

ダム洪水吐クレストゲートの 非定常放流特性に関する研究

STUDY ON THE UNSTEADY DISCHARGE CHARACTERISTICS OF THE SPILLWAY CREST GATES

佐藤隆宏¹・加藤誠司²・田中伸和³・米山望⁴

Takahiro SATO, Seiji KATOU, Nobukazu TANAKA and Nozomu YONEYAMA

¹ 正会員 工修 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地)

² 工修 中部電力(株) 電力技術研究所 (〒 459-8522 愛知県名古屋市緑区大高町字北関山 20 番地の 1)

³ 正会員 工博 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒 270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地)

⁴ 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所 (〒 611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The hysteresis phenomena which can occur in transition between gated flow and free flow are experimentally clarified, and the profile and the fluctuation of water surface and the velocity profile under the hysteresis phenomena are measured. Also the simple experimental equation to predict the discharge is presented, and the relationship among the water height, the gate opening and the discharge is described as the discontinuous condition in transition. And then, the unsteady discharge characteristics in transition are experimentally analyzed, and the validity of the proposed equation is confirmed through the comparison with the discharge based on the velocity. In addition, it appears that the numerical simulation model using the incompressible fluid analysis and VOF can simulate the hysteresis phenomena in transition.

Key Words: spillway crest gate, discharge, free flow, gated flow, hysteretic behavior

1. 緒言

洪水吐ゲートを有するダムでは、河川の防災上ならびに貯水池の効率的運用の観点から、出水時におけるダム放流量の適切な管理が要請されており、精度の高い放流量の把握が必要である。ダム放流量は直接測定することが困難であるため、通常、貯水池水位とゲート開度を逐次測定し、それらと流量の関係式(ダム放流量算定式)を用いることで放流量を求めている。この算定式は放流形態、すなわち、ゲート下から放流されるパシャルフロー(ゲート流出)とゲート全開時のフリーフロー(自由流出)では異なる式(パシャルフロー時は水頭の 0.5 乗、フリーフロー時は水頭の 1.5 乗に比例する式)を用いるため、各々の算定式の精度とともに、各算定式の切り替え条件を精度高く見積もる必要がある。

一方、水平水路床上のスライスゲートを対象に理論的・実験的検討を行った Defina ら¹⁾によって、流量が同じでも、ゲート閉操作時にゲート先端が水面に接触するゲート開度と、ゲート開操作時にゲート先端から水面が離れるゲート開度が異なるヒステリシス現象が生じることが指摘されている。よって、ダム放流量を精度高く見積もるためには、ダム洪水吐クレストゲートにおいてこれまであまり考慮されてこなかったこれらの知見を検討した上で、パシャルフローとフリーフローの算定式の切り替え条件、すなわち、境界開度条件式を決定する必要がある。

そこで本研究では、ゲートを有するダム洪水吐を対象に、パシャルフローとフリーフローの遷移時に生じる現象を比較的大きな模型で実験的に明らかにし、それらの境界開度条件式について検討する。さらに、放流形態の遷移に伴う非定常放流特性について実験ならびに数値解析により検討を行うとともに、境界開度条件式を含めた放流量算定方法の妥当性を検証する。

2. パシャルフローとフリーフローの遷移時に生じる現象

本章では、ダム洪水吐クレストゲートを対象に水理模型実験を行い、パシャルフローとフリーフローの遷移時に生じる現象を明らかにする。

図-1 は、本実験で用いたダム堤体模型ならびにスライドゲートであり、実物の 1/15 相当の大きさである。なお、同図には同じ設計水頭 H_d を与えた場合の標準越流頂形状²⁾を参考までに示しているが、本ダム形状はそれらよりもダム堤体が若干厚く、クレスト天端には 0.04m の水平部がある。また、ゲートはアクリル製であり、先端形状は直角である。本実験設備は上流から順に、ポンプ 4 台、給水配管、水路、配水管、流量測定堰からなる。水路は幅 1.770m、長さ 10.000m、高さ 1.400m であるが、本論文で報告するケースでは水路幅 B を 0.509m に狭め、橋脚影響のない鉛直 2 次元流況について検討を行っている。計測は、貯水池水位はポイ

