

2026年度 河川技術シンポジウム

オールセッション1 S1-2 洪水流の水理, 河川構造物・局所流・局所洗掘

6月19日(金) 11:10~12:50 A会場

翼型ゲート周りにおいて 水面振動が起きる範囲の水理現象とその影響



CTI 株式会社 建設技術研究所

共和コンクリート工業株式会社

Kanadevia
Technology for people and planet

○金目達弥¹⁾・加谷一人¹⁾・岩佐隆広¹⁾・稲蔭亮介¹⁾・加藤翔吾¹⁾
近藤和仁²⁾・西嶋貴彦²⁾
新里英幸³⁾・外山正幸³⁾・南家岳史³⁾
田中規夫⁴⁾

1) 株式会社建設技術研究所

2) 共和コンクリート工業株式会社

3) カナデビア株式会社

4) 埼玉大学大学院理工学研究科教授 兼 社会変革研究センターレジリエント社会研究部門

INDEX

目次

- 01** 研究背景
- 02** 数値流体解析・水理模型実験による流れの検証
- 03** 流体中のゲートの構造安定性
- 04** 得られた成果や今後の課題

背景
01

気候変動に伴う水害の激甚化・頻発化

遊水地や調節池の整備にあたり、洪水低減効果の最大化が求められている¹⁾



出所：牟田辺遊水地²⁾（佐賀県 六角川水系牛津川）

背景
02

河川機械設備にかかる大更新時代の到来と担い手不足

維持管理の手間を極力排除した施設整備が重要³⁾

河川機械設備のあり方について（答申の概要）

国土交通省

<諮問内容> 河川機械設備にかかる大更新時代の到来、気候変動の影響への対応等の課題に対応する上での「河川機械設備」のあり方

〇河川機械設備をとりまく状況と課題

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・大更新時代の到来（設置後40年以上の施設急増） ・担い手不足の深刻化（従事技術者、運転操作員の減少・高齢化） ・気候変動に伴う水害の激甚化・頻発化 | <ul style="list-style-type: none"> ⇒ 経済的・効率的・効果的な更新の手法と技術開発 ⇒ 維持管理・操作の省人化・効率化と安全性向上 ⇒ 気候変動の影響を見込み施設能力の増強対応 | <p>※河川機械設備とは
治水、利水等を目的として河川に設置された機械設備</p> <ul style="list-style-type: none"> □ 河川ポンプ設備、河川ゲート設備（可動堰、水門、潮門、樋門）等 □ 出水の際には確実に機能する必要がある |
|--|---|--|

