河川技術論文集，第24巻，2018年6月

水理模型実験代替を目的とした３次元流体解析によるダム越流係数算定技術の開発

EVALUATION TECHNIQUE OF FLOW DISCHARGE COEFFIIENT USING 3-D NUMERICAL SIMULATION METHOD WHICH SUBSTITUTES FOR HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT

熊谷　洋[1]・板井　雅之[1]
Yo Kumagai, Masayuki Itai

[1]正会員　工修　東北電力株式会社　研究開発センター（〒981-0952 仙台市青葉区中山7丁目2番1号）

Considering the global climate change and resulting frequent torrential rain, hydro dam operators are required to secure safety of the river basin even at the most severe flooding.

In general, a flow discharge coefficient of a dam is set by a past hydraulic formula or a hydraulic model experiment, but in some cases it is necessary to revalidate the flow discharge coefficient due to a difference in conditions such as flow rate and sedimentation. Hydraulic model experiments are also a powerful tool in such re-verification, but it is costly and time-consuming. This paper describes advanced 3D-numerical simulation method for calculating flow discharge coefficient at higher accuracy which substitutes for conventional hydraulic model experiment.

Key Words : *Free flow, flow discharge coefficient, hydraulic model experiment, flood discharge, design flood discharge, design flood water level, axis of dam crestline*

１．はじめに

一般にダムの越流係数は，既往水理公式や水理模型実験により設定されているが，流量や堆砂等の条件の違いからダム越流係数の再検証が必要な場合がある．このような再検証においても水理模型実験が有力な手段だが費用，時間を要する事が問題である．また，近年気象激甚化により数十年から数百年に一度の洪水現象が頻発しており，設計洪水量を超過するような出水があった場合，事業者は速やかに洪水現象に係る評価が必要である．しかし，水理模型実験による評価では，模型製作技術者確保の観点から敏速な対応が困難である．一方，３次元流体解析でも計算機能力の向上から，高解像度格子を与えたダム越流解析[1)]は可能となってきたが，ダム越流形状およびダム形状パラメーターと解析精度との関係が整理されておらず，実業務への適用まで至っていない．

計算機能力の著しい向上や洪水発生時の速やかな評価の必要性を鑑みると，水理模型実験より敏速な対応が可能な３次元流体解析によるダム越流係数算定技術の確立が必要である．また，今般の気象激甚化を踏まえると想定し得る最大規模の洪水発生[2)]が懸念され，それを踏まえた地域の安全安心へ向けた取組みを求められることが想定される．このため，課題の多い水理模型実験の代替を目指し，３次元流体解析によるダム越流係数算定技術（以降，算定技術という）の開発ならびに検証を行なった．

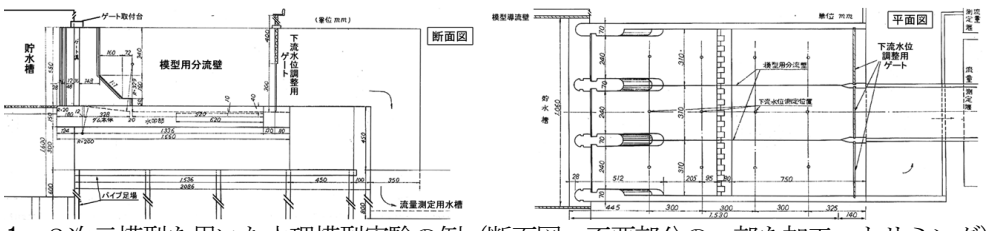


図-1　２次元模型を用いた水理模型実験の例（断面図：不要部分の一部を加工・トリミング）[3)]

２．３次元流体解析によるダム放流能力検討

(1) ダム放流能力検討に係る水理模型実験の概要

ダム放流能力検討実施にあたって一般的には水理模型実験が用いられており，特徴として以下があげられる．

a）多数のゲートを有するダム設備の放流能力を確認する場合，ポンプ等設備容量の制限からダム設備全てを大

型模型で再現することが難しく，再現した場合でも小型模型で越流水深が小さい中でのデータ取得となり，精度良いダム越流係数データの取得が難しい．

b）調整池形状等の影響が小さく，当該ゲートと隣接ゲートで越流係数を評価出来る場合，２次元模型（**図-1**）とした方が，ダム全て再現する場合より高精度のダム越流係数取得には有利であるため，ポンプ等設備容量の範囲で極力大型模型とし，高精度のダム越流係数データを取得している．