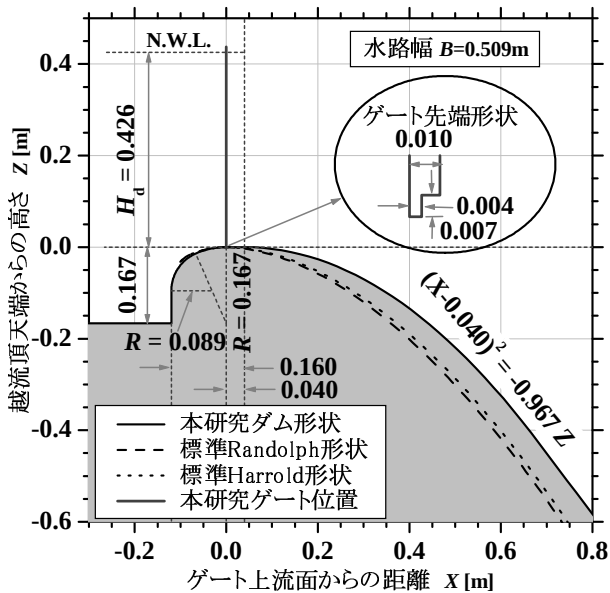


図-1 ダム形状ならびゲート形状

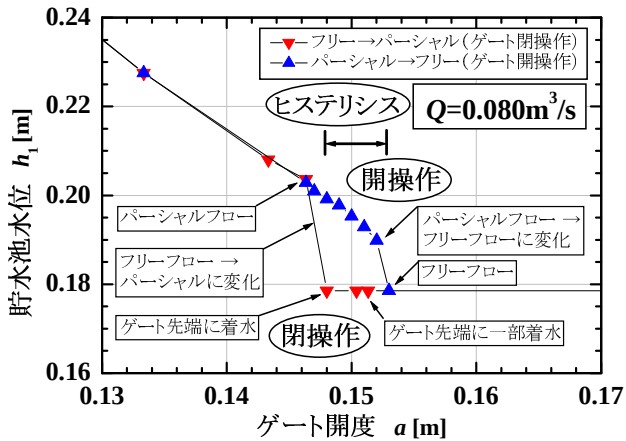


図-2 ゲート操作方向と境界開度の関係

ントゲージ，水面変動は容量式波高計，流速は3次元電磁流速計（センサー直径14mm），流量はJIS規格の全幅堰（95%信頼度の不確かさ $\pm 1.7\%$ 以内）で測定した．

図-2は「流入流量 $Q=0.080\text{m}^3/\text{s}$ 」の一定条件において，ゲート開度 a を少しずつ変化させた場合に得られた $X=-0.80\text{m}$ での貯水池水位 h_1 とゲート開度 a の関係である．なお，ゲート操作後は十分に時間をおき，放流形態と貯水池水位が変化しないことを全ゲート開度条件で確認している．これらによると，ゲート全開状態から閉操作を少しずつ行った場合，フリーフローの水面に対して先ずゲート先端の一部が着水し，続いてゲート先端のほぼ全体にわたって間欠的な着水状態となる．ここまでは流れに影響をほとんど与えないので貯水池水位 h_1 は変化しない．さらにゲートを少し閉めると一気にゲート前面の水位が上昇し，パシャルフロー状態になり，貯水池水位 h_1 も急上昇する．一方，パシャルフロー状態から開操作を少しずつ行った場合，ゲート開度 a を大きくするに従って貯水池水位 h_1 は低下する．しかしゲート閉操作時にフリーフローからパシャルフローに一気に遷移したゲート開度 $a(=0.148\text{m})$ までゲートを開けたとしても，パシャルフローの方がフ