〇対策の基本的な考え方



令和7年度～令和8年度の河川砂防技術研究開発公募河川技術・流域管理分野指定型課題にて採択され研究開発中⁴⁾



無動力自動開閉ゲートを活用した既存越流堤の可動堰化技術



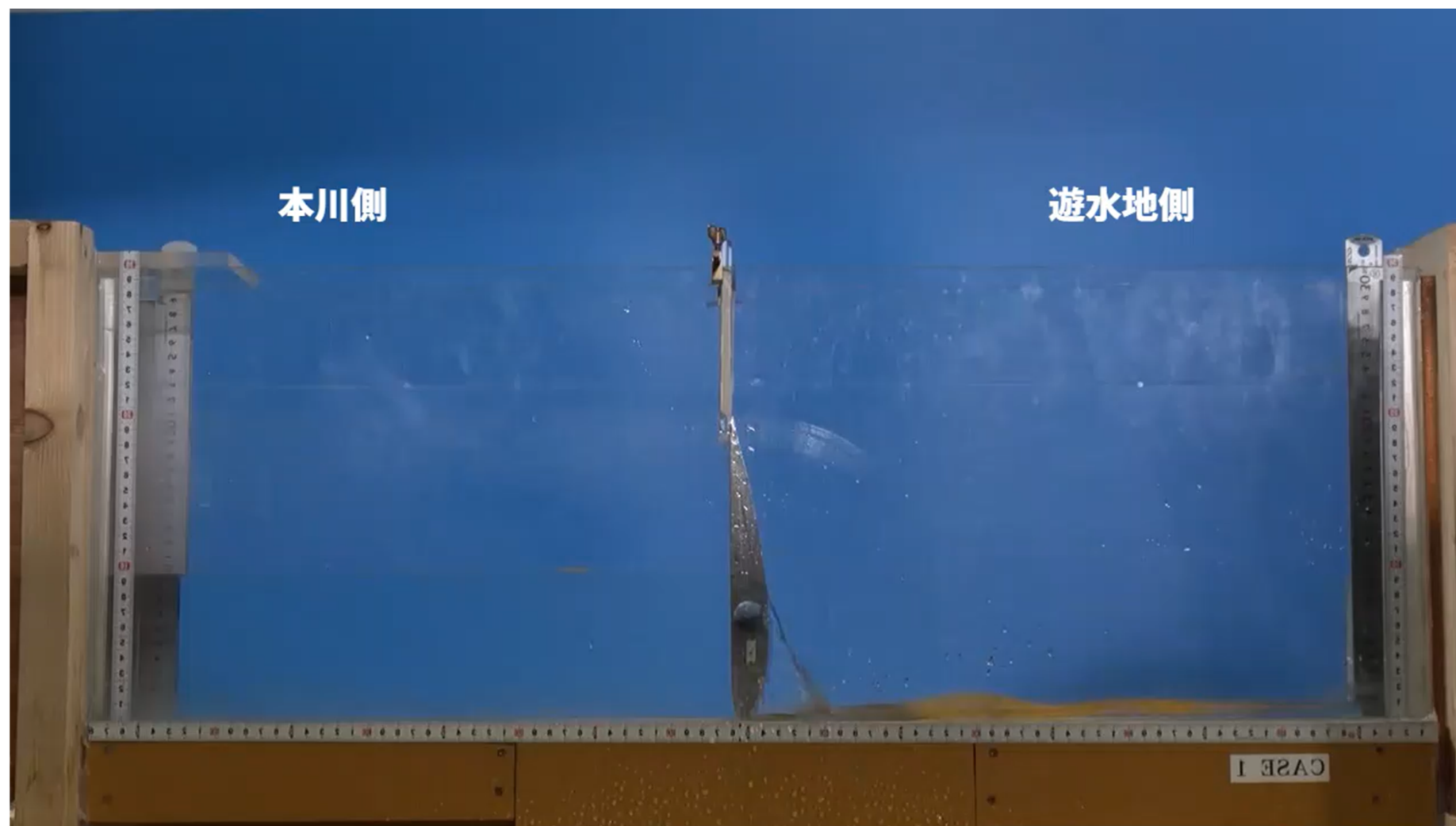
無動力自動開閉ゲートを活用した既存越流堤の可動堰化技術

R6年度

R7年度

R8年度

アイデア

1.
開発要件定義2.
技術開発3.
効果検証・課題抽出4.
社会実装に向けた提案



無動力自動開閉ゲートを活用した既存越流堤の可動堰化技術

R6年度

R7年度

R8年度

アイデア

1. 開発要件定義

- ①開発要件の定義
- ②法的適合性
- ③社会的受容性

2. 技術開発

- ①ゲート構造検討/水理的検証
- ②回転機構の検討
- ③土木施設検討

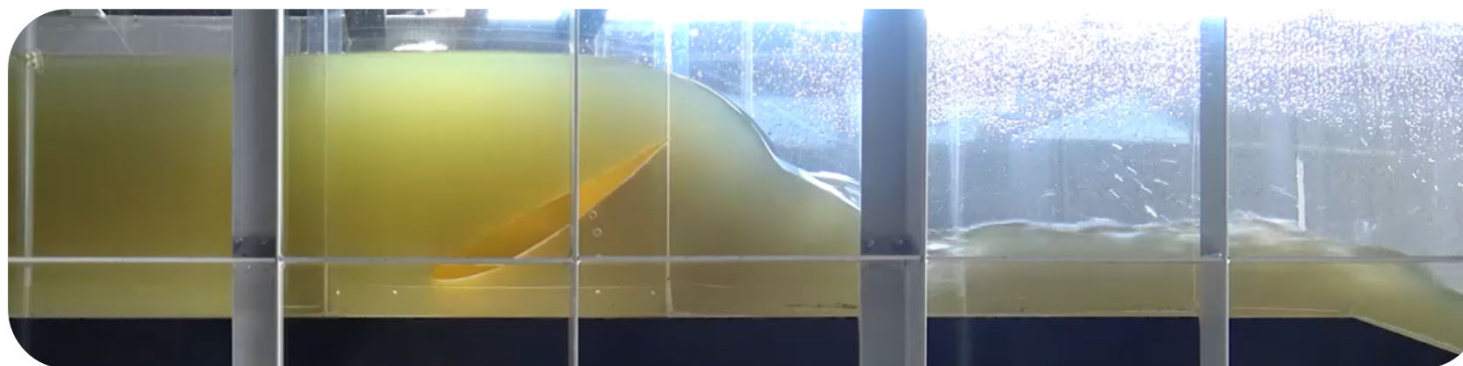
3. 効果検証・課題抽出

- ①治水効果の検証
- ②施工方法
- ③保守・管理手法

4. 社会実装に向けた提案

- ①社会実装へのロードマップ
- ②論点の整理

- ✓ ゲート周りの流れを水理模型実験により明らかにし、数値流体解析によりゲート周りの流れ場を連続的に再現することで、倒伏時のゲートの構造的安定性を検証
- ✓ ゲートが特定の角度で流水中にある場合に**特徴的な水面振動**が発生

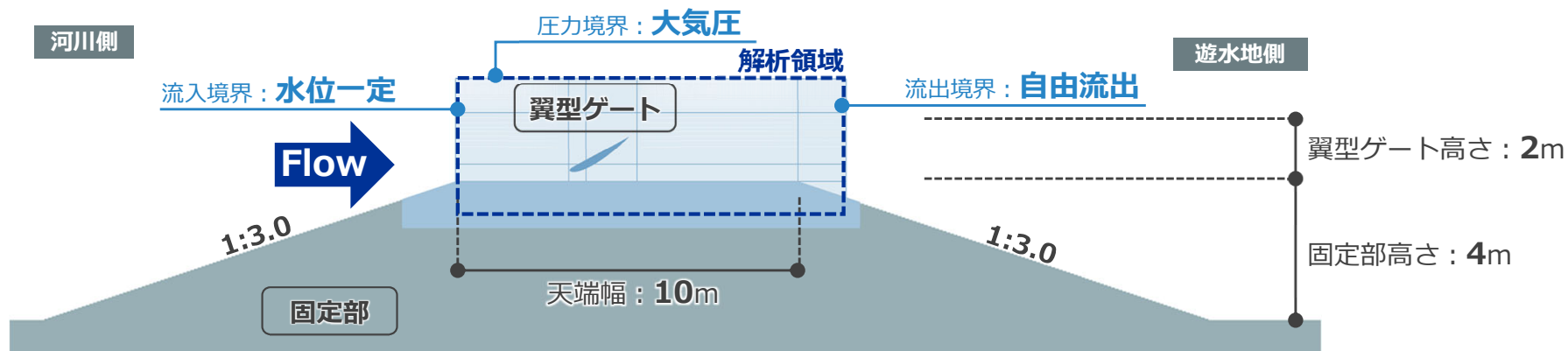


研究目的

- ✓ 発生メカニズム
- ✓ 越流効率への影響
- ✓ ゲートや回転機構への構造的な作用（過大応力・共振）

数値流体解析の概要

- ✓ 固定部（盛土+被覆工で構成される、形状や姿勢が変化しない部分）と天端上に設置した翼型ゲートをモデル越流堤として設定。
- ✓ モデル越流堤の固定部形状は既往の越流堤形状から一般的な形状を設定し、翼型ゲートの高さは2 mとした。



項目		諸元	備考
モデル概要	解析方法	VOF法	
	解析モデル	k- ω 乱流モデル	
モデル形状 (翼型ゲート)	ゲート高	2.0m	設計対象水深
	ゲート下部 開口幅	0.50m	ゲート構造計算（試算）で設定
	ゲート厚 (最大厚)	0.245m	ゲート構造計算（試算）で設定
モデル形状 (固定部)	天端幅	10.0m	堰柱長+管理用通路幅
	表・裏法 勾配	1 : 3.0	既往事例より一般値として設定
	越流堤高	4.0m	既往事例より一般値として設定

水理模型実験の概要

- ✓ ゲート周りの流れ（流速や剥離渦の有無、越流量等）を確認すること、さらに実験結果を用いて数値流体解析の妥当性を検証することを目的として水理模型実験を実施した。
- ✓ 幅1.0m×高さ1.5m×延長20.0mの二次元水路を使用し、断面二次元模型（縮尺1/5）で実験。
- ✓ ゲートの迎角は、事前の数値流体解析で抽出した**代表的な4ケース（-30°、-20°、-10°、5°）**で設定し、**流水中に固定**した。
- ✓ ゲート周りの流れを詳細に把握するため、水路内にトレーサー（比重1.0に近いBB弾）を散布し、PIV解析を実施した。

