

PKW(Piano Key Weirs)の国内適用へ向けた 水理特性に関する分析と今後の課題

ANALYSIS OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS AND
FUTURE ISSUES OF PKW (PIANO KEY WEIRS)
APPLICATION TO JAPANESE DAMS

(国研)土木研究所 河道保全研究グループ

○水工チーム 竹崎 奏詠
水工チーム 高田 翔也
水工チーム 水草 浩一

目次

【背景・目的】

- ・ ダム再生，ダムセイフティーに係る課題とその対応策の一例
- ・ PKWとは？
- ・ LWとPKWの構造面における違い
- ・ 本研究の目的

【ピアノキー型越流堰（PKW）の研究レビュー】

- ・ PKW上の流況
- ・ PKWの流量係数に影響するパラメータ
- ・ PKW上の水理量
- ・ 流量係数の推定式
- ・ 流量係数推定式の精度検証
- ・ 推定式の適用性に関する考察

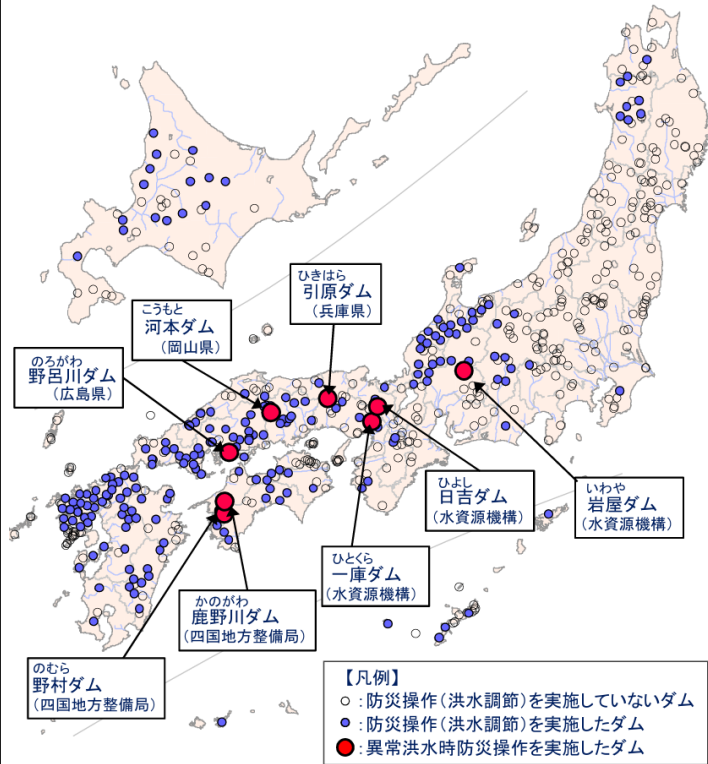
【PKWの課題整理】

- ・ 国内適用へ向けた課題整理

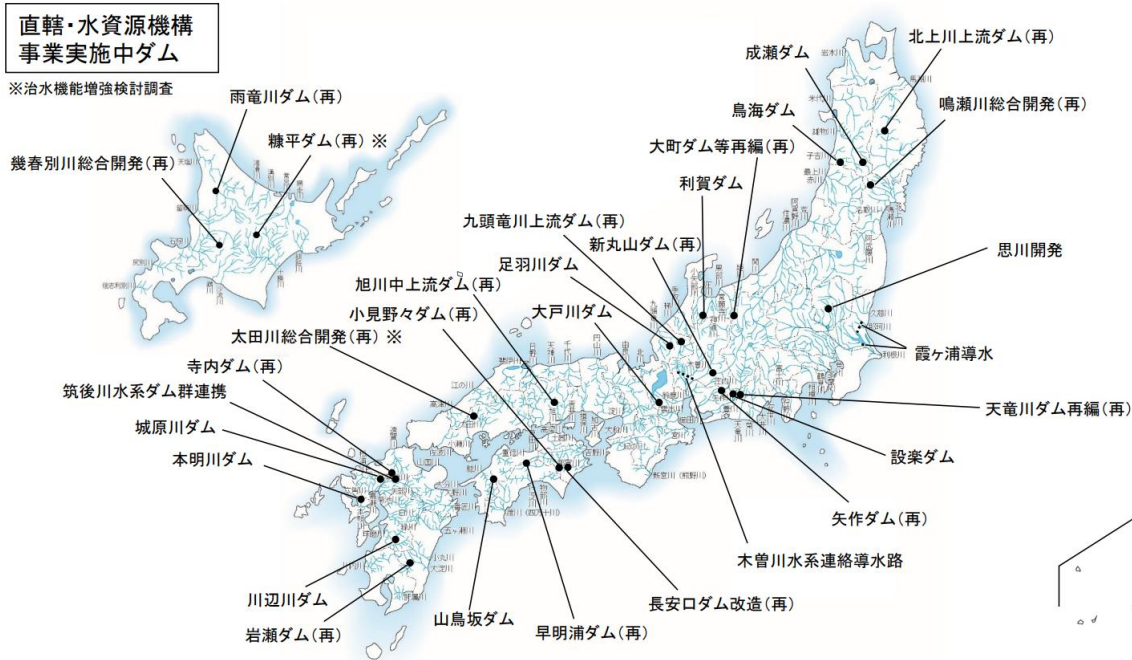
背景

- 背景①（洪水調節機能の観点）：異常洪水時防災操作を実施するダムが毎年のように見られている⇒洪水調節容量の不足が懸念
- 背景②（Dam safetyの観点）：気候変動の影響による更なる外力増の懸念⇒設計規模を超える超過洪水への備えも益々重要

H30.8洪水（MLIT）
洪水調節を実施した213ダムのうち8ダムにおいて異常洪水時防災操作に移行



直轄・水資源機構
事業実施中のダム（MLIT）
（再：ダム再生実施中のダム）



- ダム再生事業内容：
- ①既設ダムのかさ上げ
 - ②放流管の増設（放流能力の増強）
 - ③堆砂対策
 - ④事前放流

放流能力増加策(ラビリンスLW形状)

● 平面形状がジグザグ (※ラビリンス：迷路)
⇒ 越流頂長を長くすることで放流能力増大が期待できる



Dog River Dam
(米国)

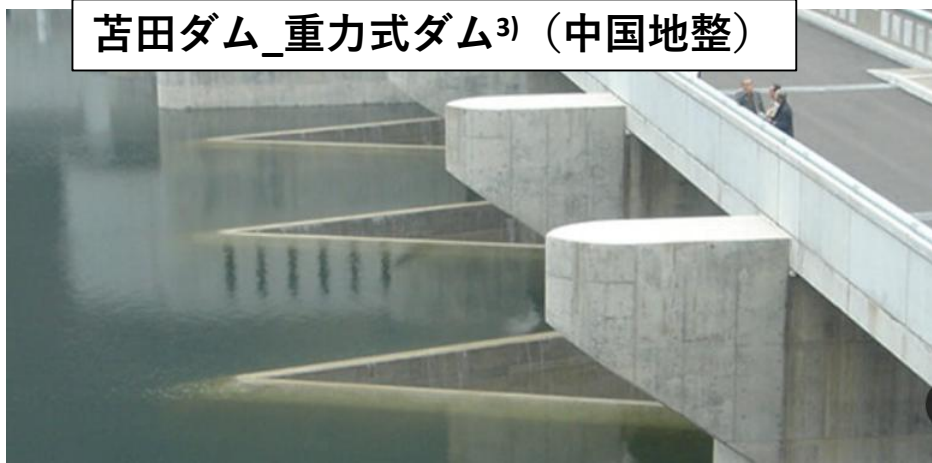


河道堰としての適用事例

※我が国においても適用事例多数



千五沢ダム_アースダム²⁾ (福島県)



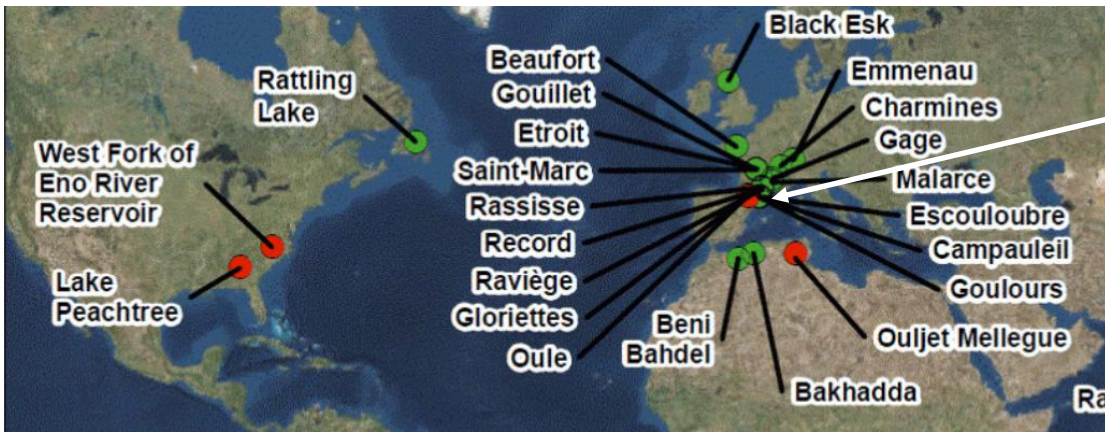
苦田ダム_重力式ダム³⁾ (中国地整)