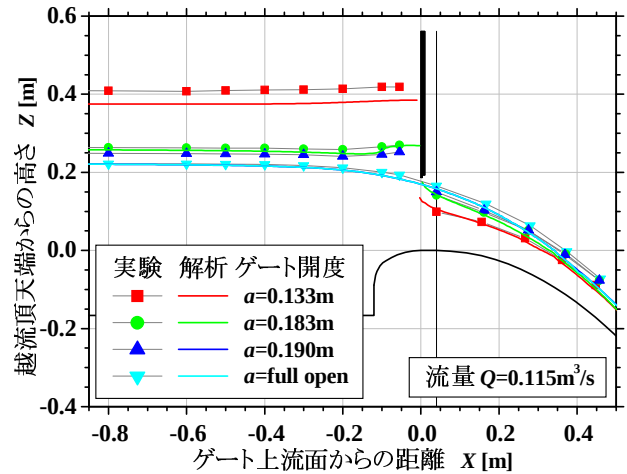


図-3 ゲート開度 a と水面形の関係

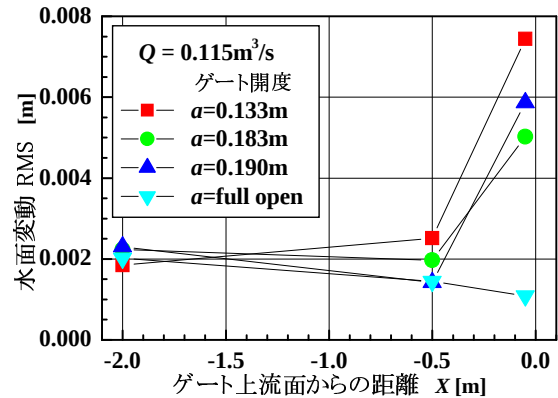


図-4 ゲート開度と水面変動の関係

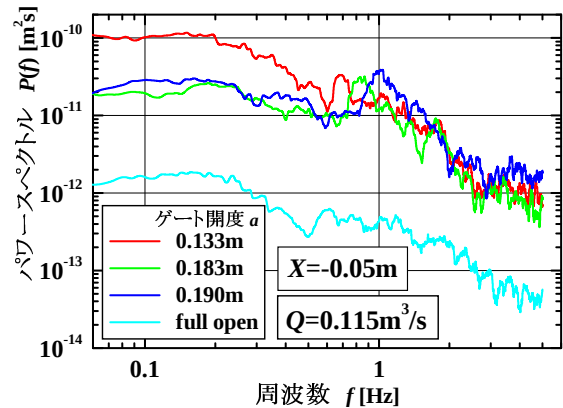


図-5 ゲート開度と水面変動スペクトルの関係

リーフローよりもエネルギー損失が大きいので貯水池水位が高く，パシャルフローからフリーフローには遷移しない．このヒステリシス現象はゲート開度操作で5mm程度続き，最後はゲートから少し離れた地点の水面とゲート前面の水面が同じになると同時にフリーフローに変化し，貯水池水位 h_1 は一気に下がる．このように流入流量一定条件でゲート操作をゆっくり行った場合，ダム洪水吐クレストゲートの境界開度はゲート操作方向によって異なり，ヒステリシス現象が生じる．

次に，このヒステリシス現象が生じているゲート開度における流況について検討を行う．図-3は「流量 $Q=0.115\text{m}^3/\text{s}$ 」の場合の水面形であり，ゲート開度 a を変化させた4ケースについて第4.(3)節に後述する数値

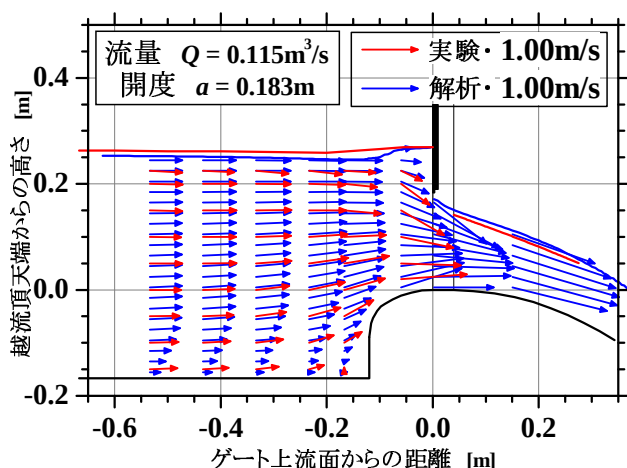


図-6 パーシャルフロー時の流速ベクトル

解析結果とともに示している．これらによると、「ゲート開度 $a=0.133\text{m}$ 」の場合にはゲート前面で僅かに水面が盛り上がるが、「ゲート開度 $a=0.183, 0.190\text{m}$ 」の場合にはゲート前面は同様に盛り上がるものの、ゲートから少し離れた地点では逆に水面が低くなる．特に、「ゲート開度 $a=0.190\text{m}$ 」はゲート閉操作時にフリーフローとなるゲート開度であるが、この水面形はゲート前面を除くと「ゲート開度 $a=\text{全開}$ 」の水面形に類似する．

図-4 は水面変動の実験結果であり、「ゲート開度 $a=\text{全開}$ 」を除いたケースではゲート直上流で最も水面変動が大きい．ゲート直上流 $X=-0.05\text{m}$ の水面変動スペクトルを示した図-5 によると、 1Hz 前後に見られるピークはそれほど明瞭ではないものの、ゲート開度 a が大きく、水深が低いほどピーク周波数が高くなる、つまり、水面変動周期が短くなること分かる．

図-6 は「ゲート開度 $a=0.183\text{m}$ 」での流速ベクトルであり、第 4.(3) 節に後述する数値解析結果とともに示している．これらによると、水面付近はあまり変化せずに真っ直ぐ流れ、ゲート直前で下向きに流向変化することが分かる．なお、図-3～図-6 に示した流況的特徴が放流量に及ぼす影響については、第 4.(3) 節に後述する．

3. 境界開度の定量的検討とモデル式の提案

本章では境界開度のモデル化を行うため、はじめに、前章で明らかとなったゲート操作方向による境界開度の違いに対して流量が与える影響を実験的に調べる．

図-7 に、ゲート閉操作時ならびに開操作時の境界開度 a_c と流量 Q の関係を示す．ここに、▼ はゲート閉操作時にフリーフローからパーシャルフローに変化した瞬間のゲート開度 a 、▲ はゲート開操作時にパーシャルフローからフリーフローに変化した瞬間のゲート開度 a であり、共にゲート操作はゆっくりと少しずつ行っている．これらによると、流量 Q が多いほど境界開度 a_c の差は大きくなり、 $Q=0.220\text{m}^3/\text{s}$ での境界開度 a_c の差は 0.018m となる．この開度差はその流量でのフリーフロー貯水池水深 h_1 (ダム天端基準) の 6% に相当する．