(2) 3次元流体解析モデルによるダム越流係数算定技術

a) 基本方程式および解析条件

算定技術の開発で使用したソルバー（株式会社ソフトウェアクレイドル社 STREAM Ver.13）はNavier-Stokes方程式に基づき，自由水面追跡方法はVOF(Volume of Fluid)法[4]を改良したMARS(Multi-Interface Advection and Reconstruction Solver)法[5] に基づく方法である．解析条件は乱流モデルを用いずに行った．なお，予備検討において，乱流モデルを用いてもダム水位は同一の値になることを確認している．壁面の取扱い[6] はダム堤体やピアを構造格子で作成することに起因した境界層の過剰な発達による非物理的な流れを避けるため，壁面摩擦なし（Slip条件）とした．流入・流出条件は，**図-2**に示すように流入は一様流入，流出は自然流出とした．

b) メッシュ解像度

解析格子は，格子作成の容易さから構造格子とした．解析モデルのメッシュ解像度は，**表-1**に示すダム工作物規模を勘案し，ダム堤体におけるメッシュ解像度を$\Delta X_{min}=\Delta Y_{min}=\Delta Z_{min}=0.2$mを基準とした．メッシュ解像度と解析精度の関係に係る検討では，ΔX_{min}, ΔY_{min}, ΔZ_{min}それぞれを0.1mから0.5mまで0.1m毎に変化させた．なお，$\Delta Z_{min}=0.1$mの場合については，計算機容量の観点から$\Delta X_{min}=\Delta Y_{min}=0.2$mとした．

c) ダム上流整流対策（図-2）

実験・解析ともに精度を上げるため，ダム上流の流況を一様にする必要がある．２次元模型では整流板（多孔板）を設置するなど工夫を施している．解析モデルでも実験の整流方法に準拠し，圧力損失（透過率78%）をモデル化した整流板（ΔX方向1メッシュ）4枚を流入直下で発生するはく離再付着位置の下流に配置した．

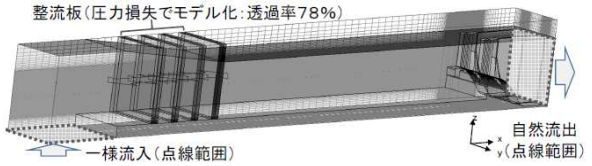


図-2 解析モデル概要図

(3) 検証方法

a) ダム構造諸元

解析対象は過去に２次元模型を用いた水理模型実験を実施したダムとし，それらのダム構造諸元[7]は**表-1**のとおりである．ここで，H_dは設計水頭，a, bはダム越流形状に関するパラメーター，L_o, L_1, L_2, R_1, R_2はダム形状パラメーターであり，**図-3**に示す．なお，複合円ではなく円形の場合は$R_1=0.000$とした．Bは中央ゲート越流幅，tはピア幅，Wは上流河床高とした．２次元模型を用いた実験では，総流量は電磁流量計，中央ゲート越流量はJIS規格の四角堰で測定し，ダム水位はポイントゲージを用い0.1mm精度で測定した．

表-1 ダム構造諸元

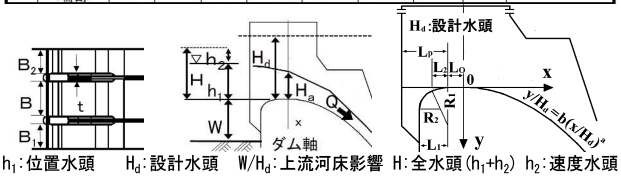
ダム地点	a	b	L_o/H_d	L_1/H_d	L_2/H_d	R_1/H_d	R_2/H_d	L_p/H_d	$B/B_{(A\text{ダム})}$	$t/B_{(A\text{ダム})}$	W/H_d
標準越流頂[4]	1.800	0.500	0.000	0.282	0.175	0.500	0.200	－	－	－	1.50
Aダム	2.000	0.423	0.465	0.155	0.000	0.000	0.155	0.155	1.000	0.333	0.29
Bダム	2.000	0.315	0.154	0.298	0.000	0.000	0.485	0.485	0.750	0.167	0.36-3.67
Cダム	2.000	0.500	0.432	0.040	0.000	0.000	0.040	0.126	1.000	0.292	0.37-0.91
Dダム	2.000	0.558	0.440	0.080	0.000	0.000	0.080	0.160	1.000	0.292	0.12-0.90
Eダム	2.000	0.251	0.118	0.447	0.000	0.000	0.588	0.447	0.750	0.167	0.64
Fダム	2.000	0.514	0.105	0.300	0.000	0.000	0.400	0.450	0.750	0.167	0.00-0.42
Gダム	2.000	0.322	0.094	0.188	0.000	0.000	0.281	0.313	0.631	0.183	0.00-0.28

b) 解析諸元

解析諸元を**表-2**，**図-3**に示す．解析は実機スケール，全ケース完全越流で行った．ゲート種別の中央ゲート，端部ゲートは**図-4**に示すとおりで，中央ゲートは隣接するダム工作物や貯水池の形状に影響されず概ね２次元的な流れだが，端部ゲートは隣接するダム工作物や貯水池の形状に影響された流れとなる．中央ゲート解析はB_1, B, B_2を全開，端部ゲート解析はB_1, Bを全開, B_2を全閉として行った．B_1, B_2は隣接ゲート通過幅, Qは放流量，Q_1は洪水量（ダム下流河川における河道の未整備区間の状況や河川内利用の状況を考慮し河川水が河道内を安全に流下できるとした流量をダム毎に定める），Q_dは設計洪水