- 1. 放流能力の**増強** (主に既設ダム) : 設計洪水位を上昇させることなく非常用洪水吐きの放流能力を高めることができる
- 2. 洪水調節容量の**増加** (主に既設ダム) : より小さい越流水深でダム設計洪水流量を放流可能なため、サーチャージ水位を引き上げることが可能となる
- 3. ダム高の**低減** (主に新設ダム) : 設計洪水位を低下させダム高の低減が可能になる
- 4. ゲート操作の**不要化** : ゲートレスであるためゲート操作が不要である
- 5. コスト**縮減** : ゲートが不要となる点や、高い放流能力を有するため常用洪水吐きの数を減らせコスト縮減に繋がる可能性がある

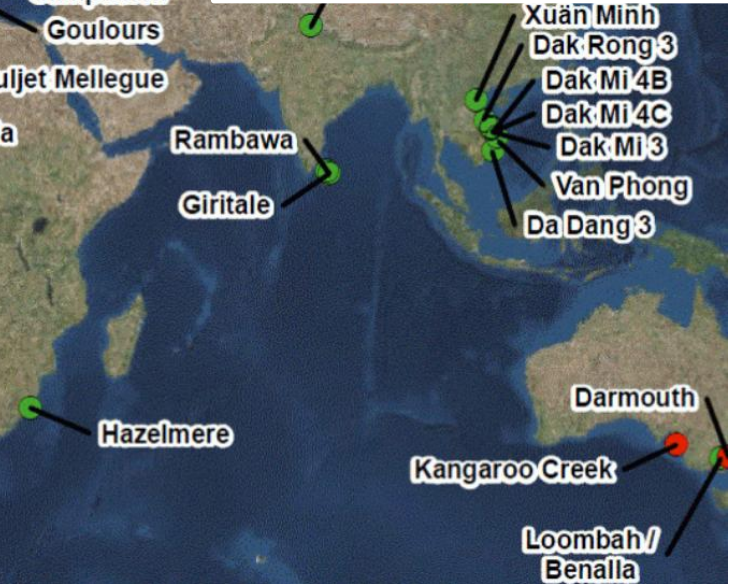
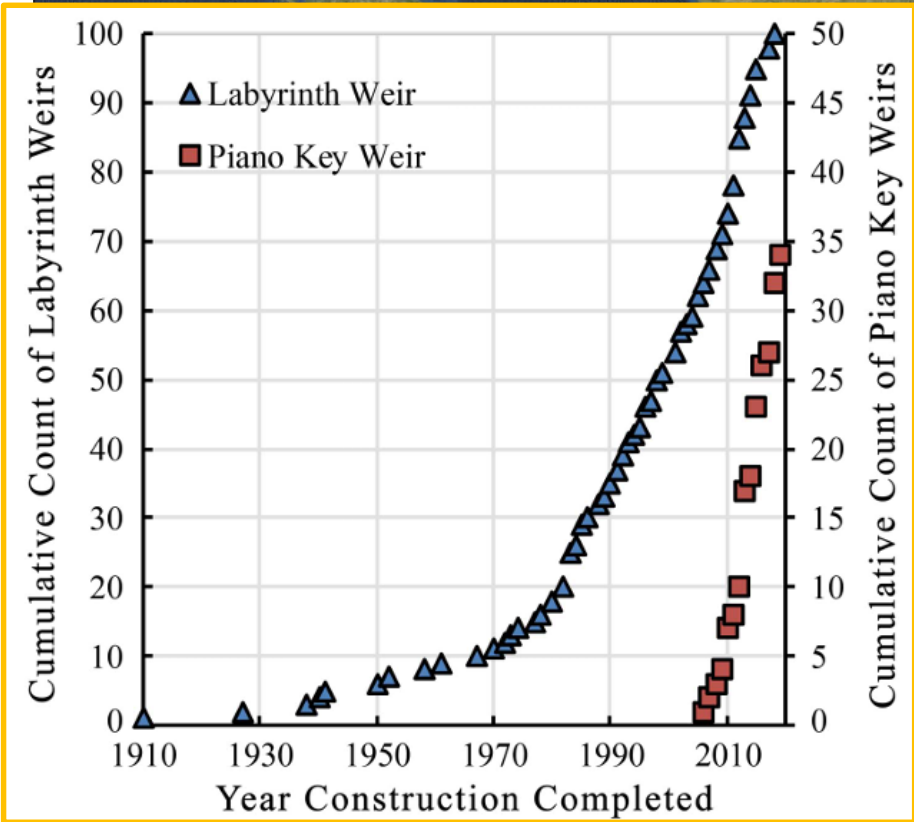
1) Jaretha Lombaard : Evaluation of the Influence of Aeration on the Discharge Capacity and Flow Induced Vibrations of Piano Key Weir Spillways, degree of Masters of Engineering in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University, 2020
2) 千五沢ダム改築 | 施工実績 | 清水建設, 2025.4閲覧
3) 苦田ダム | インフラツーリズム ポータルサイト-国土交通省総合政策局, 2025.4閲覧

新たな放流能力増加策¹⁾(ピアノキー型越流堰 (PKW))

OPKW：ラビリンズ堰の改良型



Gouloursダム
(フランス)



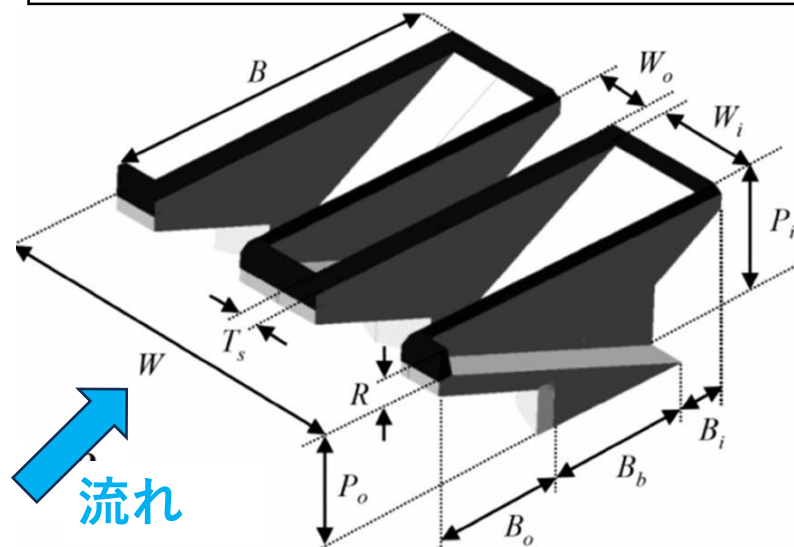
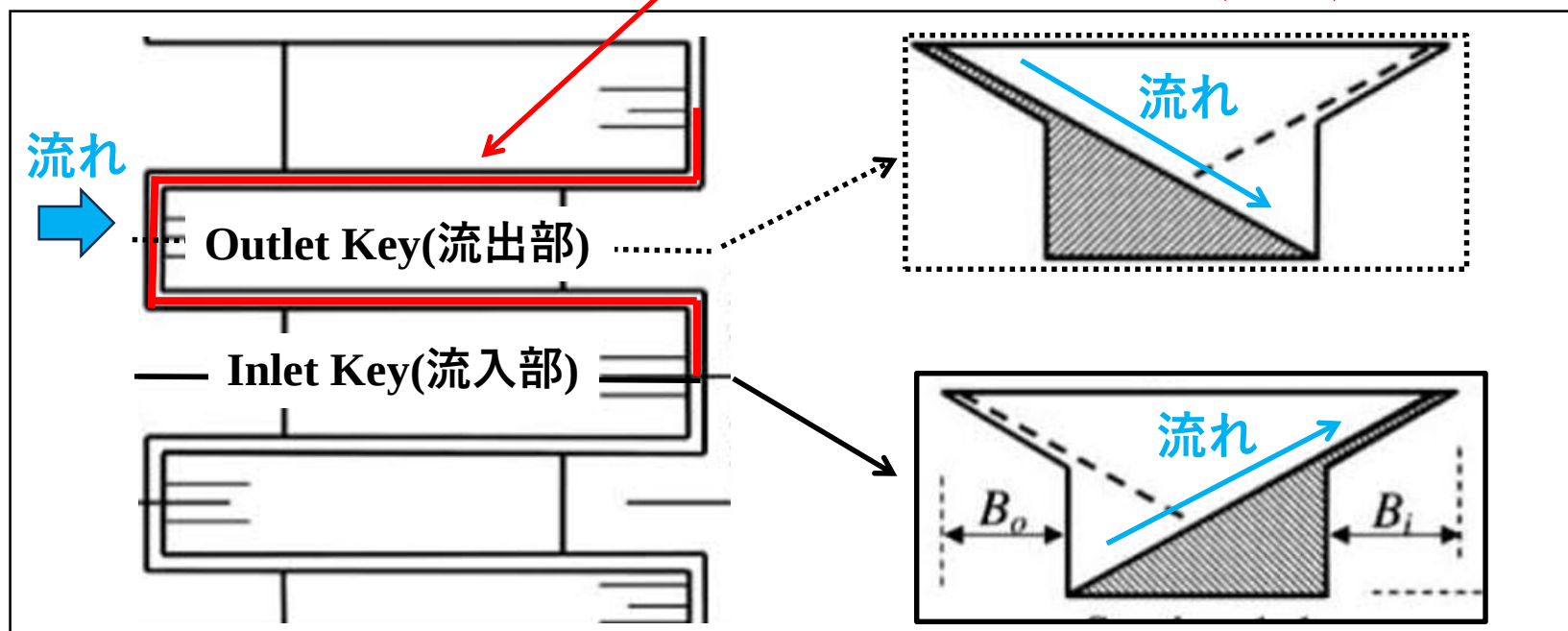
- 1. 海外では放流能力の増強を主目的にPKWが採用されるケースがある
- 2. 34事例が建設済み
- 3. 堰への適用事例も見られる
- 4. 日本への適用実績はゼロ