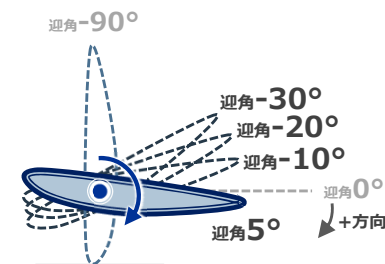


図1-固定迎角（4ケース）

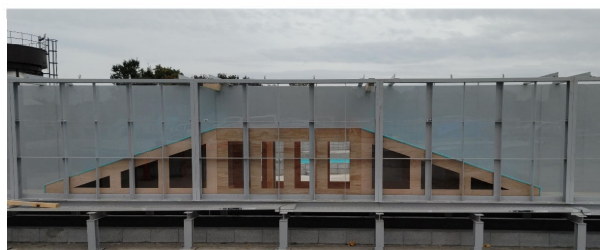


図2-模型全景（固定部）

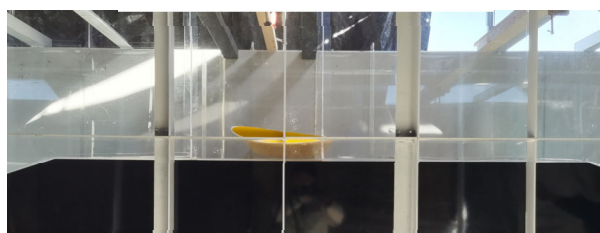


図3-翼型ゲート模型据付状況



図4-翼型ゲート模型



図5-トレーサー

表1-設定迎角に対する流場の特徴

設定迎角	解析流況	圧力コンター	流速コンター
5deg	流線が翼型ゲート壁面に沿う、比較的安定した流れ場を形成		
-10deg	翼型ゲートを挟んだ上下の圧力差が比較的大きい流れ場		
-20deg	翼型ゲート後縁部から渦が発生している流れ場		
-30deg	翼型ゲート後縁部近傍及び離れた後流箇所から渦が発生している流れ場		

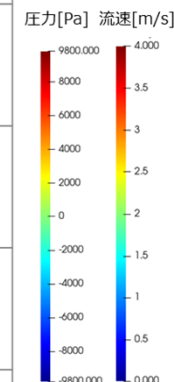


表2-PIV解析に用いた機材・ソフトと撮影条件

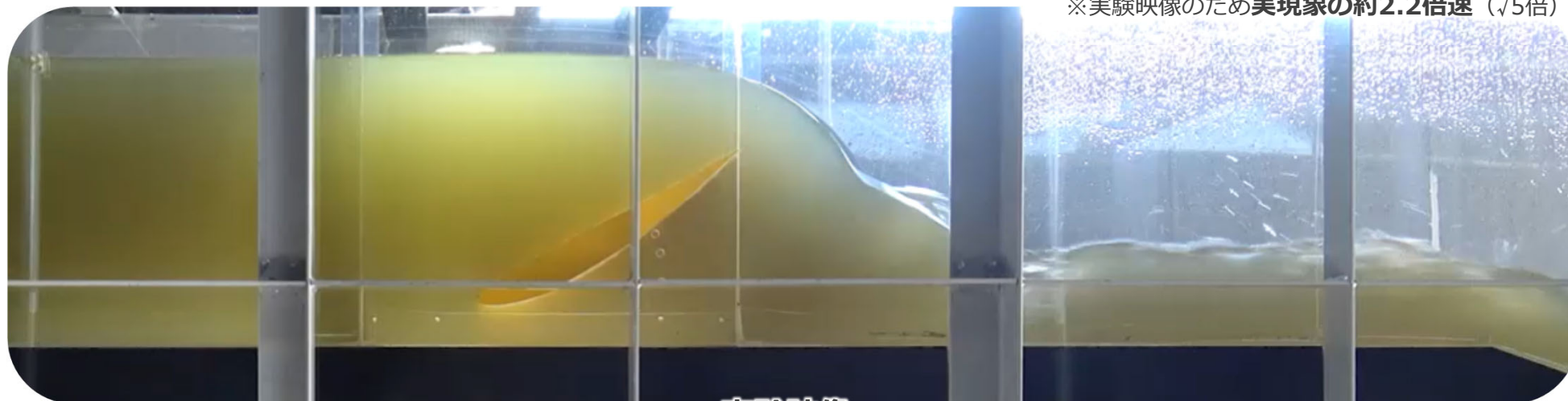
項目	諸元	備考
機種名	ハイスピードカメラ K7-USB (カトウ光研株式会社)	最高撮影速度4000fps
シャッタースピード	500fps	トレーサーの移動を良好に解析できる値
画素数	800×600pixel	500fpsの設定で撮影できる最大画素数
解析ソフト	FlowExpert2D2C (カトウ光研株式会社)	

水理模型実験結果 迎角 -30°

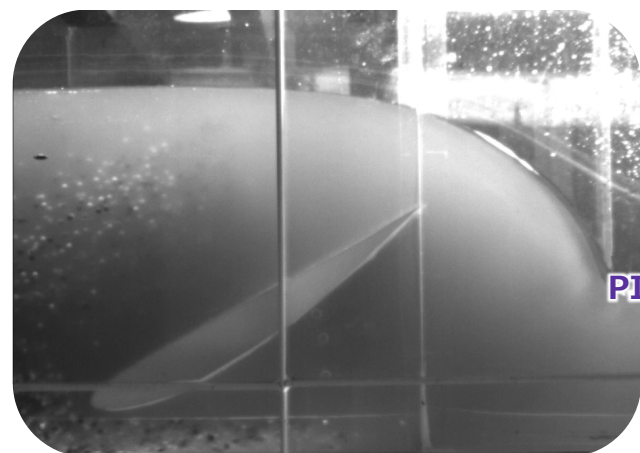
発生メカニズム

越流効率への影響

ゲートや回転機構への構造的な作用

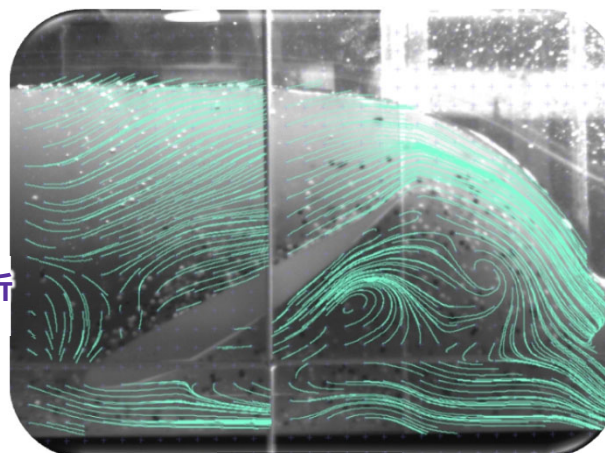
※実験映像のため実現象の約2.2倍速 ($\sqrt{5}$ 倍)