表-2 解析諸元

ダム地点		ゲート再現門数（実験，流体解析）			Q/Q_d			Q_1/Q_d	W/H_d	備考
記号	ゲート種別	右岸 B_1/B	中央 B/B	左岸 B_2/B	ケース数 N	最小 MIN	最大 MAX			
標準越流頂		2D解析			11	0.089	0.977	－	1.50	
A	中央	0.500	1.000	0.500	9	0.171	1.521	34%	0.29	
	端部			－	9	0.173	1.442			
B	中央	0.656		0.656	9	0.095	1.142	34%	3.67	
	中央			0.656	9	0.089	1.178		2.57	
	中央			0.656	9	0.086	1.163		1.47	
	端部			－	9	0.088	1.139			
	中央			0.656	9	0.098	1.250		0.36	
	端部			－	9	0.085	1.179			
C	中央	0.500		0.500	10	0.054	1.134	32%	0.91	
	端部			－	10	0.051	1.141			
	中央			0.500	10	0.050	1.129		0.37	
	端部			－	10	0.052	1.111			
D	中央	0.458		0.458	9	0.056	1.163	32%	0.90	
	端部			－	9	0.055	1.156			
	中央			0.458	9	0.055	1.150		0.12	
	端部			－	9	0.055	1.162			
E	中央	0.700		0.700	11	0.154	1.728	46%	0.64	
	端部			－	11	0.152	1.686			
F	中央	0.700		0.700	7	0.147	1.109	46%	0.42	ピア上端面水没データは含まない
	端部			－	7	0.153	1.091			
	中央			0.700	9	0.156	1.378		0.00	
	端部			－	7	0.156	1.076			
G	中央	0.662		0.662	12	0.108	1.183	48%	0.28	
	端部			－	11	0.111	1.111			
	中央			0.662	12	0.117	1.229		0.00	
	端部			－	11	0.117	1.096			



h_1：位置水頭　H_d：設計水頭　W/H_d：上流河床影響　H：全水頭（h_1+h_2）　h_2：速度水頭
H_{ax}：ダム軸水位　Q：放流量　Q_1：洪水量　Q_d：設計洪水量　W：上流河床高

図-3 詳細説明図その１（**表-1, 2**）

図-4　詳細説明図その２（表-1, 2）[8)]

量，h_1はダム水位（越流堤頂基準），h_2はh_1と同一位置での速度水頭，Hは全水頭，H_{ax}はダム軸水位である．

c)解析データ後処理

解析は中央ゲート一門あたり放流量Qが実験と解析で同一となるよう行ったが，B_1, B, B_2の流量配分が実験と解析で若干異なるため，実験のH-Q曲線の傾き$\Delta h_1/\Delta Q$（当該流量・水位と１つ上の流量・水位を用いる）で補正し解析と実験のQを同一にした．

３．ダム放流能力検討結果

(1) データ整理の方法

全水頭Hを用い，ダム越流係数を$C=Q/BH^{3/2}$として整理した．メッシュ解像度の基準の概念について，本研究ではダム軸水位H_{ax}をΔZ_{min}で除して無次元化した値（以降，H_{ax}/Z_{min}という）を導入し，結果を整理した．解析値と実験値の比較は，解析誤差$e=(H_{解析}-H_{実験})/H_{実験}\times100$により評価した．解析誤差e の目安は，JIS規格B8302-2002の四角堰の流量の不確かさ±1.5%以内（以降，計測誤差範囲という）を採用した．

(2) 評価ケースの検討

本稿では評価ケースは，a)ダム形状，b)上流河床影響，c)ゲート条件，d)ゲート幅，　e)ピア幅，f)メッシュ解像度の違い，g)更なるメッシュ解像度向上による解析精度向上の検討の７条件で考察を述べる．

(3) メッシュ解像度の検討（図-5）

以降で記すダム放流能力検討では，後述 f)のとおり解析結果はメッシュ解像度に依存することから，実験の流量精度が確保されるメッシュ解像度（$\Delta X_{min}=\Delta Y_{min}=\Delta Z_{min}=0.2$mもしくは$\Delta Z_{min}=0.1$m, $X_{min}=\Delta Y_{min}=0.2$m）の計算結果を用いて誤差評価を行った．