1)World Register of Piano Key weirs prototypes : https://www.uee.uliege.be/cms/c_5026433/en/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes

PKW (Piano Key Weirs) とは

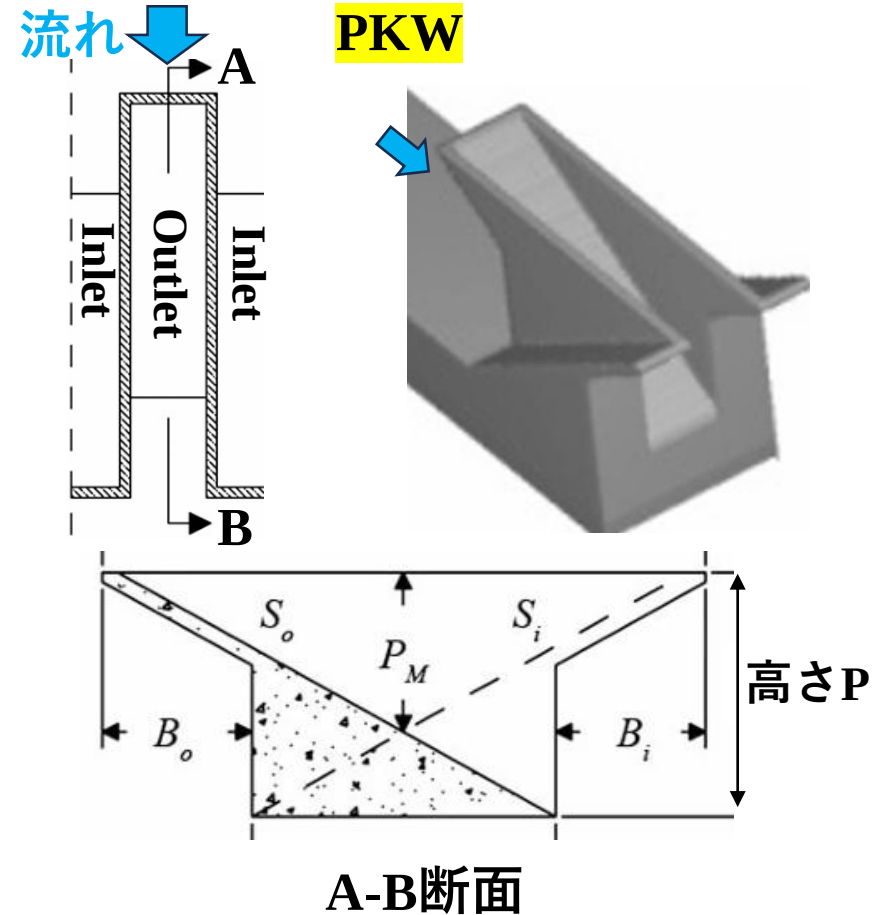
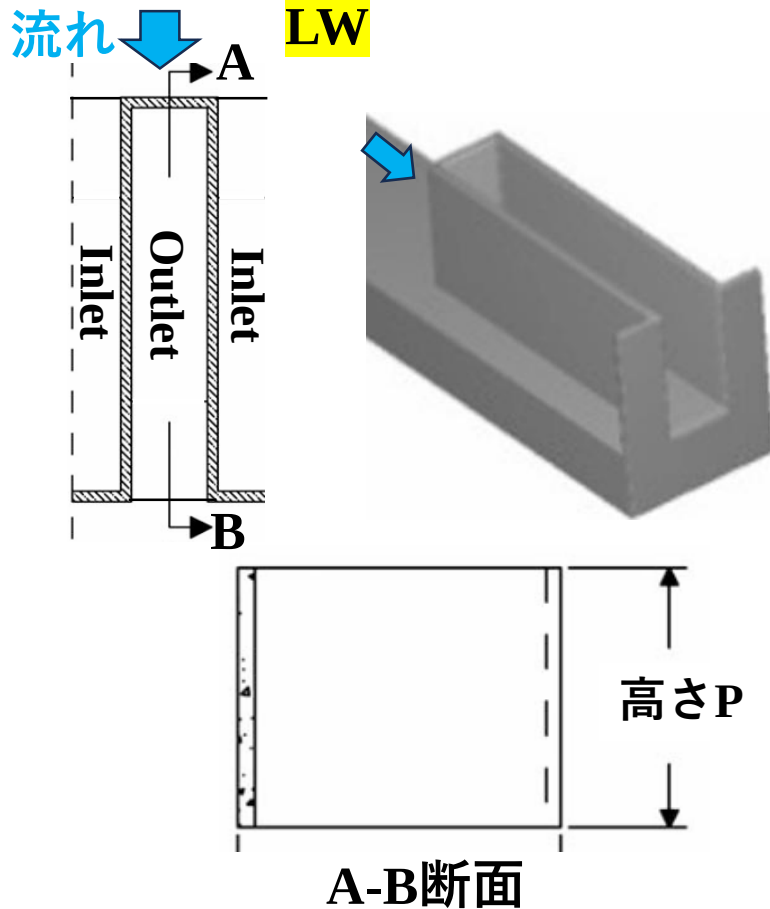
OPKWは2003年にLempérièreら¹⁾によって正式に提案されたラビリンス型越流堰の改良型越流堰

PKWの基本ユニット (赤線)



1. 流入部のInlet key(Inlet), 流出部のOutlet key(Outlet), Sidewall (側壁) からなる
2. 越流頂の平面形状が屈曲 (ピアノキーの形状)
3. 越流頂が上下流方向に張り出している
4. InletとOutletの床面に勾配がついている

LW（左）と一般的なPKW（右）の構造面における大きな違いは主に2点ある



●LWに比べた一般的なPKWの構造面の違い

違い①：上下流方向への張り出し

⇒設置面積が**小さい**

⇒小さいダムに対しても越流頂に設置可能

違い②：勾配を持つInlet及びOutletの床面

・ Inlet内の逆勾配：(貯水池への張り出しによることに加え)流入損失を**低減**

・ Outlet内の順勾配：流速を増加させOutlet内の水位上昇を**低減**

必要なコン
クリート量
がLWに比
べ少ない

水理学的に
もLWに比べ
優れている

本研究の目的・実施内容

国内ダム等（ダム，堰，遊水池等）へのPKWの適用を念頭に（より具体的には**水理面での当初設計を可能とすることを目的**として）以下の5点を検討した

- ① PKWの概要とその水理特性の整理
- ② （設計時の概略検討で必要となる）PKWの構造諸元等と流量係数の関係
- ③ 数多存在する既存の流量係数（放流能力）推定式の適用範囲を含めた整理
- ④ PKW建設検討時の水理模型実験で得られた実験データを対象に，流量係数推定式の推定精度を把握し、それらの推定式の適用性について検討
- ⑤ 国内のダム等へPKWを適用する際の留意事項や課題の提示

目次

【背景・目的】

- ・ ダム再生，ダムセーフティーに係る課題とその対応策の一例
- ・ PKWとは？
- ・ LWとPKWの構造面における違い
- ・ 本研究の目的

【ピアノキー型越流堰（PKW）の研究レビュー】

- ・ PKW上の流況
- ・ PKWの流量係数に影響するパラメータ
- ・ PKW上の水理量
- ・ 流量係数の推定式
- ・ 流量係数推定式の精度検証
- ・ 推定式の適用性に関する考察

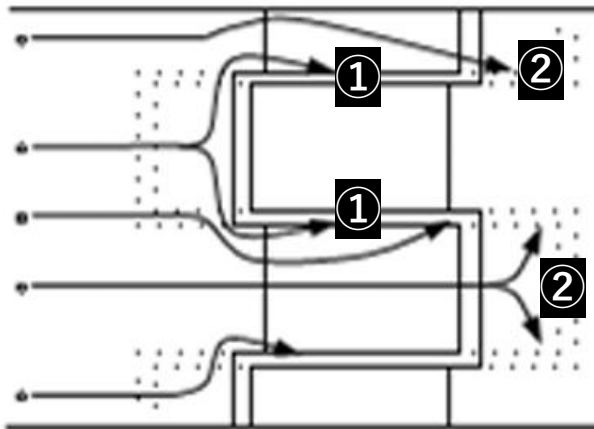
【PKWの課題整理】

- ・ 国内適用へ向けた課題整理

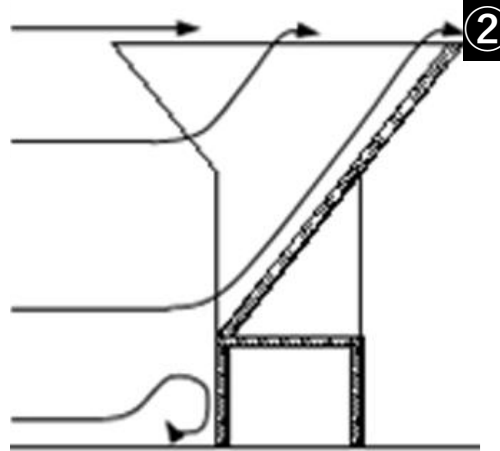
PKW上の流れ①¹⁾

- ① Inlet内へ流入しInletからOutletへ横越流する流れ
- ② Inlet内へ流入しInlet下流端を越流する流れ
- ③ Outlet上流端を越流する流れ
- ④ Outlet内を下流に向かう流れ

