する2次方程式として解くことで得られる。結果は次式となる。

$$\frac{h_c}{a} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A(h_0/a - C)}}{2A} \quad (10)$$

これにより  $h_c$  が得られれば、 $q^2/g=h_c^3$  の関係から単位幅流量  $q$  が計算される。

b) ゲート上流水深  $h_0$  の評価

Figure 5 にゲート開度を 3cm, 5cm, 7cm として得られた実測値  $h_0/a$  と式(9)による計算値の関係を示す。同図より式(9)は  $h_0/a$  を良好に見積もることがわかる。そこで、さらに  $h_0/a$  の実測値と式(9)による計算値の比と  $h_0/a$  の間の関係を調べた。

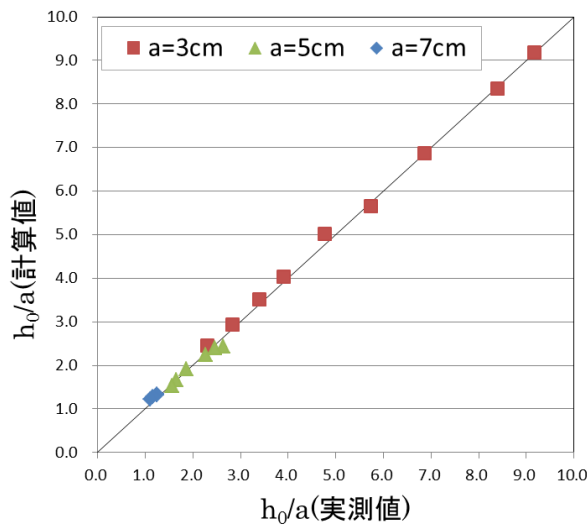


Figure 5 Comparison between measured and calculated  $h_0/a$

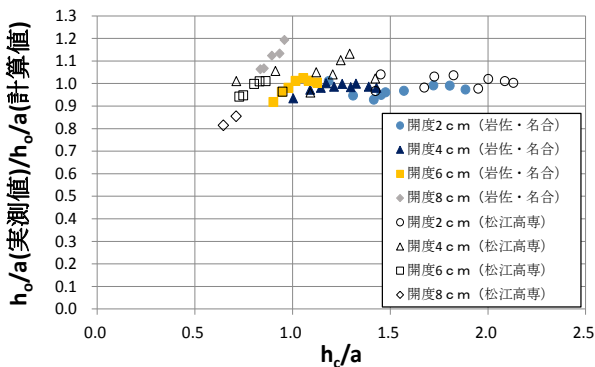


Figure 6 Ratio of measured  $h_0/a$  to calculated one

Figure 6 にこの関係を図示している。同図によると  $h_0/a$  が小さい範囲で実験データにばらつきが見られるが、この傾向は水理公式集<sup>2)</sup>に掲載されている流量係数  $C$  と  $h_0/a$  の関係図でも見られる。このことは、 $h_0/a$  が小さくなると、ゲート上流面の直線的圧力分布の領域が消えて自由流出の流れが安定性を欠き、流量とゲート上流水深

の間の関係がばらつく形で現れた結果と理解される。

c) 流量評価式の検討

式(10)より単位幅流量は次の形で与えられる。

$$q = \sqrt{gh_c^3} = \sqrt{2gh_0 a} \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A(h_0/a - C)}}{2A} \right\}^{3/2} \sqrt{\frac{a}{2h_0}} \quad (11)$$

したがって、式(1)の流量係数は次式で表わされる。

$$C_d = \frac{q}{\sqrt{2gh_0 a}} = \left\{ \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4A(h_0/a - C)}}{2A} \right\}^{3/2} \sqrt{\frac{a}{2h_0}} \quad (12)$$

Figure 7 は本実験および名合らの実験で得られた上記の定義の流量係数  $C_d$  と  $h_0/a$  の間の関係を式(12)の関係と共に示す。図より式(12)の関係は本実験および名合らの実験結果をよく再現することがわかる。また、式(12)の関係は Henry の実験曲線<sup>2),8)</sup>とほぼ同様である。

Figure 8 は流量係数  $C_d$  の実測値と計算値の比較、そして Figure 9 は  $C_d$  の実測値/計算値の比を  $h_0/a$  に対し