実験映像

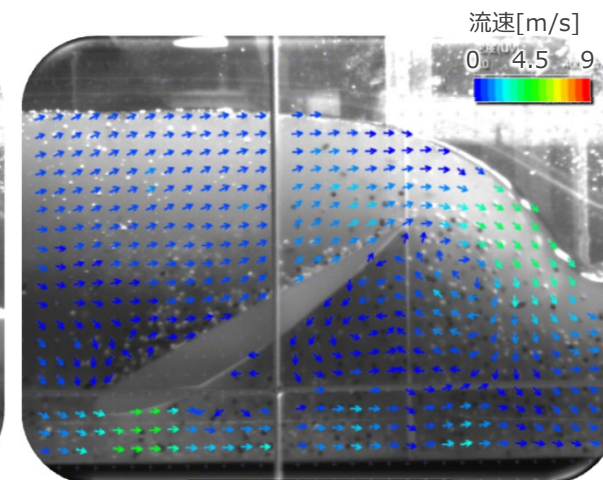


ハイスピードカメラ映像

PIV解析



流線図



流速分布図

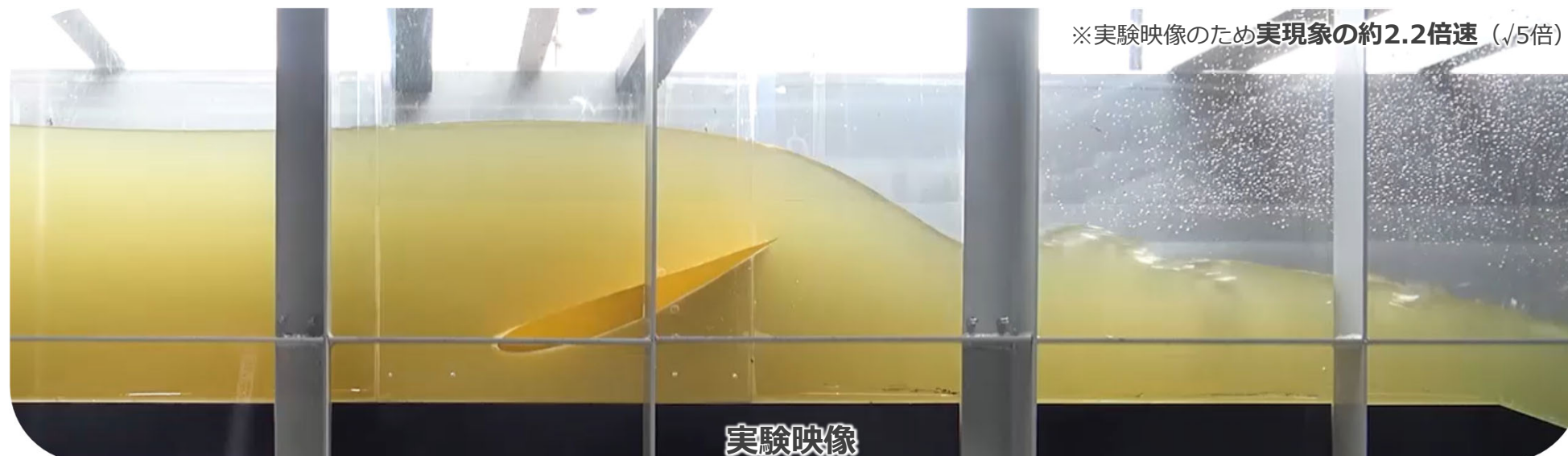
- ✓ ゲート下流側で**渦流が発生**する不安定な流れ場
- ✓ **水面形の変動**が顕著

水理模型実験結果 迎角 -20°

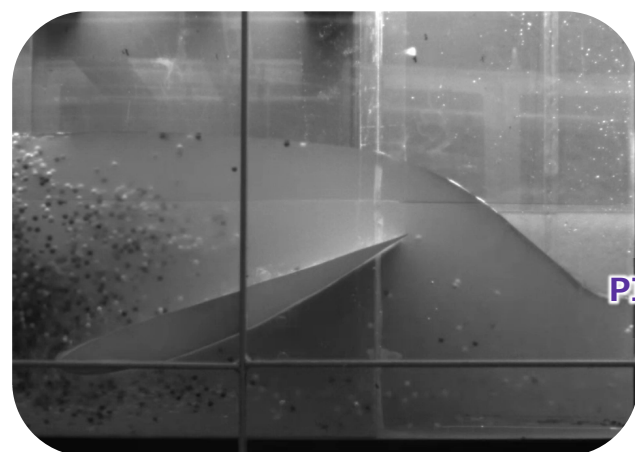
発生メカニズム

越流効率への影響

ゲートや回転機構への構造的な作用

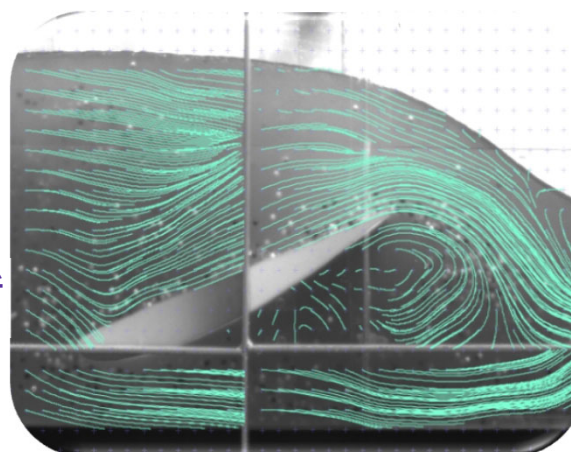
※実験映像のため実現象の約2.2倍速 ($\sqrt{5}$ 倍)