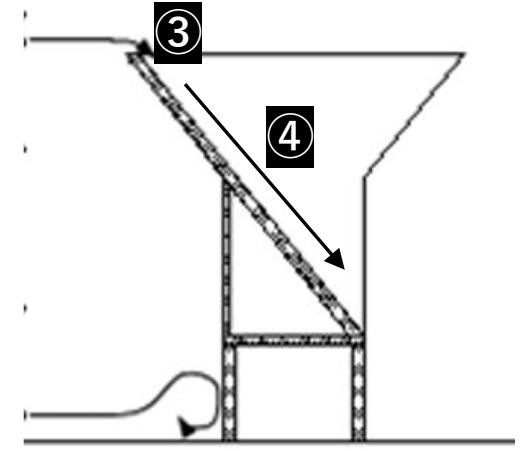
平面図：平面流れ



断面図：Inlet内の流れ



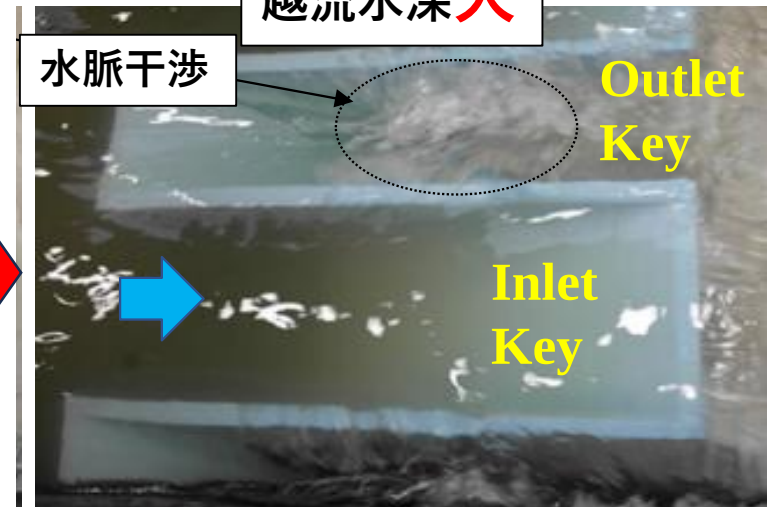
断面図：Outlet内の流れ



越流水深小

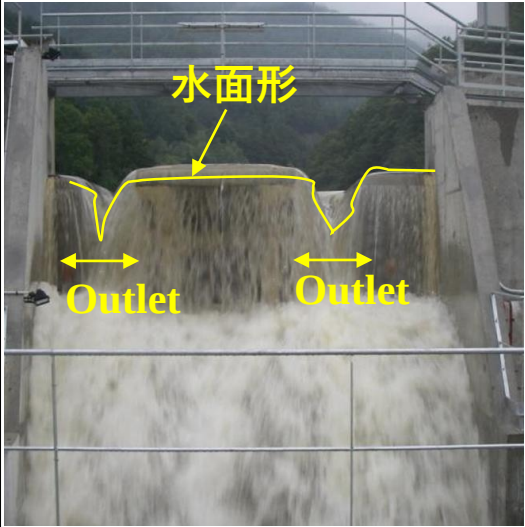
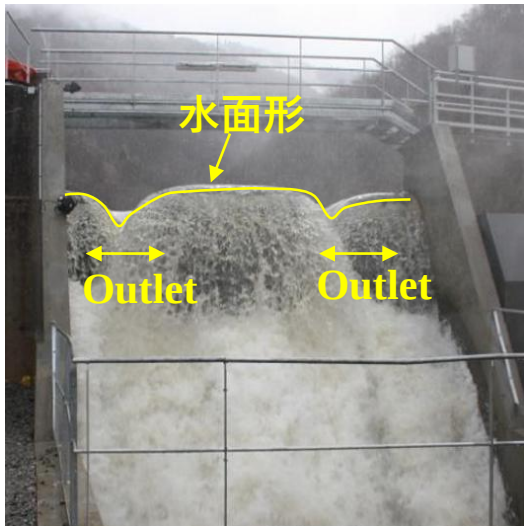
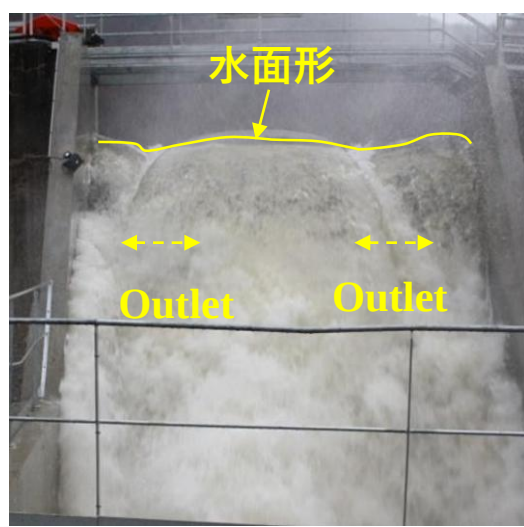
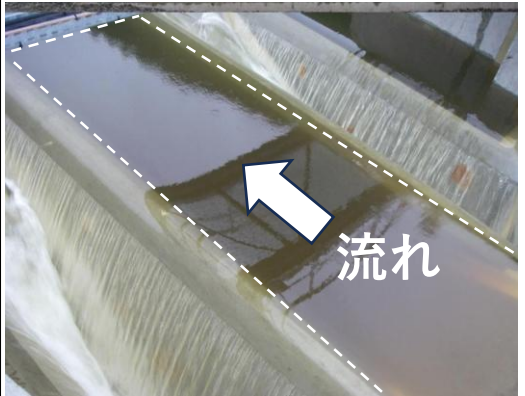


越流水深大



1) Jaretha Lombaard : Evaluation of the Influence of Aeration on the Discharge Capacity and Flow Induced Vibrations of Piano Key Weir Spillways, degree of Masters of Engineering in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University, 2020.

PKW上の流れ② (屋外実験¹⁾inフランス)