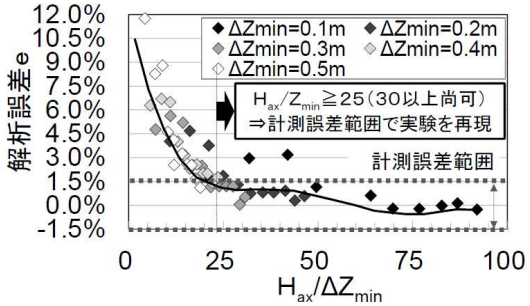


図-5　メッシュ解像度と解析精度の関係

(4) ダム放流能力の検討

a)ダム形状が解析結果に及ぼす影響（図-6）

上記について，標準越流頂形状を含む全ダム（中央ゲート）対象に検討した．上流河床影響無次元数W/H_dは極力近いものを選択した．その結果，標準越流頂形状を含め，　$Q/Q_d\geqq0.5$であれば全ダム計測誤差範囲内でHが再現された．ダム越流係数Cの曲線（以降，Cという）は，水平部を有するA～GダムのCが水平部を持たない標準越流頂形状より全般的に小さくなること，ダム形状に起因したCの曲線形状の違いが再現出来た．なお，E,Fダムでは洪水量未満($Q<Q_1$)（以降，$Q<Q_1$という）で解析誤差が計測誤差範囲を超過する場合があった．

b)上流河床影響が解析結果に及ぼす影響（図-7）

上記についてD, Fダム（中央ゲート）対象に検討した．その結果，$Q/Q_d\geqq0.5$であればいずれのダムでも計測誤差範囲内でHが再現された．また，W/H_dが小さくなるほどCが大きくなる傾向を再現出来た．Dダムでは$Q<Q_1$で解析誤差が計測誤差範囲内，Fダムでは$Q<Q_1$で解析誤差が計測誤差範囲を超過した．

c)ゲート条件が解析結果に及ぼす影響（図-8）

上記についてD, Eダム（中央ゲート）対象に検討し，ゲート条件に関わらず，$Q/Q_d\geqq0.5$であれば，いずれのダムでも計測誤差範囲内でHが再現された．また，端部ゲートでは流量が多くなるほど工作物や貯水池形状に流れが影響され，Cが中央ゲートより小さくなる傾向を再現出来た．なお，Eダムでは$Q<Q_1$で解析誤差eは計測誤差範囲を超過した．

d)ゲート幅が解析結果に及ぼす影響（図-9）

上記について相対的にゲート幅が広いAダムと狭いGダムを対象に検討し，ゲート幅に関わらず，$Q/Q_d\geqq0.5$であれば，いずれのダムでも計測誤差範囲内でHが再現された．また，ゲート幅が小さい程Cが大きくなる傾向を再現出来た．ゲート幅が狭いGダムでは$Q<Q_1$において解析誤差は計測誤差範囲を超過し，ゲート幅が解析精度に影響を及ぼすことが示唆された．

e)ピア幅が解析結果に及ぼす影響（図-10）

上記について$B/B_{(A\text{ダム})}$が一定でtが異なるA, Dダムを対象に検討し，ピア幅に関わらず$Q/Q_d\geqq0.5$であれば，いずれのダムでも計測誤差範囲内でHが再現出来た．また，ピア幅が狭い程Cが大きくなる傾向を再現出来た．

f) メッシュ解像度が解析結果に及ぼす影響（図-11，12）

上記について全ケースを対象に$Q/Q_d\geqq0.5$，$Q/Q_d<0.5$の２つの場合に分けて検討した．図-11，12よりQ/Q_dおよび$H_{ax}/\Delta Z_{min}$大きくなるほど，解析誤差eが小さくなる傾向を示し，設計洪水量を超過する$Q/Q_d\geqq1$の領域ではダム地点に係らず計測誤差範囲で解析出来たことが分かる．そこでQ/Q_dの大小で解析誤差がどのように変化するか考察することとした．図-11に$Q/Q_d\geqq0.5$の場合，図-12に$Q/Q_d<0.5$の場合の解析誤差を示す．$Q/Q_d\geqq0.5$であれば，　$H_{ax}/\Delta Z_{min}$が30未満であっても計測誤差範囲に収まっているが，　$Q/Q_d<0.5$の場合は全体的に解析誤差