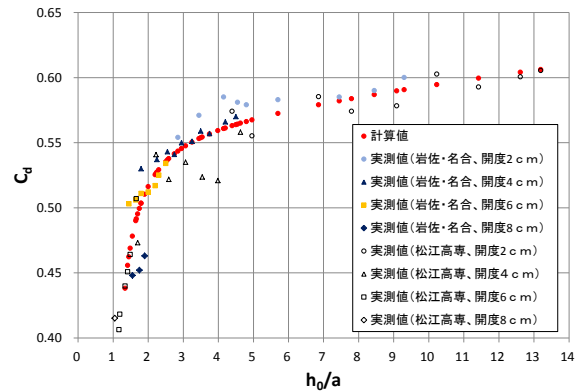


Figure 7 Relation of discharge coefficient  $C_d$  and  $h_0/a$

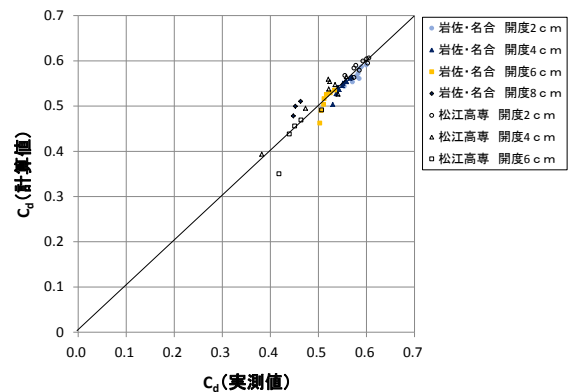


Figure 8 Relation of measured and calculated values of  $C_d$

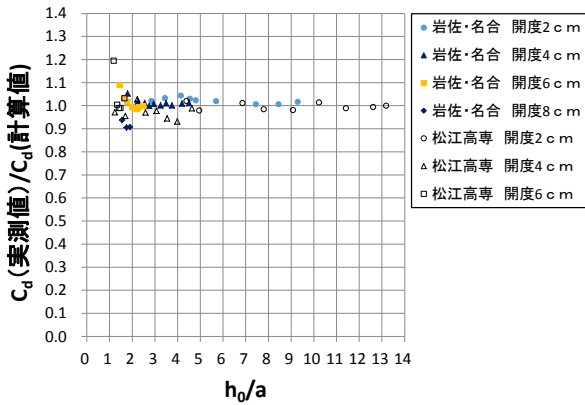


Figure 9 Ratio of measured and calculated values of  $C_d$

て図示している. 両図とも  $h_0/a$  が大きい領域で  $C_d$  の実測値と計算値に近い値を示すことを表現している.  $h_0/a$  が小さい領域でのデータのばらつきはゲート上流面の圧力分布の静水圧分布からのずれによると見られる.

以上より, 式(11)および(12)はスルースゲートからの自由流出の流量評価式として妥当であるといえる.

次に, 式(2)に掲げた既往の流量係数の提案式の特徴を明確にするため, これらの諸式の流量係数  $C_d$  と  $h_0/a$  の関係を Figure 10 に示す. この図から, Rajaratnam and Subramanya<sup>9)</sup> および Larsen and Misha<sup>20)</sup> の提案式以外は流量係数  $C_d$  が  $h_0/a$  の増加と共に単調増加して一定値に近づく特徴をもつことがわかる.

また, 流量係数  $C_d$  の実測値 (本実験) と既往の提案式による計算値の比を Figure 11 に示す. なお, 本実験では定式化のためにゲート開度  $a=2, 4, 6, 8$  cm で実験を行い, 流量評価式の検証のためにゲート開度  $a=3, 5, 7$  cm で行ったが, Figure 11 にはこれらの全データを示している. この図から, 本提案式(12)は  $h_0/a$  が 4 以上で良好な適合性を示すことがわかる. また, Swamee<sup>11)</sup>, Alhamid<sup>21)</sup>, Garbrecht<sup>22)</sup> の式も本実験に近い値を与えている.

d) エネルギー損失の評価

スルースゲートからの自由流出のエネルギー損失の問題は本研究の動機であり, 極めて興味深い水理量である.