	1.2m ³ /s	5.0m ³ /s	10.0m ³ /s 流量
下流側から見た流れ			
Inlet からOutlet へ向かう流れ			

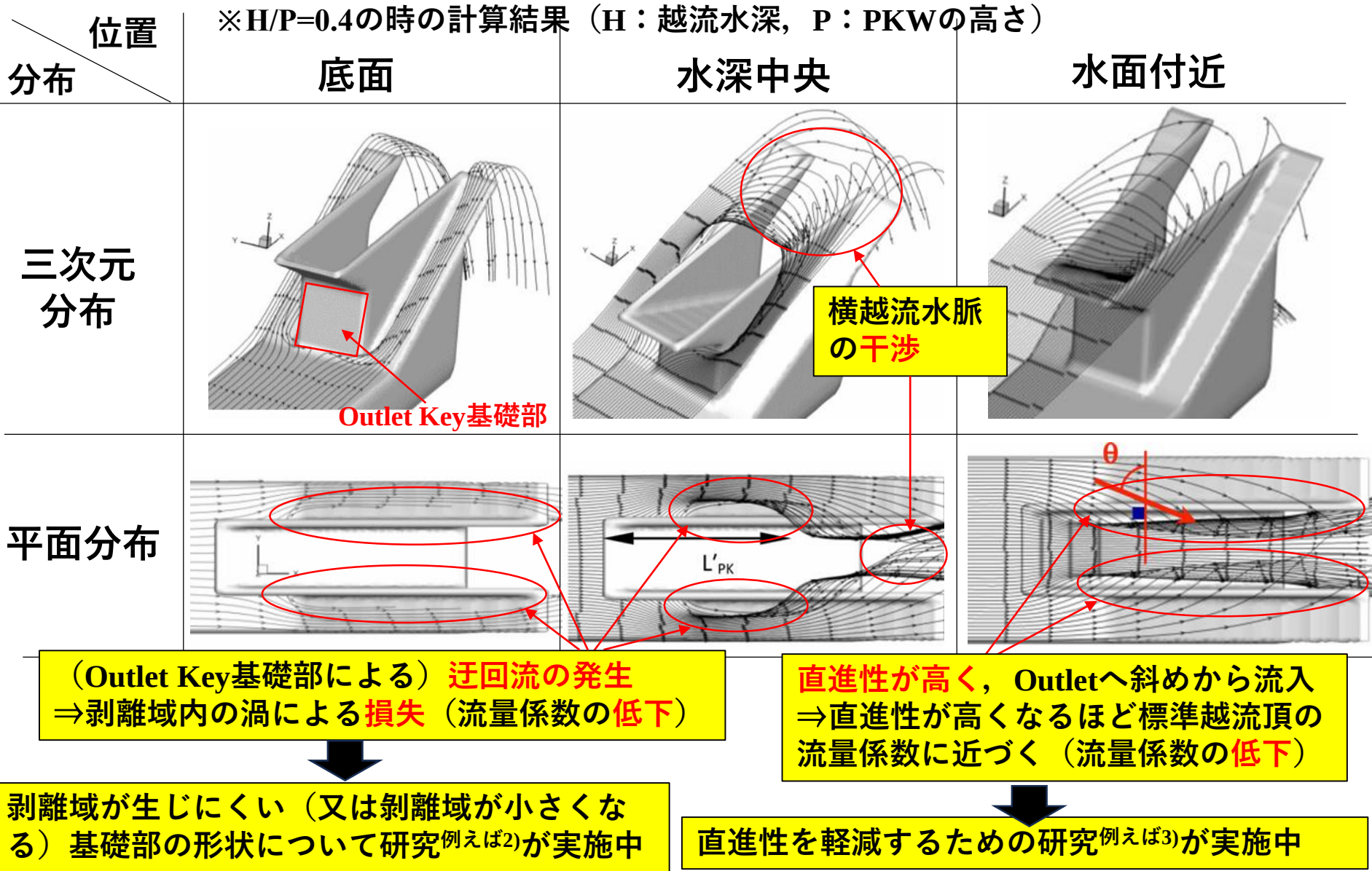
流量が大きくなるほどOutlet内の水位が高くなっている

⇒InletからOutletへの流れがもぐり流れとなり、その影響がInletまで及ぶ場合には横越流量が減少すると推定される

⇒もぐり流れの発生区間分、越流頂長が(見かけ上)短くなり流量係数の低下を招く可能性がある

PKW上の流れ③（流線分布の数値計算結果¹⁾）

※H/P=0.4の時の計算結果（H：越流水深，P：PKWの高さ）



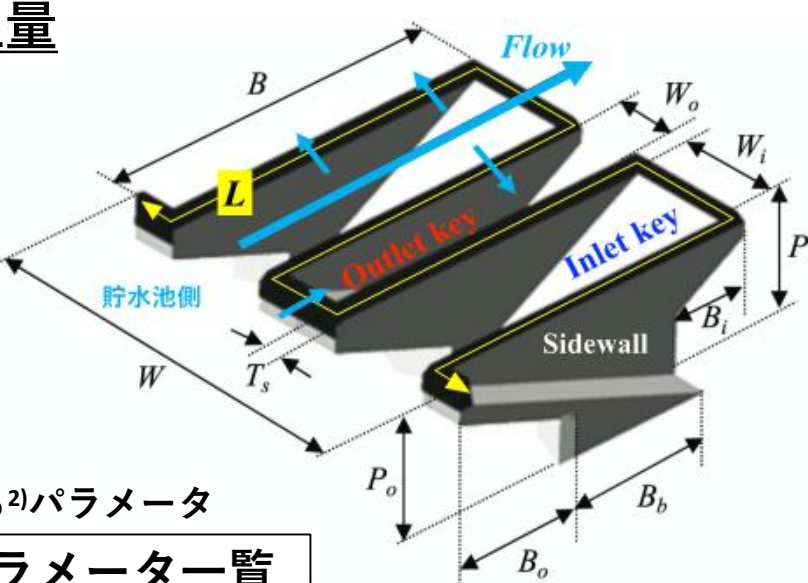
1) Safarzadeh, A., & Noroozi, B. (2017). 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways. International Journal of Civil Engineering, 15(1), 89-101

2) Ali Ehsanifar , Masoud Ghodsian:Experimental and Numerical Study of Piano Key Weir with Upstream Nose and Semicircular Crest at the Outlet、 Iranian Hydraulic Association Journal of Hydraulics、 15 (2), 2020.

3) Aghashirmohammadi G,Heidarnejad M, Purmohammadi MH,Masjedi A. Experimental and numerical study the effect of flow splitters on trapezoidal and triangular labyrinth weirs. Water Science. 2023;37(1):28-39.DOI: 10.1080/23570008.2023.2210391

PKWの流量係数に大きく影響する構造・水理量

- PKWの流量係数に影響するパラメータ（構造・水理量）は30¹⁾以上も存在する
- それらの影響度はパラメータによって異なる



※1)～3)は流量係数に特に大きな影響を及ぼすと考えられている²⁾パラメータ

流量係数に大きく影響するパラメータ一覧

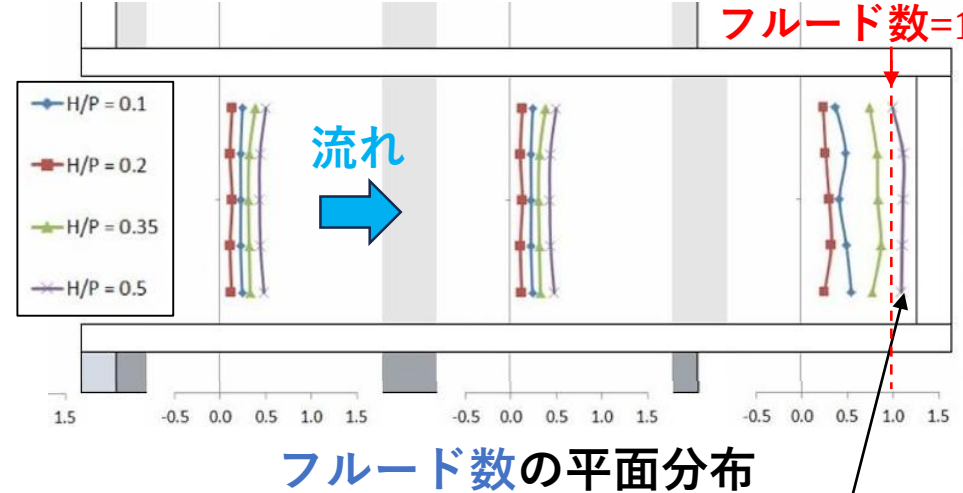
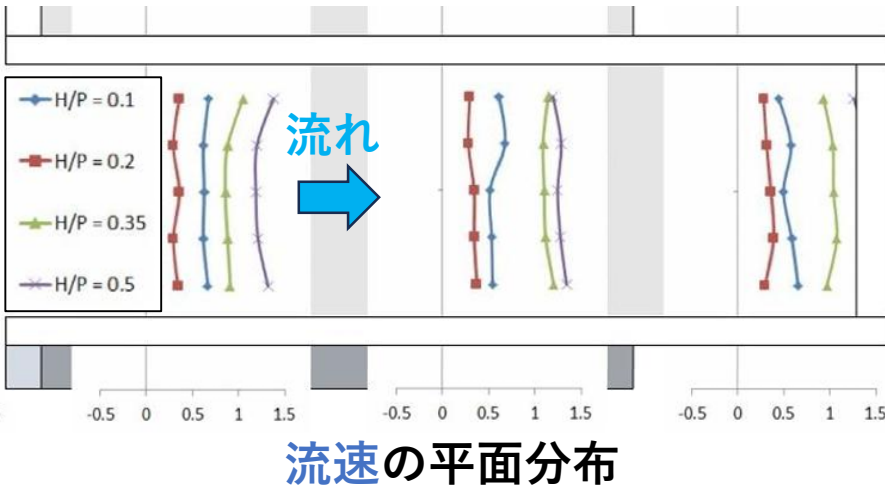
- 1) **越流頂長 L** ：一般的に、越流頂幅 W を基準とした越流頂の長さの増加率 L/W として整理され、基本的に、 L/W が大きくなるほど流量係数は大きくなる
- 2) **越流水深 H （流速 V ）**：越流水深（流速）が大きくなるほど、エネルギー損失や支配断面位置の上流移動に繋がり流量係数が低下する
- 3) **PKWの高さ P** ：PKWの流れの損失やInlet及びOutlet内の勾配の変化に繋がり流量係数に影響する。（ H/P として整理されることが多い）
- 4) **Inlet及びOutlet幅 W_i , W_o** ： W_i / W_o として整理され、 W_i が大きいほどInlet内の損失が低下する²⁾。一方、この時 W_o は相対的に小さくなり前章で述べた水脈の干渉等が生じやすくなる。そのため、流量係数の観点では W_i と W_o のバランスが重要（ $W_i / W_o = 1.25$ 程度が提案されている²⁾）
- 5) **Inlet及びOutletの張り出し長 B_i , B_o** ：例えば、 B_o の増加はOutlet床面の勾配の減少に繋がり、（InletからOutletへの）もぐり越流の発生リスクを高めることに繋がる