実験映像

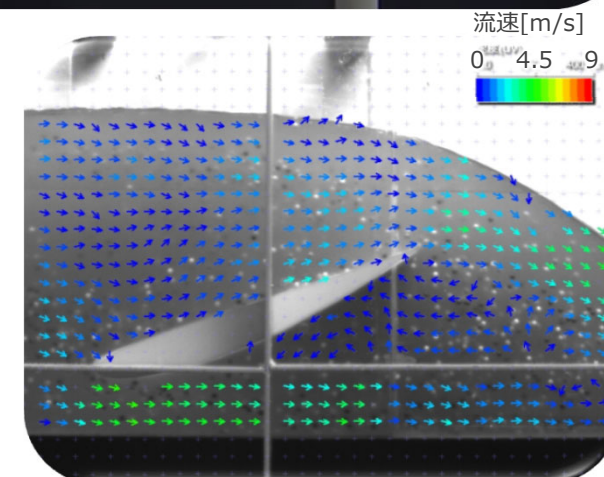


ハイスピードカメラ映像

PIV解析



流線図

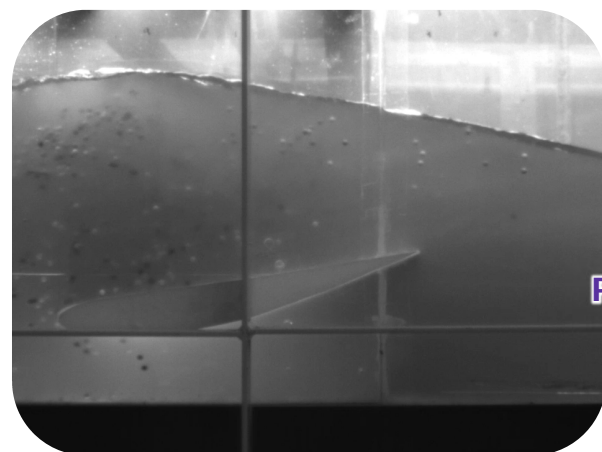


流速分布図

✓ 迎角 -30° のときと同様の流れだが、渦流の規模や水面形の変動量は比較的小さい

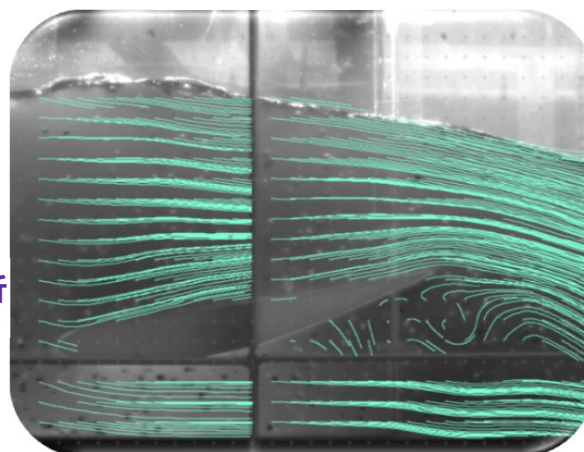
※実験映像のため実現象の約2.2倍速 ($\sqrt{5}$ 倍)

実験映像

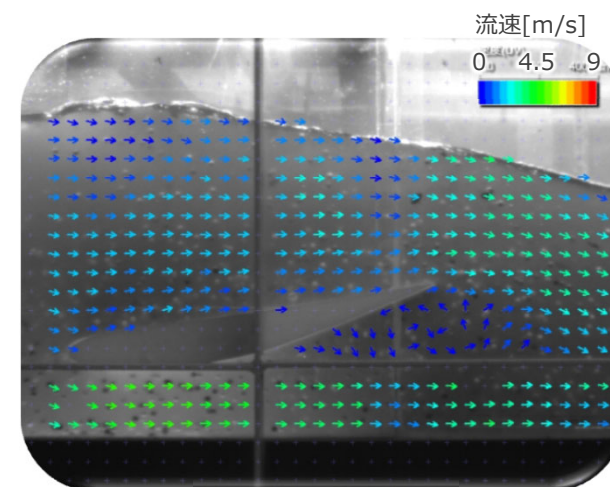


ハイスピードカメラ映像

PIV解析



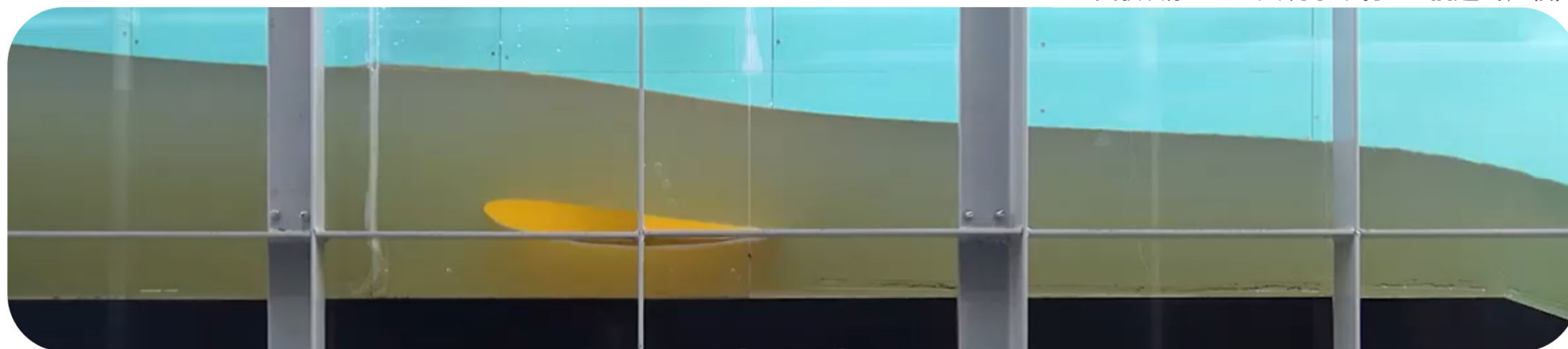
流線図



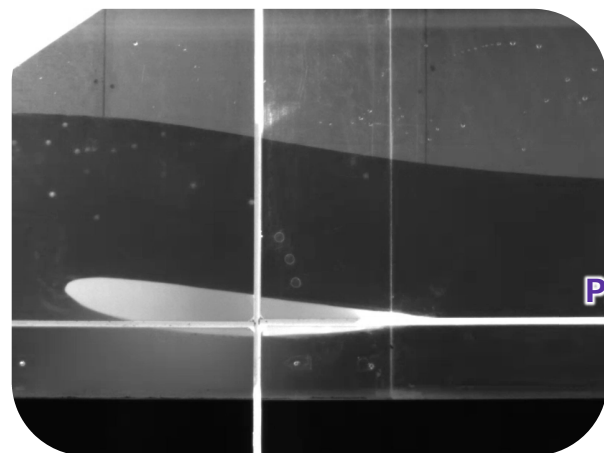
流速分布図

- ✓ ゲート背面で一部剥離した流れが循環する空間が形成される
- ✓ 水面形は概ね安定

※実験映像のため実現象の約2.2倍速 (√5倍)