次いで境界開度モデル式の検討を行う．図-8 に $X=-$

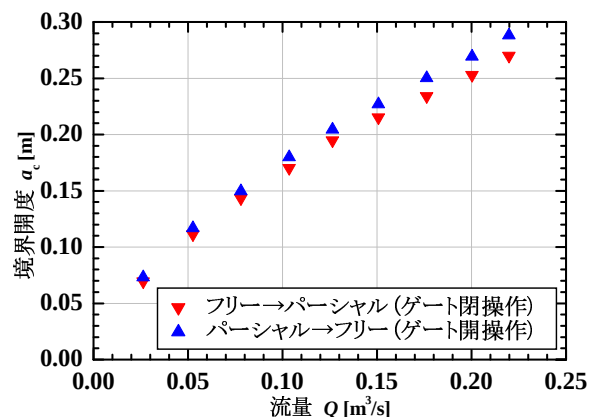


図-7 境界開度と流量の関係

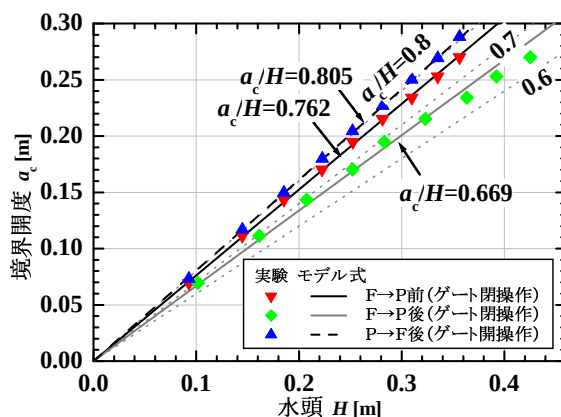


図-8 境界開度と全水頭の関係

0.80m での全水頭 H と境界開度 a_c の関係を示す．ここに、▼ と同じゲート開度 a であるが、パーシャルフローになってしばらく時間が経過した後の全水頭 H との関係である．なお、ダム放流運用の境界開度としては限界水深 h_c がしばしば使われるが、本実験結果によると、ゲート閉操作時の境界開度 a_c は限界水深 h_c に比例しないことが分かっている．図-8 によると、ゲート閉操作時にフリーフローからパーシャルフローに変化した瞬間の境界開度 a_c とその直前のフリーフロー時の全水頭 H の関係 (▼) はほぼ線形関係にあり、ゲート開操作時にパーシャルフローからフリーフローに変化した瞬間の境界開度 a_c とフリーフロー遷移後しばらく時間経過した後の全水頭 H の関係 (▲) もほぼ線形関係にあることが分かる．よって、本研究では境界開度モデル式を全水頭 H との関係を基に式 (1) を提案する．

$$\begin{aligned} a_c/H_F &= 0.762 && \text{閉操作 (フリー→パーシャル)} \\ a_c/H_F &= 0.805 && \text{開操作 (パーシャル→フリー)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 H_F はフリーフローとみなして流量を決め、算出した全水頭である．なお、本研究では、ラジアルゲートや橋脚のある 3 次元条件でも同様の実験を行ったが、境界開度モデル式の定数に相違はあるものの、ゲート閉操作時と開操作時の定数の差は大凡 0.04 となることを確認している．このヒステリシス現象による定数の差の理論的根拠としては、ゲート流出時の縮流係数等が考えられるが、Defina ら¹⁾ による検討結果よりも若干小さい理由を含めて今後の課題としたい．

4. 非定常放流特性に関する検討

前章までは境界開度のヒステリシス現象のみに注目し、検討したが、本章ではダム放流量に関して境界開度のヒステリシス現象を考慮した検討を行う。

(1) 貯水池水位とゲート開度と放流量の関係

図-9は、ダム放流運用に欠かせない貯水池水位 h_1 とゲート開度 a と放流量 Q の関係について、実験結果、モデル式とともに、第4.(3) 節に後述する数値解析結果を示したものである。ここに、モデル式導出法の詳細はスペースの都合上割愛するが、流量係数 C_F と C_P には実験結果より作成された以下の回帰式を用いている。フリーフローの場合

$$Q = C_F B H^{3/2}, \quad C_F = 1.60 \frac{1 + 0.982 (H/H_d)}{1 + 0.491 (H/H_d)}$$