Inletの流が流量係数に与える影響（実験結果¹⁾）

流速（左図）とフルード数（右図）の平面分布

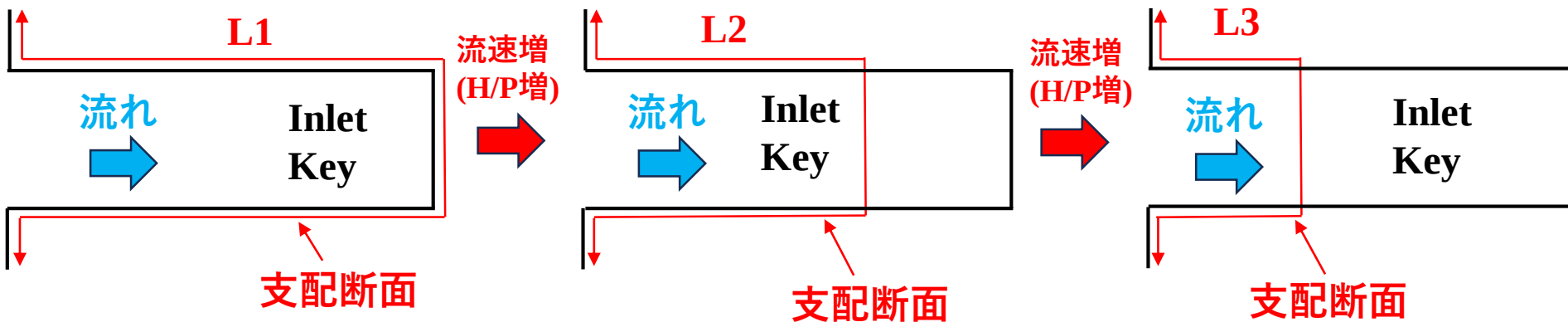
※流速は表面流速を表している

フルード数=1



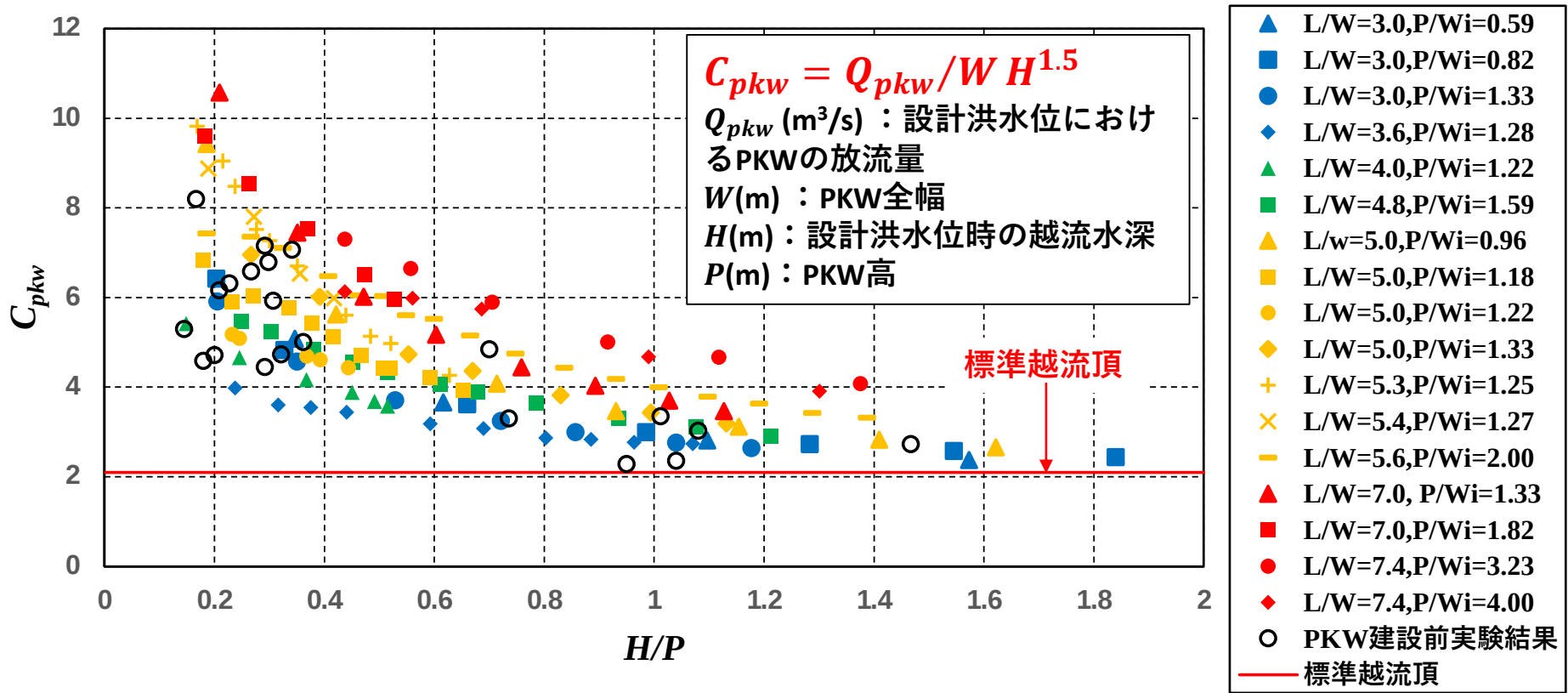
☆PKW 1 ユニットの越流頂長の比較：L1>L2>L3

フルード数が1を超えている
⇒支配断面が上流側へ移動



越流水深（流速）が大きくなると支配断面が上流側へ移動する場合がある
⇒(支配断面が上流側へ移動すると)越流頂長が見かけ上短くなり流量係数が低下する

L/W を第3パラメータとした H/P と流量係数 C_{pkw} の関係¹⁾²⁾³⁾



- 1. H/P が大きくなるほど流量係数が低下し、その影響は L/W が大きいほど大きくなる
- 2. $H/P \geq 1.5$ 程度で標準越流頂と同程度の流量係数となる
- 3. ある流量係数に対し、それを満たすパラメータ (H/P , L/W) の組み合わせが複数存在する (⇒所定の流量係数を満たす構造が複数存在する)

1) Leite Ribeiro, M., Bieri, M., Boillat, J.L., Schleiss, A.J., Singhal, G., Sharma, N., : Discharge capacity of piano key weir. J. Hydraul. Eng. ASCE 138(2), 199–203, 2012.

2) World Register of Piano Key weirs prototypes : https://www.uee.uliege.be/cms/c_5026433/en/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes (2025年2月閲覧)

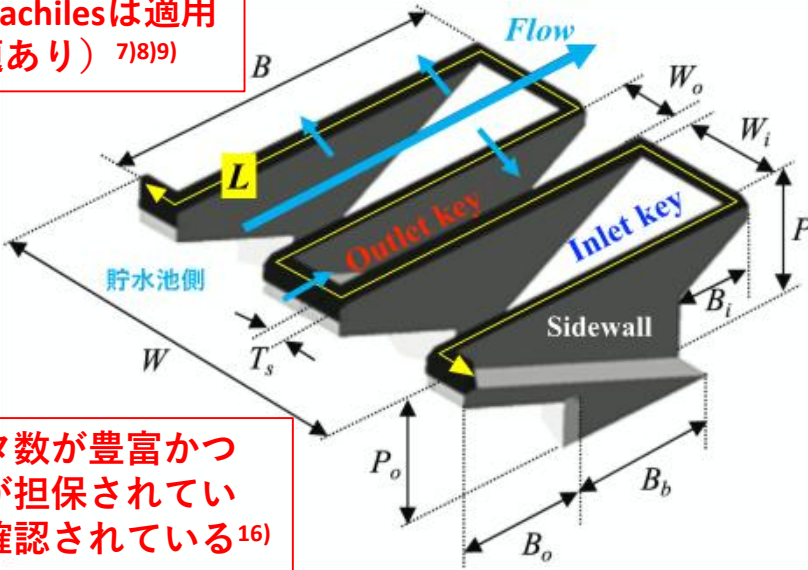
3) Leite Ribeiro, J-L. Boillat & A. J. Schleiss, O. Le Doucen, F. Laugier : Experimental parametric study for hydraulic design of PKWs, Labyrinth and Piano Key Weirs, 2011

PKWの流量係数の推定式提案者一覧

*：原文に記載なし或いは推定式で考慮されていないパラメータ			
参考文献	L/W	H/P	W_i/W_o
Lempriere and Ouamane ¹⁾ (2003)	6	*	1
Geng et al. ²⁾ (2004)	確認中	確認中	確認中
Ouamane and Lempriere ³⁾ (2006)	4.0–8.5	*	0.67–1.49
Lempriere ⁴⁾ (2009)	5	*	1.25
Anderson ⁵⁾ (2011)	8	0.05–0.95	0.67–1.5
Machiels et al. ⁶⁾ (2011)	5	0.06–3.2	0.46–2.18
Kabiri and Javaheri ⁷⁾ (2012)	2.5–7.0	0.1–0.6	0.33–1.22
Leite Ribeiro et al. ⁸⁾ (2012ab)	3.0–7.0	0.1–2.8	0.50–2.00
Machiels ⁹⁾ (2012)	4.2–5.0	0.1–5.0	0.50–2.00
Cicero and Delisle ¹⁰⁾ (2013)	4.3–5.08	0.1–0.72	1
Noui and Ouamane ¹¹⁾ (2013)	4.0–8.0	0.1–0.9	0.7–1.5
Mehboudi et al. ¹²⁾ (2017)	2.8–6.5	0.07–1.11	1.33–4
Laiadi et al. ¹³⁾ (2017)	6	0.09–0.52	1.2–1.5
Guo et al. ¹⁴⁾ (2018)	2.5–8.5	0.1–	0–2.45
Crookston et al. ¹⁵⁾ (2018)	確認中	0.1–1.0	確認中
Kadia et al. ¹⁶⁾ (2023)	4.0–6.0	0.15–1.6	1.0–1.57

- PKWの流量係数の推定式・モデルは**多数存在**
- 適用範囲が式・モデルによって大きく異なる
- 推定精度も式・モデルによって大きく異なる

海外でよく使用されて
るいる（Machielsは適用
範囲に問題あり）⁷⁾⁸⁾⁹⁾



検証データ数が豊富かつ
推定精度が担保されてい
ることが確認されている¹⁶⁾

1) Lemprière, F.; Ouamane, A.: The piano keys weir: a new cost effective solution for spillways. Hydropower Dams 10(5), 144–149 (2003)

2) Geng, Y.: Study on Hydraulic Behavior and Technical Application of Self-Tilting Labyrinth Weir. Master Thesis, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. (in Chinese).