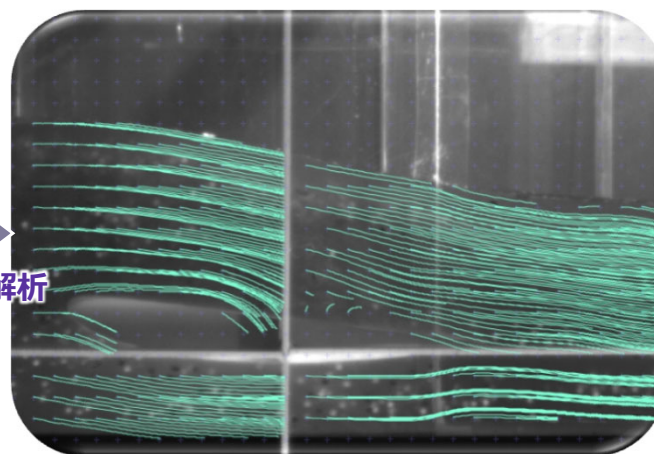


実験映像

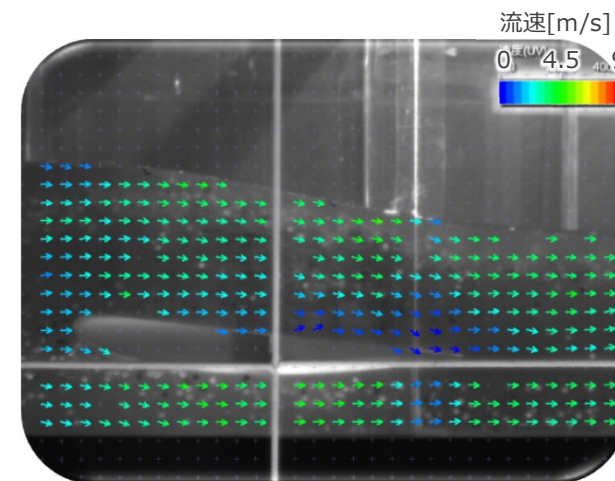


ハイスピードカメラ映像

PIV解析



流線図



流速分布図

- ✓ ゲートによる流れの障害が小さく、水面形も安定している
- ✓ 流線も上流側から下流側に向かって円滑に形成

数値流体解析の妥当性検証

各迎角における流線・流速や水面形は、実験結果と数値流体解析結果で良好に一致しており、**数値流体解析の妥当性を確認**した。

迎角-30°

(倒伏途中)

迎角-20°

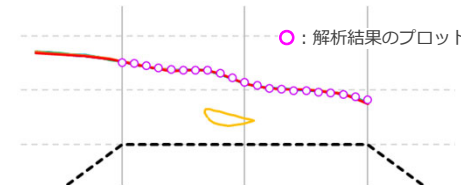
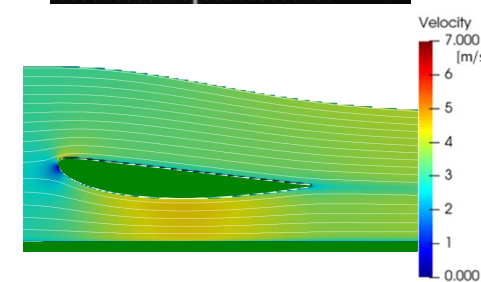
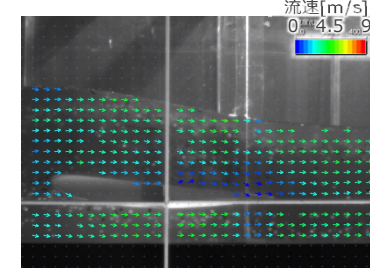
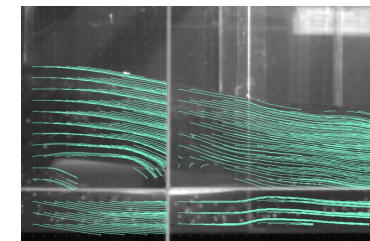
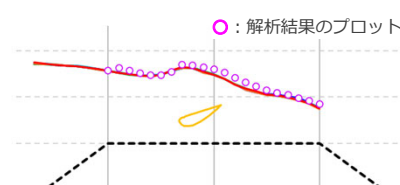
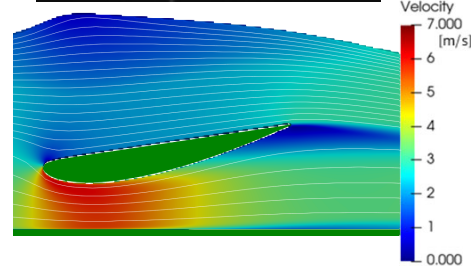
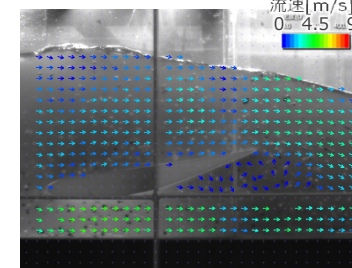
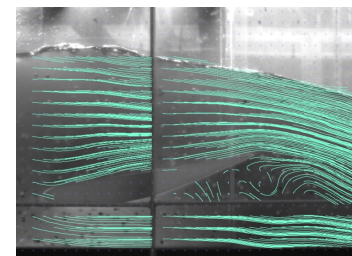
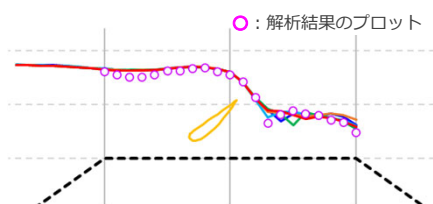
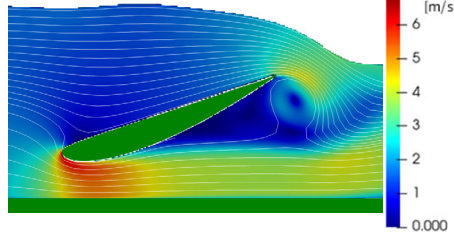
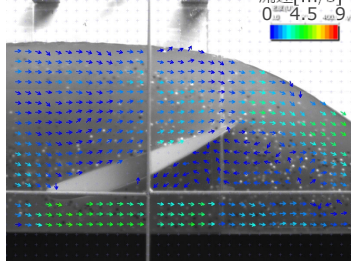
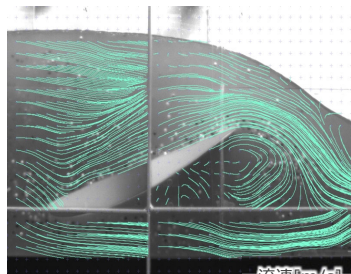
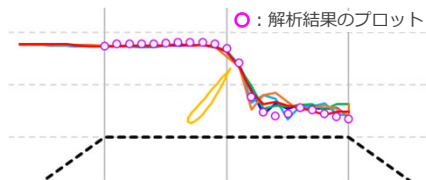
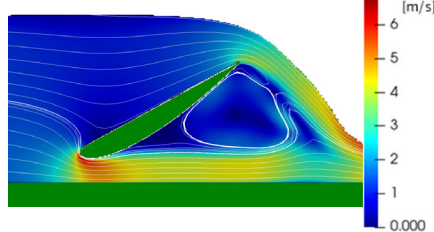
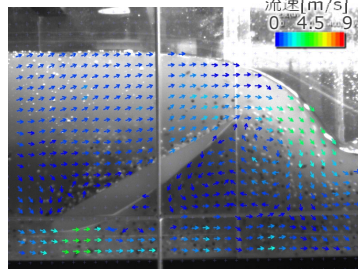
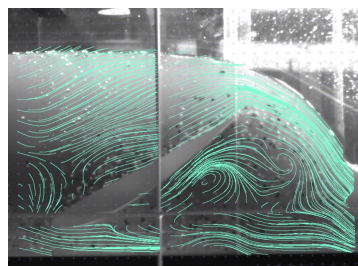
(倒伏途中)