パーシャルフローの場合

$$Q = C_P a B \sqrt{2gH}, \quad C_P = \frac{0.647 (h_1/a)}{0.269 + (h_1/a)} \quad (2)$$

また、ヒステリシス現象を考慮した境界開度条件式 (1) を記すと点線と破線になる。通常、ゲート開度一定条件の線 (例えば、 $a=0.267\text{m}$) はフリーフローの線 ($a=\text{full open}$) と直接交点を結ぶが、もしくは、連続的な遷移条件式を間に挟んで交点を結び、貯水池水位 h_1 とゲート開度 a と放流量 Q の関係が全範囲で一意に決まるようにしてダム放流運用に用いられる。しかし本研究の結果を踏まえると、ゲート開度一定条件の実線は境界開度条件式 (1) の点線もしくは破線までが有効であり、フリーフローの実線とは直接交点をもたず、不連続となる。つまり、境界開度条件とフリーフローで挟まれる領域 (パーシャルフローからフリーフローへ遷移する場合は水色の領域、フリーフローからパーシャルフローへ遷移する場合は水色と黄色の領域) は、貯水池水位とゲート開度と放流量の関係が成立しない不連続領域であり、そこに連続的な遷移条件式を設定することは実現象を反映していないと考えられる。また、貯水

池水位が同じ条件で放流形態が変化した場合の放流量変化を表したものであり、貯水池水位が高い場合に遷移時の放流量変化が大きいことを示しているが、ゲート開度 a が同じでも、ヒステリシス現象のために、パーシャルフローからフリーフローへ遷移時の方が低い貯水池水位で遷移し、放流量変化が小さくなることが分かる。なお、この不連続領域が生じる原因は、貯水池水位 h_1 とゲート開度 a の定義位置が異なるためである。

(2) 「流入流量一定・ゲート開度変化」の場合の検討

前節では式 (1),(2) から見た放流量の静特性について検討を行った。本節と次節では、実際に生じうる現象を念頭に放流量の動特性、すなわち、非定常放流特性の検討を行う。まず、本節では「流入流量一定・ゲート開度変化」の場合を対象に実験的検討を行う。実験は流入流量を $Q=0.080\text{m}^3/\text{s}$ で一定に保ちながらゲート操作を行い、貯水池水位を変化させた。ゲート操作については、「ゲート開操作」の場合は開度 $a=0.138\text{m}$ を初期状態にゲート開速度 $0.04\text{m}/\text{min}$ で全開まで、「ゲート閉操作」の場合はゲート開度全開を初期状態にゲート閉速度 $0.04\text{m}/\text{min}$ で開度 $a=0.138\text{m}$ まで操作した。

図-10に「ゲート開操作」の場合の計測結果を示す。上・中段の結果によると、ゲート操作開始である15秒から貯水池内水位は下がり始め、ゲート直下流水位 ($X=0.05\text{m}$) は上がり始める。また、ゲート近傍流速 $U_{gate}(X=-0.05\text{m}, Z=0.07\text{m})$ も遅くなり始める。ゲート直上流水位 ($X=-0.05\text{m}$) はパーシャルフローからフリーフローへの遷移時刻直前に急激に水位が下がり、53秒でゲート先端から水面が離れる。遷移後は、貯水池水位はゆっくりと低下する一方、ゲート近傍流速 U_{gate} は一旦加速する傾向が見られる。

図-10の下段は貯水池水位から式 (2) を用いて算出した放流量と、ゲート近傍流速 U_{gate} から算出した流量を比較したものであり、前者の計算流量 (貯水池水位) ではパーシャルフロー流量とフリーフロー流量の切り替え条件にゲート開操作時の式 (1) を用いている。また、後者の計算流量 (流速) は、パーシャルフローの場合にはゲート開度 a との積、フリーフローへ場合にはゲート直上流水位 h との積より導いている。これらによると、両者の結果はいずれも、ゲート操作開始後に流量が増加し始め、フリーフローへの遷移時刻頃に最大流量となり、その後は漸減することが分かる。また、本研究で提案する放流量算定方法がゲート開操作を伴う非定常特性を適切に表せていることが分かる。なお、下段の結果より、ゲート閉操作時の式 (1) を用いた場合、ゲート開度との交点が左側にあるため、遷移時刻を実際よりも早く判定すること、ならびに、このことが計算流量の不連続を大きくさせることが分かる。

図-11に「ゲート閉操作」の場合の計測結果ならびに放流量算定結果を示す。これらによると、貯水池内水位はフリーフローからパーシャルフローに遷移した瞬間に水位が急上昇、ゲート直下流水位は急下降し、そ