3) Ouamane, A.; Lemprière, F.: Design of a new economic shape of weir. In: Proceedings of the International Symposium of Dams in the Societies of the 21st Century, pp. 463–470. Barcelona, Spain (2006)

4) Lemprière, F.: New Labyrinth weirs triple the spillways discharge (2009). <http://www.hydrocoop.org>.

5) Anderson, R.M.: Piano key weir head discharge relationships. All Graduate Theses and Dissertations, Paper 880, Utah State University (2011)

6) Machiels, O.; Epicum, S.; Archambeau, P.; Dewals, B.J.; Piroton, M.: Influence of the Piano Key Weir height on its discharge capacity. In: Proceedings of the International Conference on Labyrinth and Piano Key Weirs Liege B, pp. 59–66. CRC Press, Boca Raton (2011a)

7) Kabiri-Samani, A.; Javaheri, A.: Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. J. Hydraul. Res. 50(1), 114–120 (2012)

8) Leite Ribeiro, M.; Pfister, M.; Boillat, J.L.; Schleiss, A.J.; Laugier, F.: Piano Key Weirs as efficient spillway structure. In: 24th ICOLD Congress Kyoto (Q94, R13), pp. 1–10 (2012b)

9) Machiels, O.: Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs. Ph.D. Thesis ULgetd-09252012-224610, University of Liege (Belgium) (2012)

10) Cicero, G. M., and Delisle, J. R. (2013). "Discharge characteristics of piano key weirs under submerged flow." Proceedings of the Second International Workshop on Labyrinth and Piano Key Weirs -PKW 2013, Paris, France, CRC Press, London, 101–109.

11) Noui, A.; Ouamane, A.: Study of optimization of the piano key weir. In: Labyrinth and piano key weirs II pp. 175–182. CRC/Balkema, Leiden, Netherlands (2013)

12) Mehboudi, A.; Attari, J.; Hosseini, S.A.: Flow regimes over trapezoidal Piano Key Weirs. In: Epicum, S., Laugier, F., Ho Ta Khanh, M., Pfister, M. (eds) Labyrinth and Piano Key Weirs III—PKW 2017, pp. 65–74. CRC Press, London (2017)

13) Laiadi, A.; Athmani, B.; Belaabed, F.; Ouamane, A.: The effect of the geometric shape of the alveoli on the performance of Piano Key Weirs. In: Epicum, S., Laugier, F., Ho Ta Khanh, M., Pfister, M. (eds) Labyrinth and piano key weirs III—PKW 2017, pp. 93–100. CRC Press, London (2017)

14) Xinlei Guo, Zhiping Liu, Tao Wang, Hui Fu, Jiazhen Li, Qingfu Xia and Yongxin Guo : Discharge capacity evaluation and hydraulic design of a piano key weir, Water Science & Technology: Water Supply, 2018.

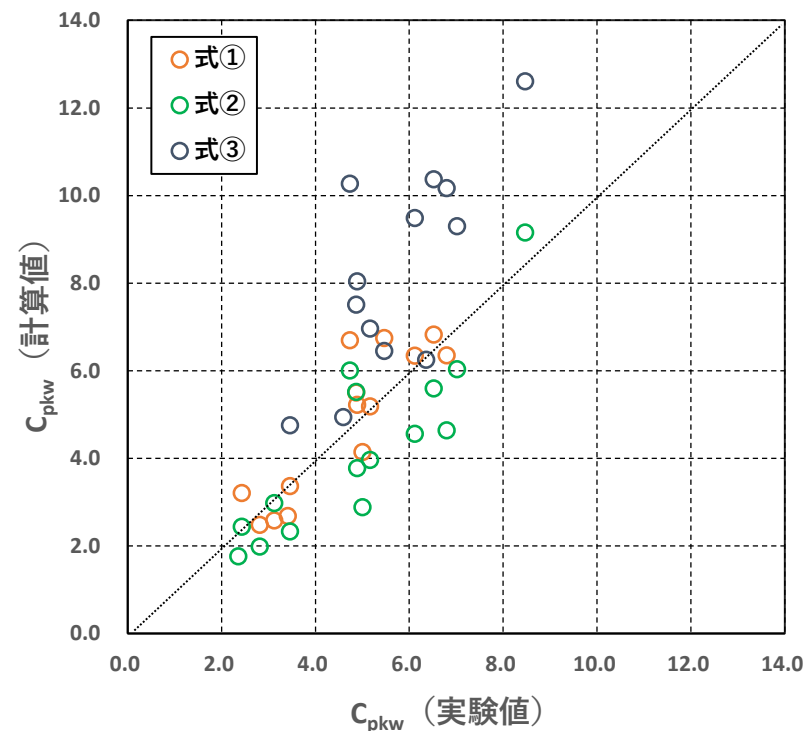
15) Crookston, B. M., Anderson, R. M., and Tullis, B. P. (2018). "Free-flow discharge estimation method for Piano Key weir geometries." Journal of Hydro-environment Research, 19, 160–167. 2018. 16

16) Subhjit Kadia, Elena Pummer, Binith Kumar, Nils Rüther, Zulfequar Ahmad : A Reformed Empirical Equation for the Discharge Coefficient of Free-Flowing Type-A Piano Key Weirs : Journal of Irrigation and Drainage Engineering List of Issues Vol. 149, No. 4 (2023)

流量係数の推定式による推定精度の検証

- ✓ これまでに建設された34基のPKWの建設検討時に実施された模型実験データのうち、Type-Aかつ模型実験データが収集できた22基を対象
- ✓ 22基の模型実験データと式①～③による推定値（流量係数 C_{pkw} ）を比較

推定式名	提案式	適用範囲
式① (Kadia et al. ¹⁾)	$C_{pkw} = 2/3 C_d \sqrt{2g}$ $C_d = 0.327 (L/W)^{0.669} (H/P)^{-0.487} (W_f/W_o)^{0.276} (P/W_u)^{-0.171}$	$0.15 < H/P < 1.6,$ $4.0 < L/W < 6.0,$ $0.5 < P/W_u < 1.33$ $1.0 < W_f/W_o < 1.57$
式② (Leite Ribeiro et al. ²⁾)	$C_{pkw} = r C_s \sqrt{2g}$ $r = 1 + 0.24 \delta (wpba)$ $\delta = ((L-W)P/WH)^{0.9}$ $w = (W_f/W_o)^{0.05}$ $P = (P_o/P_f)^{0.25}$ $b = (0.30 + (B_o + B_f)/B)^{-0.50}$ $a = 1 + (R_o/P)^{2.0}$	$0.1 < H/P < 2.8,$ $3.0 < L/W < 7.0,$ $1.5 < B/P < 4.6, 0.7 < P_o/P_f < 1.4,$ $0.2 < B_f/B = B_o/B < 0.4,$ $0.5 < W_f/W_o < 2.0$
式③ (Kabiri and Javaheri ³⁾)	$C_{pkw} = 2/3 C_d \sqrt{2g}$ $C_d = 0.212 (H/P)^{-0.675} (L/W)^{0.377} (W_f/W_o)^{0.426} (B/P)^{0.306}$ $\times \exp(1.504 B_o/B + 0.093 B_f/B) + 0.606$	$H > 30\text{mm}, 0.1 \leq H/P \leq 0.6,$ $2.5 \leq L/W \leq 7, 1 \leq B/P \leq 2.5,$ $0.33 \leq W_f/W_o \leq 1.22, 0 \leq B_o/B \leq 0.26$



- 各推定式の L/W と H/P の適用範囲より推定可能なダム数（割合）を求めると、式①、②、③で、それぞれ14基（64%）、15基（68%）、12基（55%）
- 実験値と推定値の乖離 (MAPE %)は式①～③でそれぞれ、**14.4%**、**21.0%**、**44.6%**
 $\Rightarrow L/W$ 及び H/P の組み合わせ毎の流量係数の推定精度はどうか？（式③は対象外）

1) Subhojit Kadia, Elena Pummer, Binit Kumar, Nils Rüther, Zulfequar Ahmad : A Reformed Empirical Equation for the Discharge Coefficient of Free-Flowing Type-A Piano Key Weirs : Journal of Irrigation and Drainage Engineering List of Issues Vol. 149, No. 4(2023)