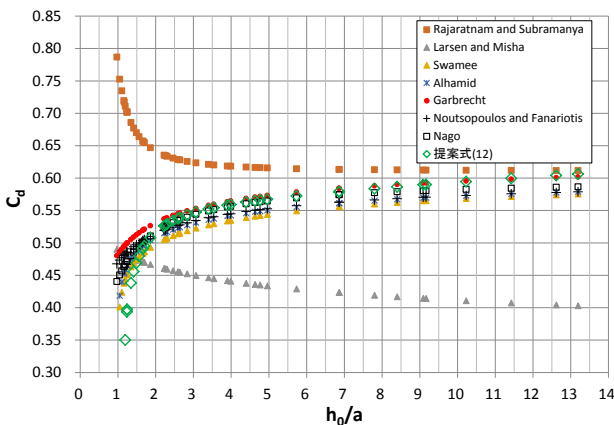


Figure 10 Properties of various formulas of  $C_d$

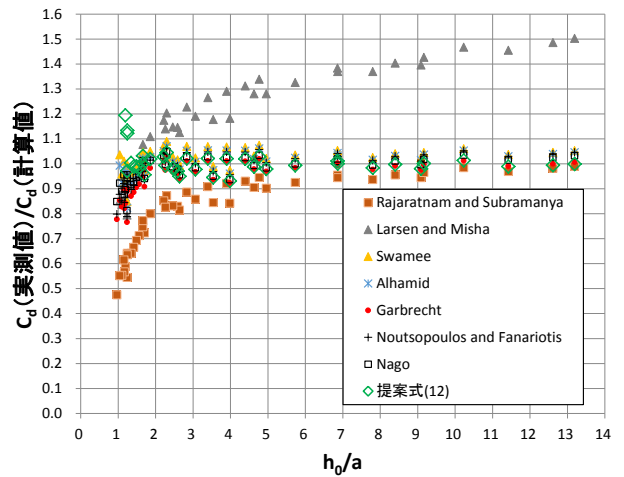


Figure 11 Applicabilities of various formulas of  $C_d$

そこで, 水路床が水平な場合について, エネルギー損失を評価する. ゲート上流とゲート下流の縮流断面の比エネルギー  $E_0$  と  $E_1$  はそれぞれ次式で表わされる.

$$E_0 = h_0 + \frac{v_0^2}{2g} = h_0 + \frac{1}{2} \frac{h_c^3}{h_0^2} \quad (13)$$

$$E_1 = C_c a + \frac{v_1^2}{2g} = C_c a + \frac{1}{2} \frac{h_c^3}{C_c^2 a^2} \quad (14)$$

Figure 12 は式(14)で  $C_c=0.61$  とおいて  $E_1$  の値を求め, 上 2 式の  $E_0$  と  $E_1$  の値の比  $E_1/E_0$  を  $h_0/a$  に対して図示したものである. 同図によると,  $E_1/E_0$  は  $h_0/a$  が 1 より少し大きい値から 2 までの間で 0.75 程度から 0.95 程度まで急激に増大し,  $h_0/a$  が 2~6 程度の範囲では 0.97~0.98 程度の値で推移し,  $h_0/a$  が 6 を超えると  $h_0/a$  の増大とともに  $E_1/E_0$  は増大して 1 に近づくことがわかる.  $h_0/a$  が小さい範囲で  $E_1/E_0$  が比較的小さい値を示す理由として, この程度の  $h_0/a$  の値では, ゲート上流の流れがゲートに衝突して流れが乱されるためにエネルギーが消費されることが考えられる.