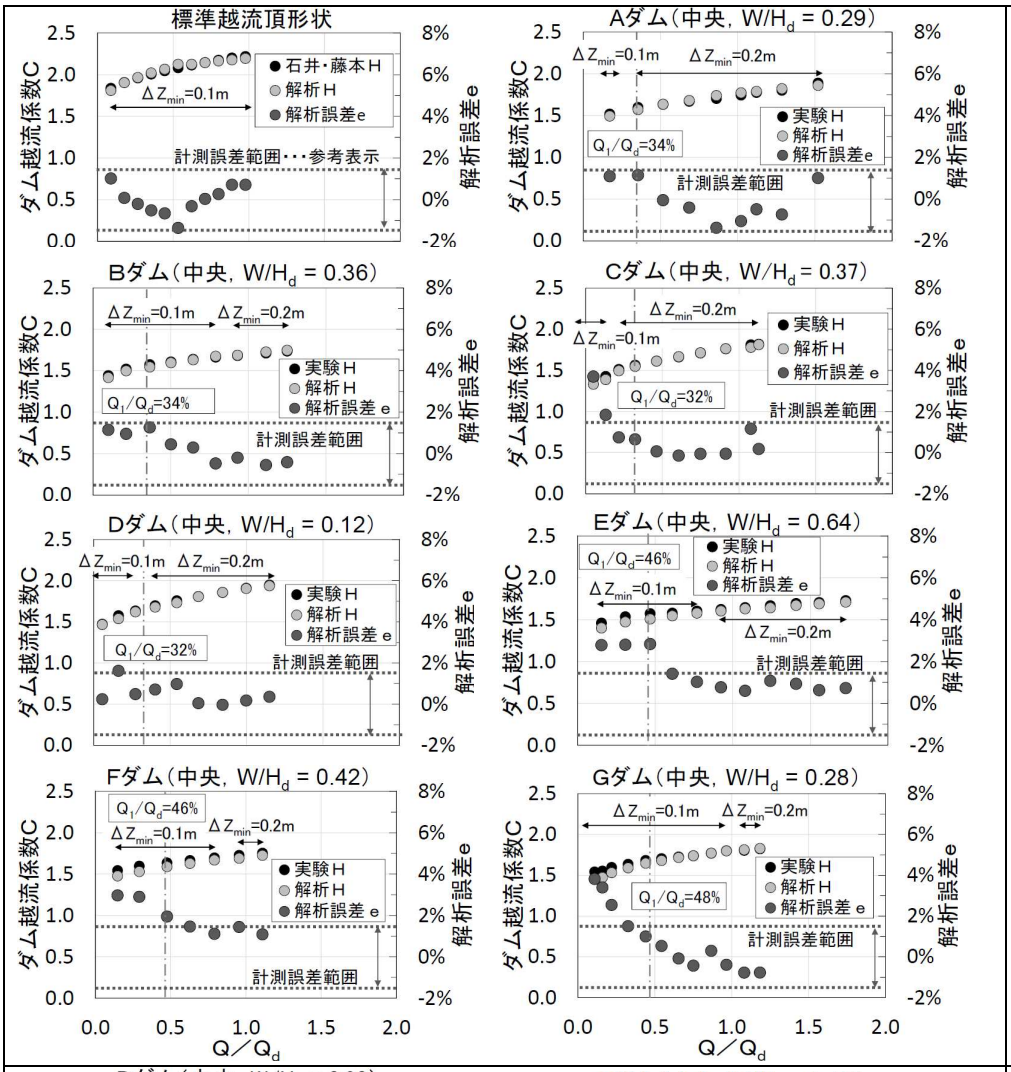


図-6　ダム形状と解析誤差の関係

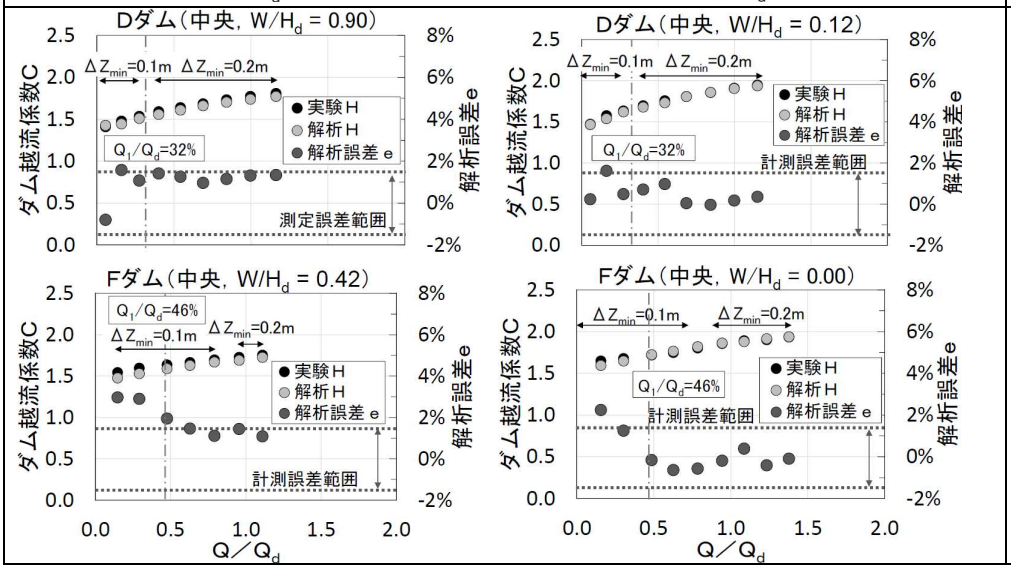


図-7　上流河床影響と解析誤差の関係

eのばらつきが大きく，一部データの解析誤差が測定誤差範囲を大きく超過し5%を超えるものもある．原因として一部ダムでΔZ_{min}が全流量0.2mで行っていることもあげられる．一方，$H_{ax}/\Delta Z_{min}$が25以上であれば計測誤差の2倍程度に収まり，$H_{ax}/\Delta Z_{min}$が50程度もしくはそれ以上であれば，全データが計測誤差範囲に収まった．以上から$Q/Q_d<0.5$の場合，$H_{ax}/\Delta Z_{min}$を50程度確保すれば解析精度向上が可能と示唆された．なお，$Q/Q_d<0.5$のHの実験との差分は最大で0.2m程度だが実験より高い水位で評価しており，ダム管理上安全側の評価となっている．