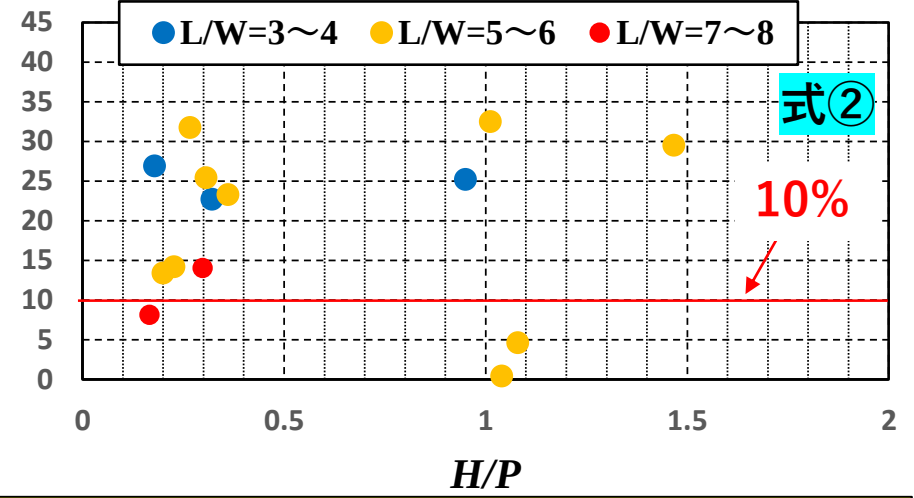
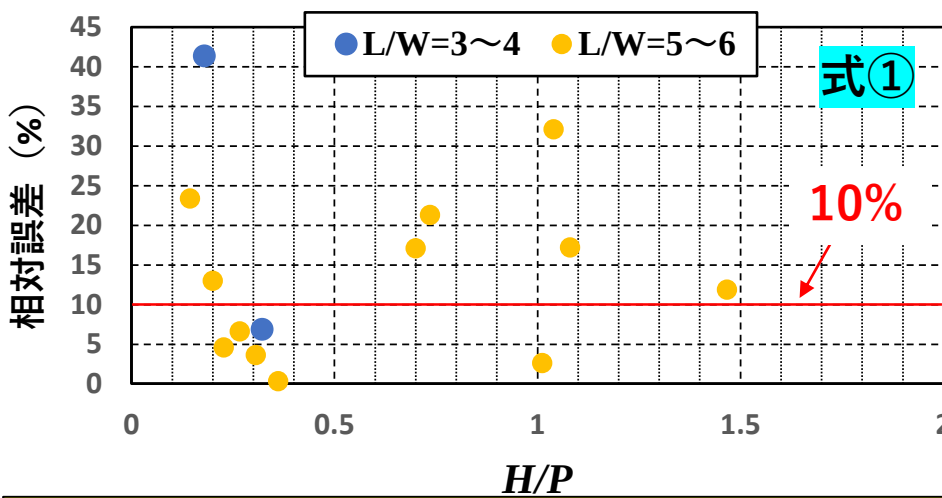
2) Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A. J., and Boillat, J. (2012a). Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. Journal of Hydraulic Research, 50(1), 114–120 (2012)

3) Research, 50, 400–4083) Kabiri-Samani, A.; Javaheri, A.: Discharge coefficients for free and submerged flow over Piano Key weirs. J. Hydraul. Res. 50(1), 114–120 (2012)

式①②を対象としたH/PとL/Wの組み合わせ毎の相対誤差

- ✓ 推定精度が比較的高い式①，②の推定値と実験値による流量係数の相対誤差をH/P及びL/Wの組み合わせ毎に整理

相対誤差 = $\frac{C_{pkw}(\text{計算値}) - C_{pkw}(\text{実験値})}{C_{pkw}(\text{実験値})} * 100 \text{ (\%)}$



- 全体的にばらつきが大きく，H/P及びL/Wと相対誤差の関係に相関は認められない
⇒式①②ともに，相対誤差はH/PやL/Wによらない？
 - 相対誤差が小さい（目安：赤線で示した10%未満）H/P，L/Wの範囲や組み合わせは殆ど認められない
⇒現時点での机上設計段階における式①②の適用は困難と考えられる
- 今後は，より多くの検証データ（特に， $0.5 < H/P < 1$ のデータ）での式の推定精度を検証するとともに，相対誤差の発生要因を分析した上で推定精度の改善を図ることや新たな式・モデルを構築することが望まれる

目次

【背景・目的】

- ・ ダム再生，ダムセーフティーに係る課題とその対応策の一例
- ・ PKWとは？
- ・ LWとPKWの構造面における違い
- ・ 本研究の目的

【ピアノキー型越流堰（PKW）の研究レビュー】

- ・ PKW上の流況
- ・ PKWの流量係数に影響するパラメータ
- ・ PKW上の水理量
- ・ 流量係数の推定式
- ・ 流量係数推定式の精度検証
- ・ 推定式の適用性に関する考察

【PKWの課題整理】

- ・ 国内適用へ向けた課題整理

課題 OPKWの国内ダム等への適用の観点から留意すべき事項（今後の課題）を整理した

- 1. 流木・塵芥の捕捉：**PKWには流木等の漂流物が捕捉され得るが、その捕捉率は流木の直径 D と越流水深 H の比 D/H によって大きく変化することがわかっており¹⁾、 D/H を変数とした流木の捕捉確率 Π の経験式が提案されている¹⁾。今後は流木の投入量や樹種等のパラメータを変化させた更なる分析が望まれる。
- 2. 橋脚の影響：**既設のPKWでは、ベトナムの一部のダムを除き橋梁橋脚が設置されておらず、検討事例も殆ど見当たらない。一方、国内ダム等では越流部に橋脚を設けることが一般的であり、PKWの導入に当たっては橋脚の構造諸元等がPKWの流量係数等に与える影響を検討する必要がある。
- 3. 流況・放流能力評価方法²⁾：**多くの構造パラメータに関して検討を進めるにあたり、近年はFlow-3D等の三次元の数値計算を使った検討¹⁾が多く報告されており、国内でも計算を活用した検討の蓄積が望まれる。
- 4. 更なる流量係数の向上手段³⁾：**Outlet上流端基礎部に円弧を設けることで損失を軽減する方法や、越流頂形状の改良及びPKW上にパラペットを付ける方法等が提案されているが、今後の更なる検討が望まれる。
- 5. 放流量の急増による下流河道への影響：**PKWを非常用洪水吐きとして設置する場合、当該ダムが洪水調節容量を使い切り、PKWを越流し始める（異常洪水時防災操作）際に、小さい越流水深で高い放流能力を有するため、下流水位の上昇速度が急増する可能性がある。そのため、下流河道への影響評価が望まれる。
- 6. 地震動への応答特性：**PKWの建設事例は地震動を考慮する必要が殆どない地域に多く分布しているためPKWの地震応答特性等に関する研究は殆ど行われてきていない。そのため、地震が多発する我が国へのPKWの導入に当たっては、耐震性能の詳細な検討とその対策が課題であると考えられる。
- 7. 新規ダムと既存ダムの合理的な設計方法：**PKWの適用対象（新規又は既存ダム）によって、その建設コストや流量係数を考慮した最適値が異なる可能性が示されている⁴⁾。例えば、PKWのアスペクト比（ P/W_u ）について、新規ダムでは $P/W_u=1.33$ ⁴⁾が推奨されているが、既存ダムではダム天端を削ることにより生じるコスト増との兼ね合いから $P/W_u=0.5$ ⁴⁾が推奨されている。コスト便益を交えた各種無次元量の最適値について今後の更なる検討が望まれる。
- 8. 上下流河道の洗掘・堆積：**河道に設置されたPKWの放流特性は上下流の洗掘・堆積の影響を受けやすいためその影響に関する研究が進められている。例えば、PKW上流の土砂堆積を考慮した流量係数の推定式が提案されている⁵⁾。今後、紹介したPKWを河道の堰へ適用する場合には、混合砂や河床変動を考慮した検討やPKW上の土砂の通過特性等の更なる分析が望まれる。

1) Michael Pfister, Damiano Capobianco, Blake Tullis, M., and Anton J. Schleiss M. : Debris-Blocking Sensitivity of Piano Key Weirs under Reservoir-Type Approach Flow, J. Hydraul. Eng. Vol. 139, p.p. 1134-114, 2013

2) Safarzadeh, A., & Noroozi, B. (2017). 3D Hydrodynamics of Trapezoidal Piano Key Spillways. International Journal of Civil Engineering, 15(1), 89-101

3) Jaretha Lombaard : Evaluation of the Influence of Aeration on the Discharge Capacity and Flow Induced Vibrations of Piano Key Weir Spillways, degree of Masters of Engineering in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University, 2020

4) Machiels, O. : Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs, Hydraulics in Environmental and Civil Engineering, 2012

5) Mattia Nosedà, Ivan Stojnic, Michael Pfister, and Anton J. Schleiss M. : Upstream Erosion and Sediment Passage at Piano Key Weirs, J. Hydraul. Eng. Vol. 145(8), 2019

結論

近年海外で採用実績が増加しているPKWを対象に、その流況及び水理特性、流量係数（放流能力）に影響するパラメータについて概括し、その上で既往の流量係数の推定式（計3式）の精度について検証を行った。その結果、3式ともにそのままでは机上設計段階で使用することが**困難**であることを示した。更に、PKWの国内ダムへの適用にあたっての課題を整理した。

今後の展望

国内ダムへの適用に向けては、対象ダムの目標とする流量係数に対し推定式等を用いた試設計を行うとともに、地震等に対応した**構造検討**を進め、得られた構造上の形状制約を**水理設計**に反映する、といった検討が必要である。また、検討ダムの下流河道特性に応じた異常洪水時の伝搬特性といったリスク評価や、施工性・施工コストを踏まえた**最適形状**など、ダムの設計全体の中でのPKWの**機能-効果-コストバランス**に目処をつけていく必要がある。さらに、PKWはダムのみでなく、堰や遊水池等に対してもその機能ニーズに変わりはないと思われ、**適用時の水理条件の違い**を考慮した検討も期待される。