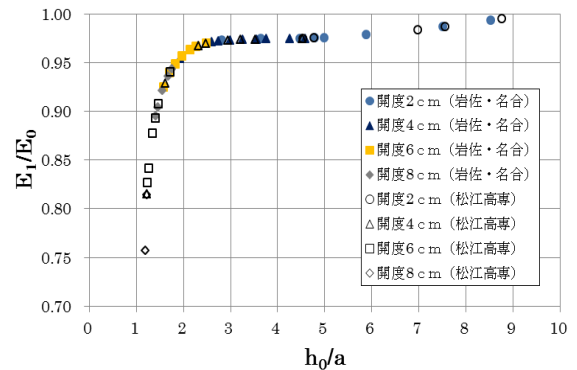


Figure 12 Relation of  $E_1/E_0$  and  $h_0/a$

### e) ゲート上流面近くの水面の上昇

ゲートをすぎる流れでは水面がゲート上流面近傍で上昇する現象がみられる。この現象は流れの条件により顕著に現れることもあればほとんど認識されないこともある。この現象の性質を、ゲート上流面から 0.7cm 位置の水深と水面上昇がほとんどない 10cm 位置の水深の比を「水深増加率」と定義し、この値を調べた。

Figure 13 はこの水深増加率と  $h_0/a$  の関係を示す。同図の実験データはゲート開度 3cm, 5cm および 7cm の条件下で得られたものである。この図から、水深増加率はどの水路勾配についても  $h_0/a$  の減少と共に増大することがわかる。Figure 6 の説明の箇所でもみたように、 $h_0/a$  が減少するとゲート上流面の圧力分布が静水圧分布から相対的に大きく乖離する傾向があるため、ゲート上流面近傍の水面上昇は、ゲート上流面に作用する圧力分布の静水圧からの乖離と密接に関連するとみてよいであろう。

参考のため水深増加率とゲート上流 10cm の位置における流水断面の比エネルギー／水深比との関係を調べた。その結果を Figure 14 に示す。この図から、いずれの水路勾配でもゲート上流面近傍の水深増加率と上流の流水断面の比エネルギー／水深比は正の相関であることがわかる。このことから、ゲート上流面近傍の水深増加率は上流の流水断面の動圧の効果を表すことが示唆される。また、同一の比エネルギー／上流水深では水路勾配が急なほど水深増加率が大きいようである。

## 5. 結語

以上、スルースゲートからの自由流出を、流水抵抗を考慮した運動量の定理に基づき検討した。その結果、自由流出の流量とゲート上流水位の間を「双方向関係」として求め、既往実験を含めて実験の結果によりその妥当性を示した。Figure 4 の関係は本研究の根幹をなすが、これは普遍的といえる。そしてこの図から流量とゲート上流水深を相互依存関係として与える評価式、および流量係数の表現を求めた。また、ゲート上流水深／開度比が小さい領域でエネルギー損失が顕著であること、およびゲート上流面付近で水面上昇が起こることを明らかにした。

今後は、自由流出の限界条件の水理に加え、潜り流出や他形式のゲートの水理を検討する予定である。

**謝辞：**本研究において、実験及びデータ整理等で熱心に協力いただいた松江工業高等専門学校の卒業生、桑山なるみ、安井美沙希の両氏に深甚の謝意を表す次第である。

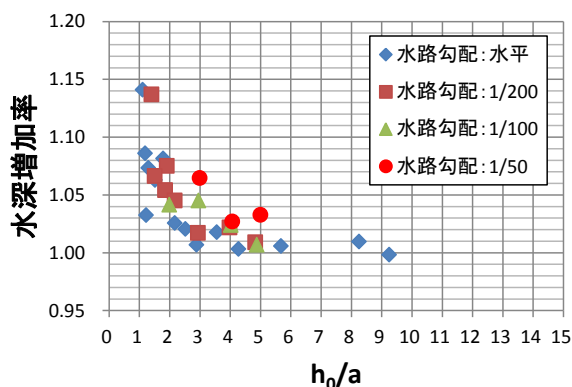


Figure 13 Relation of rising rate of water level immediately upstream of the gate and  $h_0/a$

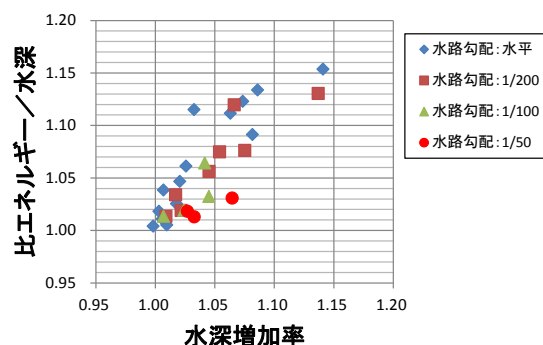


Figure 14 Relation of rising rate of water level immediately upstream of the gate and ratio of specific energy to water depth