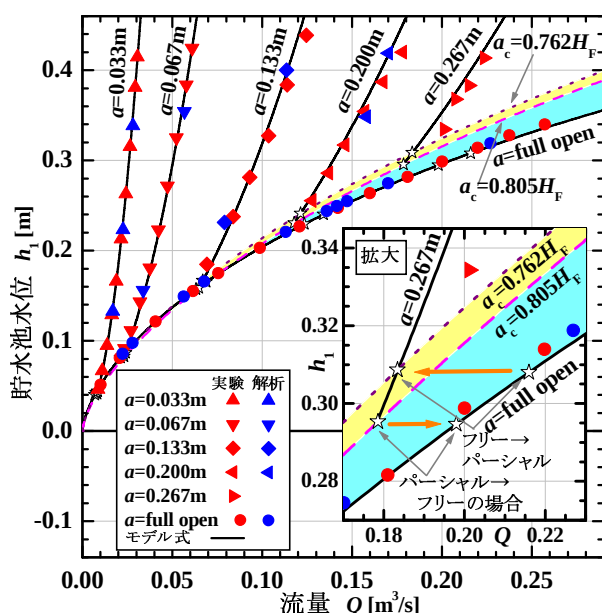


図-9 貯水池水位とゲート開度と放流量の関係

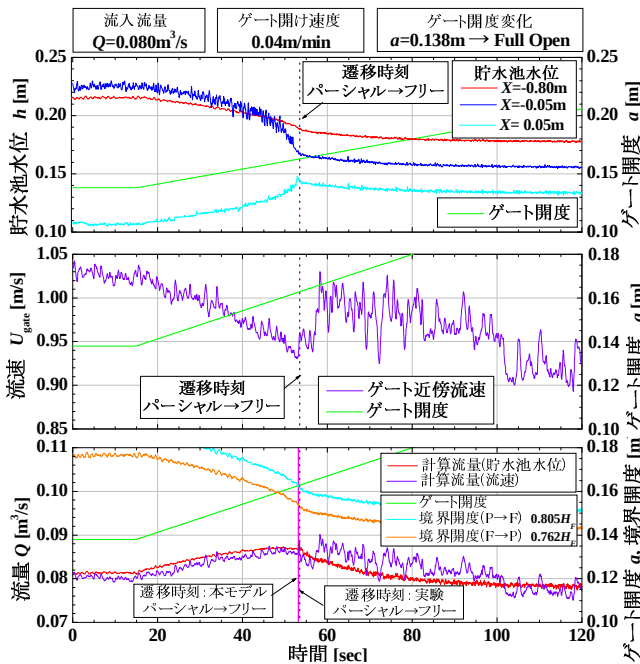


図-10 「流入流量一定・ゲート開度変化」の場合の水位と流速と流量の時間変化 [実験, ゲート開速度 0.04m/min]

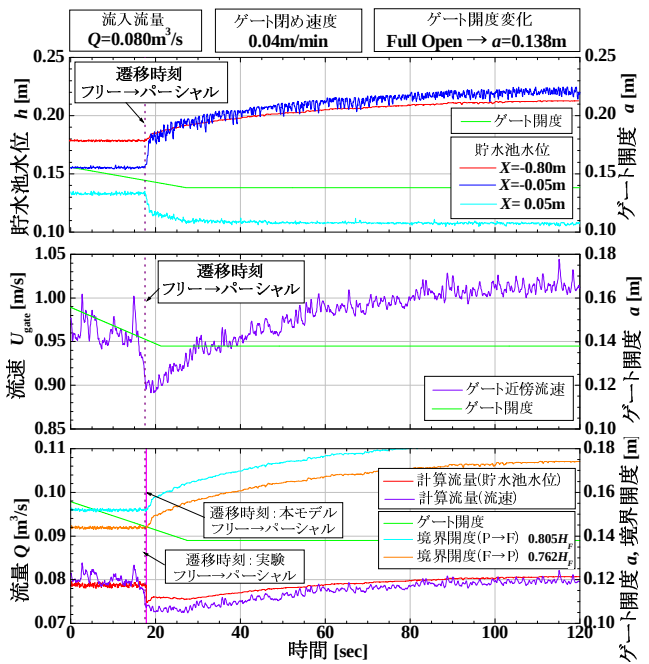


図-11 「流入流量一定・ゲート開度変化」の場合の水位と流速と流量の時間変化 [実験, ゲート閉速度 0.04m/min]

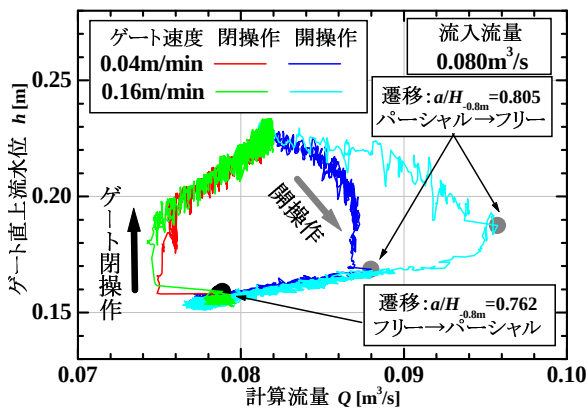


図-12 「流入流量一定・ゲート開度変化」の場合の放流量とゲート直上流水位の関係 [実験]