g) メッシュ解像度向上による解析精度向上検討（図-13）

以上の結果から，低流量時の差分も最大0.2m程度でその程度の流量であれば上流背水影響でH.W.L.を超えないことから，ダム管理に資するには十分な精度と考えられ

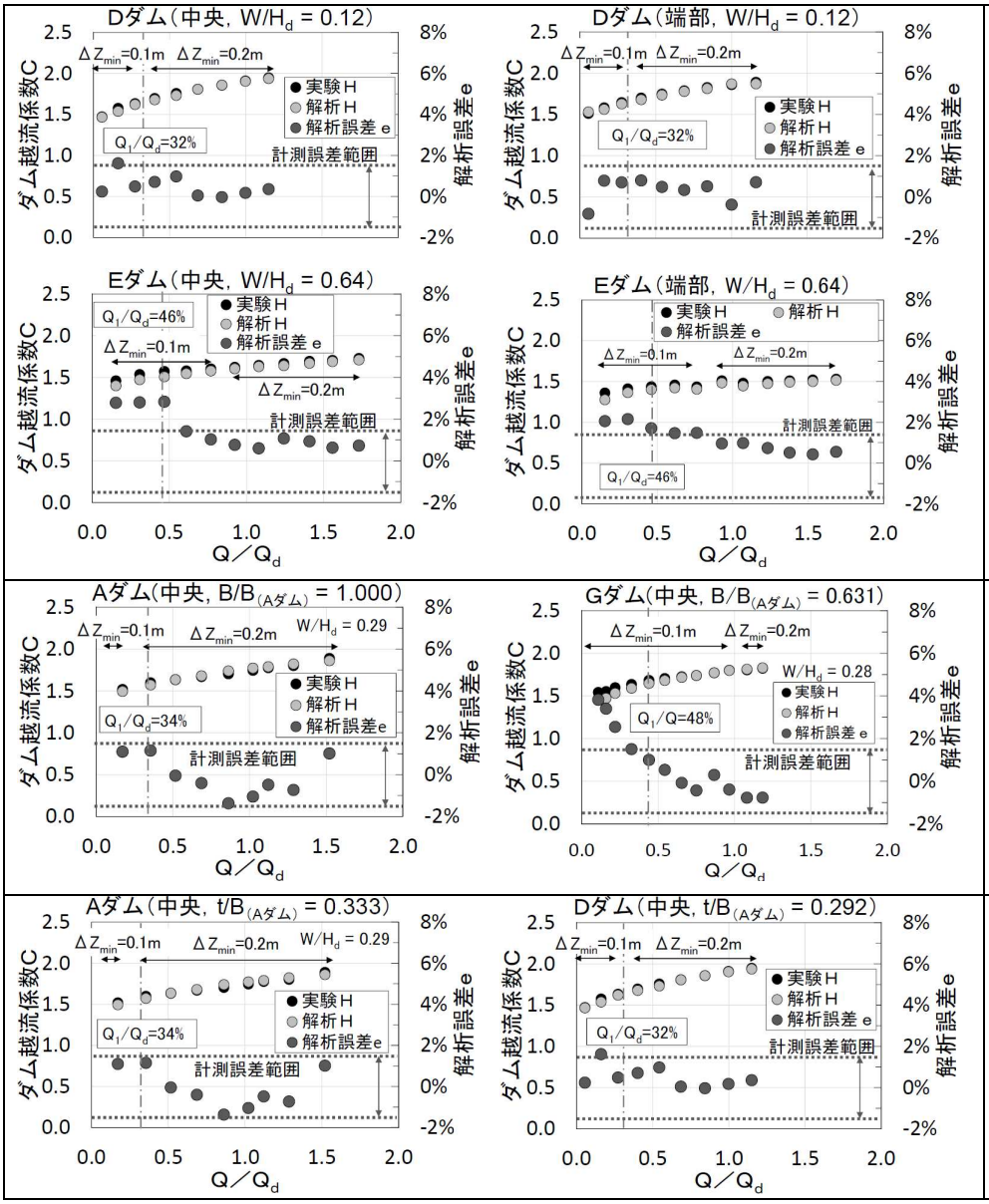


図-8 ゲート条件と解析誤差の関係

図-9 ゲート幅と解析誤差の関係

図-10 ピア幅と解析誤差の関係

る．ただし，ダム管理上更なる精度が要求される場合も有り得ることから，Q/Q_d<0.5における更なる精度向上の検討を低流量時の解析誤差が比較的大きいE，Gダム（中央ゲート）を対象に行った．メッシュ解像度は$H_{ax}/\Delta Z_{min}$≧50を目標（Gダム一部流量：$H_{ax}/\Delta Z_{min}$≧30程度）とし，複合円パラメーター（R_2等）やダムピアのメッシュ解像度向上のため$\Delta X_{min}= Y_{min}= \Delta Z_{min}$= 0.05mを確保した．