## 参考文献

- 1) 本間仁, 安芸皎一: 物部水理学, 岩波書店, pp.199-210, 1961.
- 2) 土木学会: 水理公式集 昭和 46 年改訂版, pp.276-287, 1971.
- 3) 椿東一郎: 水理学 I, 森北出版, pp.198-200, 1973.
- 4) 名合宏之: 開水路底流型水門の自由流出に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 264 号, 1977.
- 5) 安田浩保, 山田正, 後藤智明: スルースゲートの閉鎖に伴い発生する段波の水理実験とその数値計算, 土木学会論文集, No.733/II-63, pp.89-105, 2003.
- 6) 安田陽一, 富田麻里子: 矩形断面水平水路における潜り跳水の水理特性, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol.71, No.4, I\_535-I\_540, 2015.
- 7) 鈴木洋之, 佐々侑太, 岡部基, 石井陽, 工藤裕之: Toch の式の解析によるスルースゲートからの推定放流量の精度劣化要因の解明, 水文・水資源学会誌, Vol.28, No.4, pp.176-188, 2015.
- 8) Henry, R.: Discussion to "On submerged jets", Transactions of ASCE, 115, pp.687-694, 1950.

- 9) Rajaratnam, N. and Subramnya, K. : Flow equation for the sluice gate, *Journal of Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 93(3), pp.167-186, 1967.
- 10) 名合宏之 : 水門形状の流量係数に及ぼす影響に関する研究, *土木学会論文報告集*, 第 270 号, pp.59-71, 1978.
- 11) Swamee, P.: Sluice gate discharge equations, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 118(1), pp.56-60, 1992.
- 12) Ferro, V.: Simultaneous flow over and under a gate, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 126(3), pp.190-193, 2000.
- 13) Ansar, M.: Discussion of "simultaneous flow over and under a gate" by Ferro, V. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 127(5), pp.325-326, 2001.
- 14) Ferro, V.: Closure to simultaneous flow over and under a gate by Ferro, V., *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 127(5), pp.326-328, 2001.
- 15) Lin, C. H., Yen, J.F. and Tsai, C.T.: Influence of sluice gate contraction coefficient on distinguishing condition, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 128(4), pp.249-252, 2002.
- 16) Belaud, G., Cassan, L. and Baume, J.P.: Calculation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measurement, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 135(12), pp.1086-1091, 2009.
- 17) Lozano, D., Mateos, L. Merkley, G.P., and Clemmens, A.J.: Field calibration of submerged sluice gates in irrigation canals, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 135(6), pp.763-772, 2009.
- 18) Habibzadeh, A., Vatankhah, A.R. and Rajaratnam, N.: Role of energy loss on discharge characteristics of sluice gates, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 137(9), pp.1079-1084, 2011.
- 19) Cassan, L. and Belaud, G.: Experimental and numerical investigation of flow under sluice gates, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(4), pp.367-373, 2012.
- 20) Larsen, A.P. and Mishra, P.K.: Constant discharge device for field irrigation, *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), pp.481-489, 1990.
- 21) Alhamid, A.A. : Coefficient of discharge for free flow sluice gates, *Journal of King Saud University, Engineering Science, Riyadh, Saudi Arabia*, 11(1), pp.33-48, 1999.
- 22) Garbrecht, G.: Discussion of discharge computation at river control structures, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 103(12), pp.1481-1484, 1977.
- 23) Noutsopoulos G.K., and Franariotis, S.: Discussion to free flow immediately below sluice gates, by N. Rajaratnam, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 104, pp.451-454, 1978.
- 24) Nago, H.: Influence of gate-shapes on discharge coefficients, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, 10(2), pp.116-119, 1978.
- 25) 土木学会 : 水理公式集 昭和 46 年改訂版, pp.284, 1971.
- 26) Ramamurthy, A.S., Tim, U.S. and Rao, M.J.V.: Flow over sharp-crested plate weirs, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 113(2), pp.163-172, 1987.

(平成29年12月15日受理)