の後一定値に漸近することが分かる。また、ゲート近傍流速 U_{gate} も遷移直後に急減速し、その後次第に速くなり一定値に落ち着くことが分かる。計算流量に関しては、式 (1) に基づく遷移時刻は実験結果にほぼ一致し、遷移した瞬間に流量は急減し、その後回復すること、さらに、ゲート近傍流速から計算される流量にほぼ一致することが分かる。

図-12 は貯水池水位から算定した計算流量とゲート直上流水位の関係をゲート操作速度を変えて示したものである。これらによると、「ゲート閉操作」の場合、フリーフローからパーシタルフローに遷移すると放流量は即座に減少するとともに、水位は一瞬の停滞のあと急上昇し、その後、水位の上昇と共に放流量も増加するが、それは定量的にも操作速度に依存しないことが分かる。一方、「ゲート開操作」の場合、操作速度が遅いほど最大放流量は少なくなる。これは、開速度が遅い場合には貯水池水位が低い状態で遷移するので、フリーフローに遷移してもその貯水池水位でのフリーフロー流量はそれほど多くならないためである。

(3) 「流入流量変化・ゲート開度一定」の場合の検討

本節では流入流量が変化する場合の検討結果を示すが、実験でそのように操作するには困難であったこと、ならびに、ゲート通過流量を直接知ることが出来るため、数値解析で検討を行った。数値解析手法の詳細は既報告³⁾を参考にされたいが、VOF 法を用いた直交格子有限差分法の 3 次元乱流解析コードである。また、ダム越流面形状を詳細に再現するために FAVOR 法を用い、最小計算格子幅を 0.0027m としている。数値解析の再現性は図-3 と図-6 に示したように水面形・流速ベクトルともに概ね良好であり、貯水池水位とゲート開度と放流量の関係も図-9 に示したようにフリーフロー、パーシタルフローともに概ね一致している。なお、ゲート直上流の流向は測定位置精度に大きく依るため若干の相違があるものの、以下に示す非定常時の水位と放流量の関係についての検討には影響しないと考えられる。

図-13 に「ゲート開度 $a=0.148m$ 」で一定に保ちながら流入流量を変化させた場合の数値解析結果を示す。ここでは、初期の静水状態では貯水池水位 h をダム越流堤頂と等しくし、そこへ上流から水を流入させ、ひとまず流入流量 $Q_{in}=0.080m^3/s$ で一定にした。このときダム越流形態はフリーフローである。その後 15.5 秒から 20.7 秒にかけて流入流量 Q_{in} を $0.103m^3/s$ に増量する間にパーシタルフローに遷移した。20.7 秒から 31.0 秒までは流入流量一定、そして 31.0 秒から 41.3 秒にかけて $0.080m^3/s$ に減量し、56.8 秒まで一定としたが未だパーシタルフローであった。つまり数値解析でもヒステリシス現象が生じた。その後 56.8 秒から 62.0 秒にかけて流入流量 Q_{in} を $0.057m^3/s$ に減量する間にフリーフローに遷移した。これらによると、フリーフローからパーシタルフローへ遷移するとゲート直上流水位は急上昇

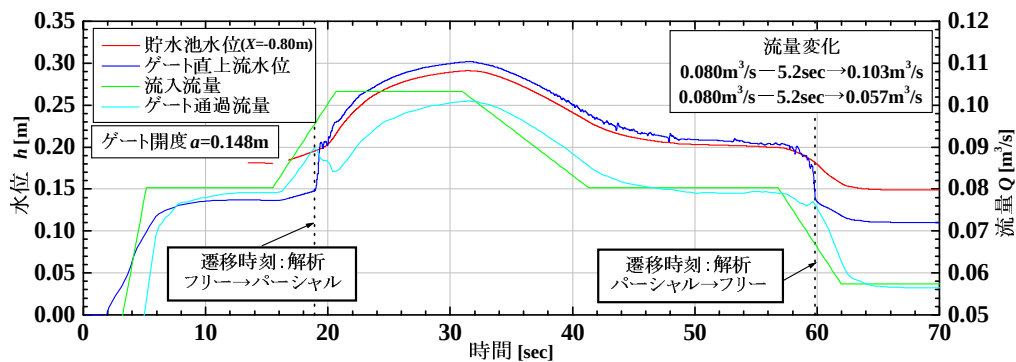


図-13 「流入流量変化・ゲート開度一定」の場合の水位と流量の時間変化 [数値解析]