その結果，Q/Q_d<0.5においてΔZ_{min}= 0.1mの場合と比較して大幅に解析精度が向上し，無次元流量Q/Q_dがごく小さい場合を除き計測誤差近傍まで解析可能であることが確認出来た．ただし，$\Delta X_{min}=\Delta Y_{min}=\Delta Z_{min}$=0.05mとした場合の解析時間は，$\Delta Z_{min}$=0.1m（$\Delta X_{min}=\Delta Y_{min}$=0.2m）の場合と比較し，約5倍（1週間／流量）程度となった．

4．おわりに

以上から，得られた成果を以下に記す．

(1) 上向き流入条件とし整流板4枚（透過率78%）を流入直下で発生するはく離再付着位置の下流に配置することで，水路横断方向の流速分布が均一になった．

(2) 実験の流量精度が確保されるメッシュ解像度（$\Delta X_{min}=\Delta Y_{min}=\Delta Z_{min}$=0.2m もしくは ΔZ_{min}=0.1m，$X_{min}=\Delta Y_{min}$= 0.2m）を与え，$\Delta H_{ax}/\Delta Z_{min}$≧30を目指したことで，全ダム地点で解析精度を概ね計測誤差内を収めることが出来た．

(3) 標準越流頂を含め既存実験のダム流れ解析の結果，ダム形状，上流河床影響（満砂除く），ゲート条件，ゲート幅およびピア幅の違いに応じたダム越流係数Cが再現可能で解析精度も概ね計測誤差範囲となった．ただし，ゲート幅は解析精度に影響を与えることが示唆された．

(4) 複合円パラメーター（R2等）やダムピアのメッシュ解像度向上の為，$\Delta X_{min}=Y_{min}=\Delta Z_{min}$=0.05mを確保した結果，$Q/Q_d$<0.5において計測誤差近傍まで解析可能であった．