迎角-10°

(倒伏途中)

迎角5°

(完全倒伏)

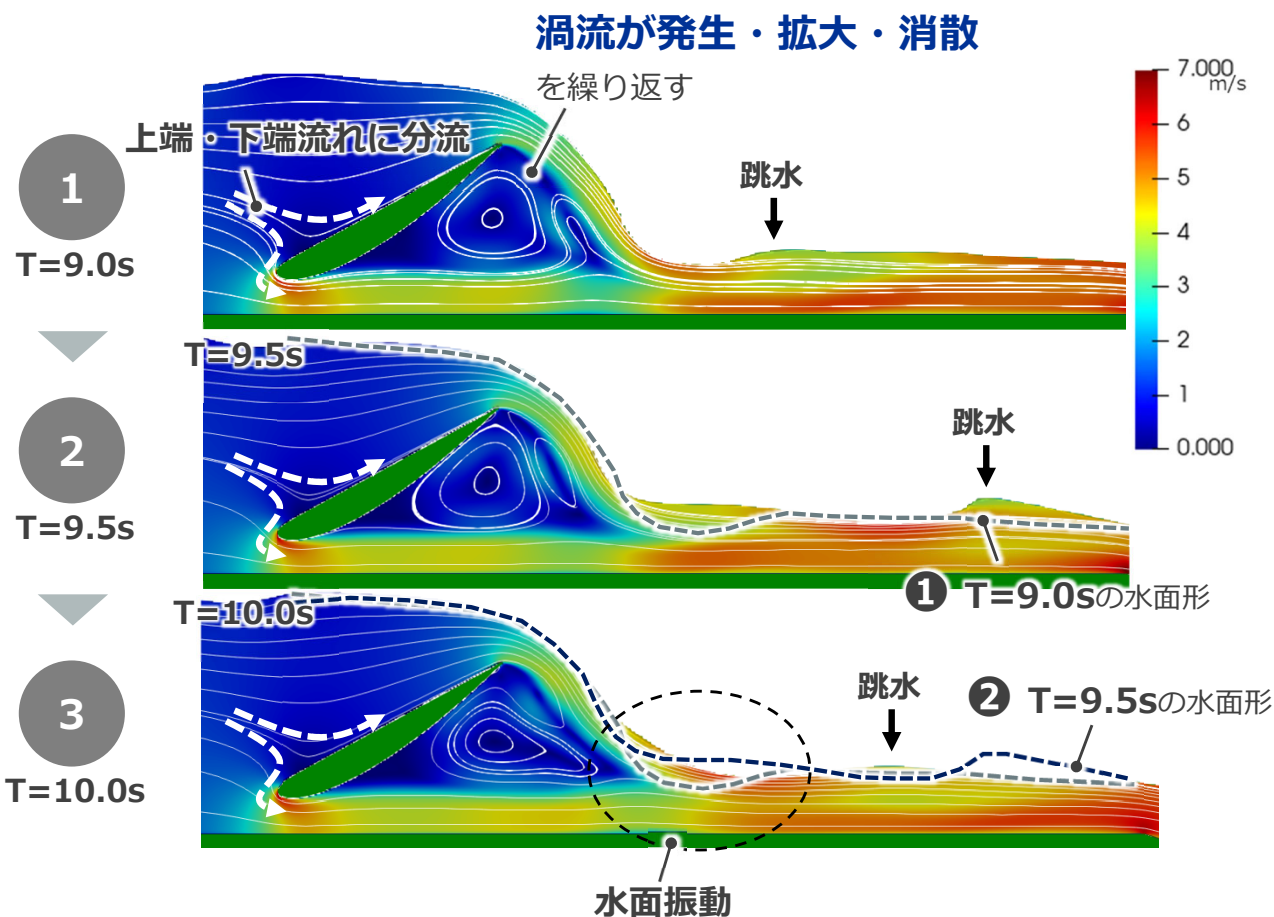
流線
流速水理
模型
実験数値
流体
解析水面形
の比較

水面振動の発生メカニズム

- ✓ ゲート上流側で上下に分流し、ゲート下流側で再び合流する流れ場である。
- ✓ 翼型ゲート背面で**渦流が発生・拡大・消散を繰り返す**、それに伴い上端流れて**規則的な水面振動**が発生する。
- ✓ 上端・下端流れの合流が周期的に変動し振動跳水が発生する。