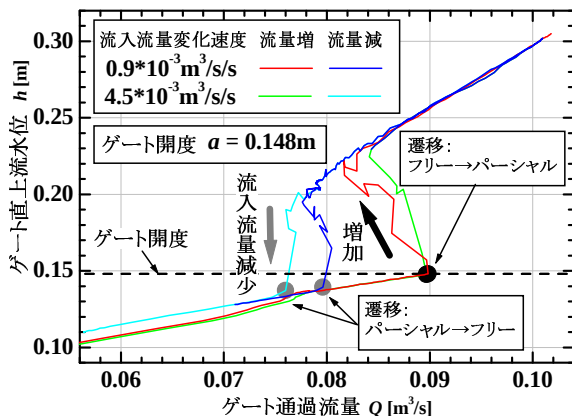


図-14 「流入流量変化・ゲート開度一定」の場合の放流量とゲート直上流水位の関係 [数値解析]

し、ゲート通過流量 Q_{gate} は一旦減少した後、増加に転じる。一方、パーシャルフローからフリーフローへの遷移時には、ゲート直上流水位は遷移直前に急下降し、その後ゆっくりと減少する。ゲート通過流量 Q_{gate} は遷移直前から若干増量し始め、遷移時の最大流量を経て、流入流量変化とほぼ同程度の速度で減少する。

図-14はゲート通過流量 Q_{gate} とゲート直上流水位 h の関係を、流入流量変化速度を変えて示したものである。これらによると、両ケースともフリーフローからパーシャルフローへ遷移した直後に水位上昇と共にゲート通過流量 Q_{gate} は一旦減少し、パーシャルフロー流量とゲート直上流水位 h の関係と同じ線上に達してから増量に転じる。パーシャルフローからフリーフローへの遷移については、遷移前に一旦ゲート直上流水位 h の下降とゲート通過流量 Q_{gate} の増加を経た後に遷移する。また、実験同様にゲート通過流量 Q_{gate} とゲート直上流水位 h の関係が遷移の方向に依存するヒステリシス現象が生じる。

ダム洪水吐クレストゲートでは、流入流量の増加に応じてゲート開操作する場合が特に重要であるが、実験的に得られた流況観察を含めてその際の放流量について考察すると、ゲート開操作時には境界開度に近づくとゲートから少し離れた地点で水面が下がり始めるとともに(図-3)、ゲート近傍の水面付近を除いた流速ベクトルはフリーフロー状態に近づく(図-6)。また、水面付近の流れはゲートに衝突し、上向き流れと下向き流れが交互に生じることによって水面変動が生じるが、ゲート開操作に伴いその水面変動周期は短くなり

(図-5)、水面がゲート下端より下がる頻度が増え始める。さらにゲートが開くとゲート直上流水位は急低下するとともに、放流量は増加し、フリーフローへ遷移するが、ゲート近傍の水面付近を除いた水面形と流速ベクトルは既にフリーフロー状態に近づいていたこと、ならびに、ヒステリシス現象を経た後にフリーフローに遷移したため、ゲート抵抗が突然無くなることによる放流量の急激な増加を引き起こさない。しかし、ゲートを急速に開操作する場合には、過渡的な疑似フリーフロー状態を経ないため、放流量が不連続的に急増する。

5. 結言

本研究では、模型縮尺 1/15 相当のダム洪水吐クレストゲートを対象に実験を行い、パーシャルフローとフリーフローの遷移条件を定める境界開度がゲート操作方向によって異なるヒステリシス現象が生じることを明らかにするとともに、その境界開度条件式は全水頭を用いて作成できることを示した。また、パーシャルフローからフリーフローへ遷移する際、ゲート近傍の水面が下がってフリーフロー状態に近づくこと、ならびに、境界開度に近いほどゲート直上流の水面変動が大きく、その周期は短くなることを示した。さらに、定常時を対象とした数値解析において、パーシャルフロー、フリーフローともに実験再現性が良いことを確認した。そして、実験と数値解析によって非定常時の放流特性を明らかにするとともに、提案した境界開度条件式を用いた算定方法によって放流量と非定常放流特性を適切に算定できることを示した。

謝辞：実験にあたり並木正明氏、伊澤朋一氏((株)セレス)の協力を頂いた。数値解析にあたり大西浩史氏、中園有子氏((株)電力計算センター)の協力を頂いた。ここに記し、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Defina, A., Susin, F. M.: Hysteretic behavior of the flow under a vertical sluice gate, PHYSICS OF FLUIDS, Vol.15, No.9, pp.2541-2548, 2003.9.
- 2) 水理公式集, 平成 11 年版, 土木学会, pp.241-276, 1999
- 3) 米山望: 自由水面をもつ多次元流れの数値水理学的研究, 京都大学学位論文, 2001.6.

(2007.9.30 受付)