(5) (1)～(4)を総括すると，今般開発の算定技術は２次元模型を３次元流体解析で再現するもので，３次元模型をそのまま再現するよりも時間とコストに利点を有し，

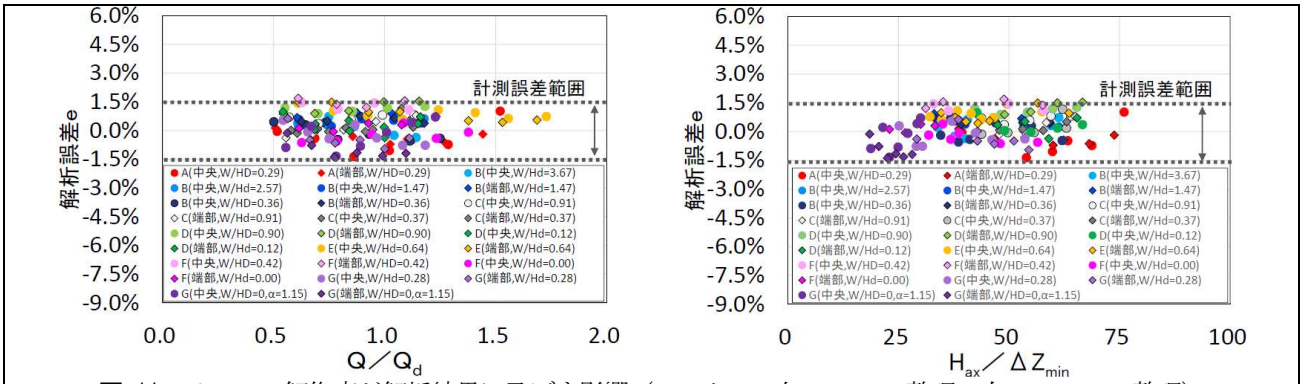


図-11　メッシュ解像度が解析結果に及ぼす影響（Q/ Q_d≧0.5 左：Q/ Q_dで整理，右：H_{ax}/Z_{min}で整理）

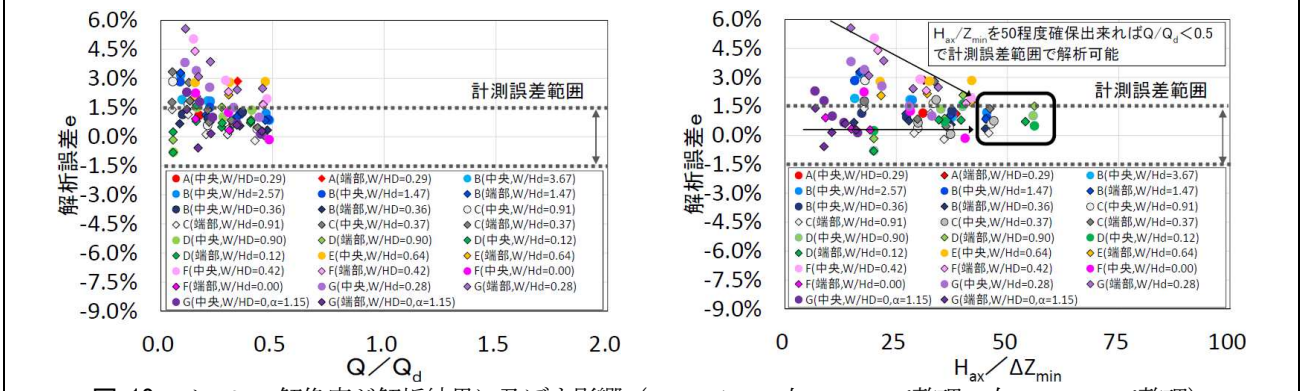


図-12　メッシュ解像度が解析結果に及ぼす影響（Q/ Q_d＜0.5　左：Q/ Q_dで整理，右：H_{ax}/Z_{min}で整理）

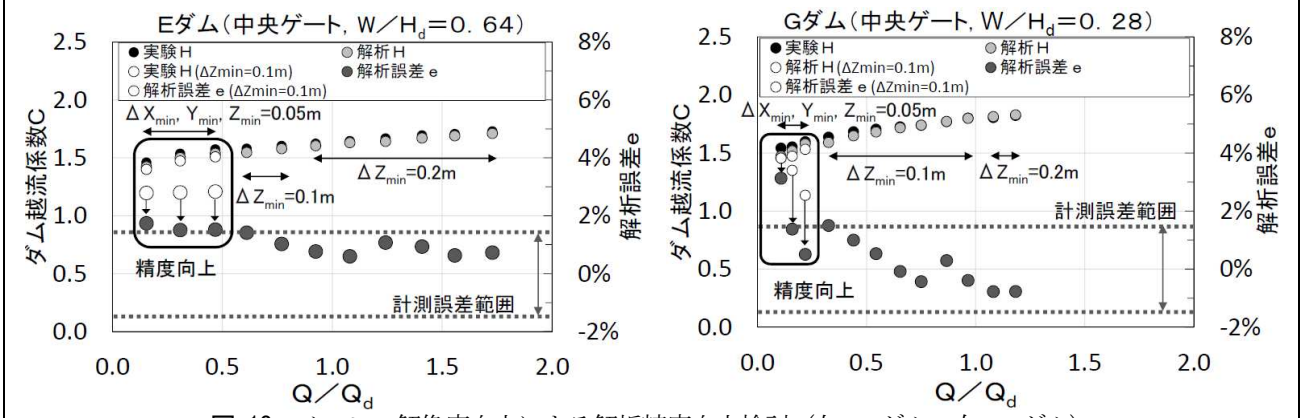


図-13　メッシュ解像度向上による解析精度向上検討（左：Eダム，右：Gダム）

実験で培った技術の援用が可能である．このため，費用対効果が大きく特に設計洪水流量以上において２次元模型による水理模型実験の代替が可能と考える．

今後は，気象激甚化に伴うダム設計洪水量を超過する様な洪水現象検証，ダム堆砂進行に伴うダム越流係数再検証および精度検証が不十分なダム放流能力検討等へ本研究成果の適用が考えられる．

謝辞：本論分執筆にあたって佐藤隆宏氏（（一財）電力中央研究所 地球工学研究所 流体科学領域）から多大なる助言を頂いた．ここに記し，深く感謝致します．

参考文献

1) 佐藤隆宏他，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，水工学論文集，第52巻, pp.793-798, 2008.
2) http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/pdf/shinsuisoutei_honnbun_1507.pdf
3) 是枝忍：低いダムにおけるゲート流出時の流量係数，発電水力，No.117, pp.32-66, 1972.
4) Hirt, C. W. and B. D. Nichols: Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries, J. Comp. Phys., Vol.39, pp. 201-225, 1981.
5) 功刀資彰：自由界面を含む多相流の直接数値解析法，機械学会論文集B編，第63巻，第609号，pp.1576-1584，1997.
6) 田中伸和，電力土木技術者のための数値流体解析講座(第 1 回)数値流体解析の概説，電力土木，No.367，pp.97-100, 2013.
7) 水理公式集，平成11年度版，土木学会，pp.241-253, 1999.
8) http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranA/All.cgi?db4=0297

（2018. 4. 3受付）