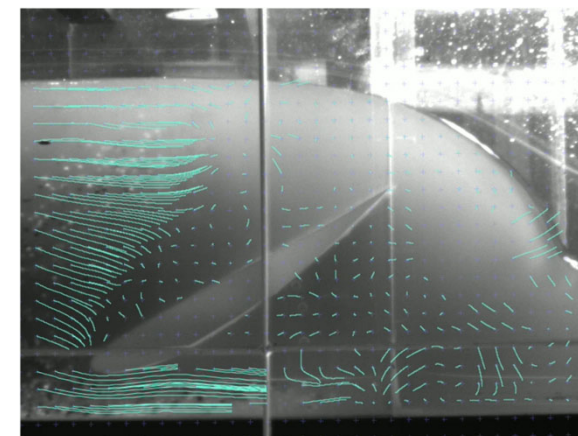
数値流体解析結果

流線図+流速コンター図

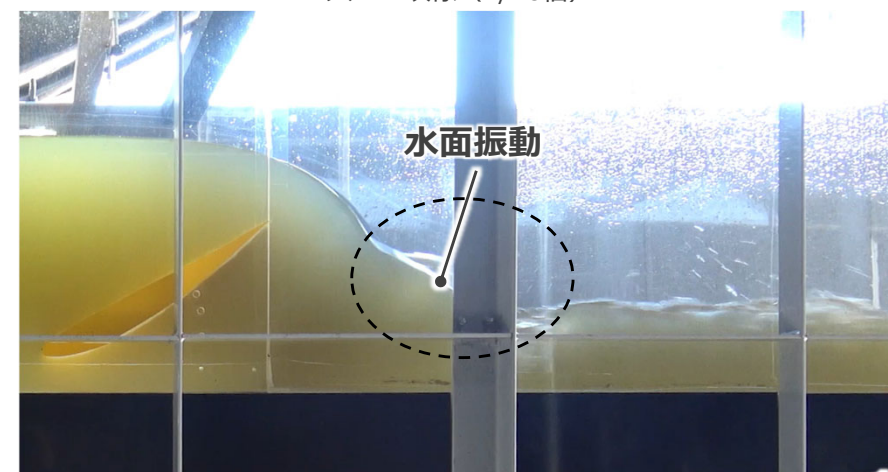


水理模型実験結果

流線図 (PIV解析)



スロー映像 (1/10倍)



越流効率への影響

- ✓ 完全倒伏時の越流係数 $C \approx 1.5$ は、ゲートがない場合の理論値 $C = 1.57$ と同程度（約4%減）であり、流水中にゲートがあることによる越流阻害の程度は小さい。
- ✓ 一方、倒伏中は越流係数が小さく、水面振動が確認された迎角 -30° においては $C \approx 0.9$ 程度であり、**完全倒伏時の約60%の越流効率**であった。

越流係数

$$Q = C \cdot B \cdot h^{3/2}$$

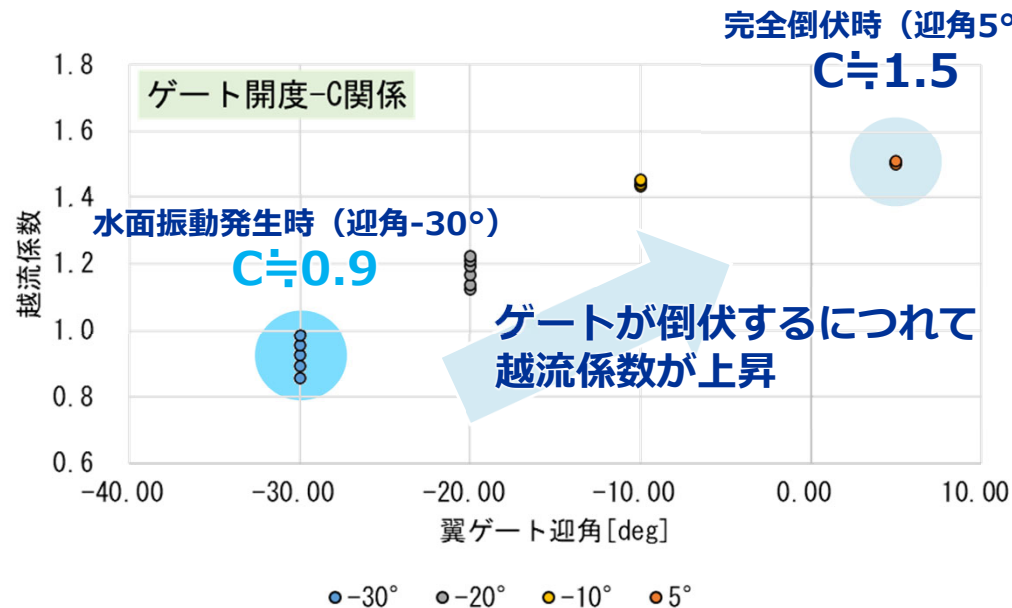
ここに、

Q : 越流量(m^3/s)

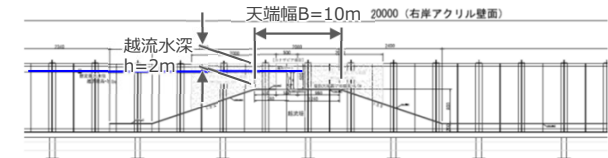
B : 越流幅(m)

C : 越流係数

h : 越流水深(m)

ゲートがない場合の越流係数 $C = 1.57$

(水理公式集 長方形せきの流量公式より)



長方形せきの流量公式による理論値（水理公式集）

$$Q = C \cdot B \cdot h^{3/2}$$

$$0 < h/L \leq 0.1 : C = 1.642 (h/L)^{0.022}$$

$$0.1 < h/L \leq 0.4 : C = 1.552 + 0.083 (h/L) = 1.57$$

$$0.4 < h/L \leq 1.5 \sim 1.9 : C = 1.444 + 0.352 (h/L)$$

$$1.5 \sim 1.9 < h/L : C = 1.785 + 0.237 (h/W)$$

ここに、

Q	越流量	m^3/s
B	堰幅	m
h	越流水深	= 2 m
C	流量係数	
L	堰長	= 10 m
W	堰高	= 4 m
h/L		= 0.2

回転軸へ作用する流体力（揚力抗力の合力と回転モーメント）

発生メカニズム

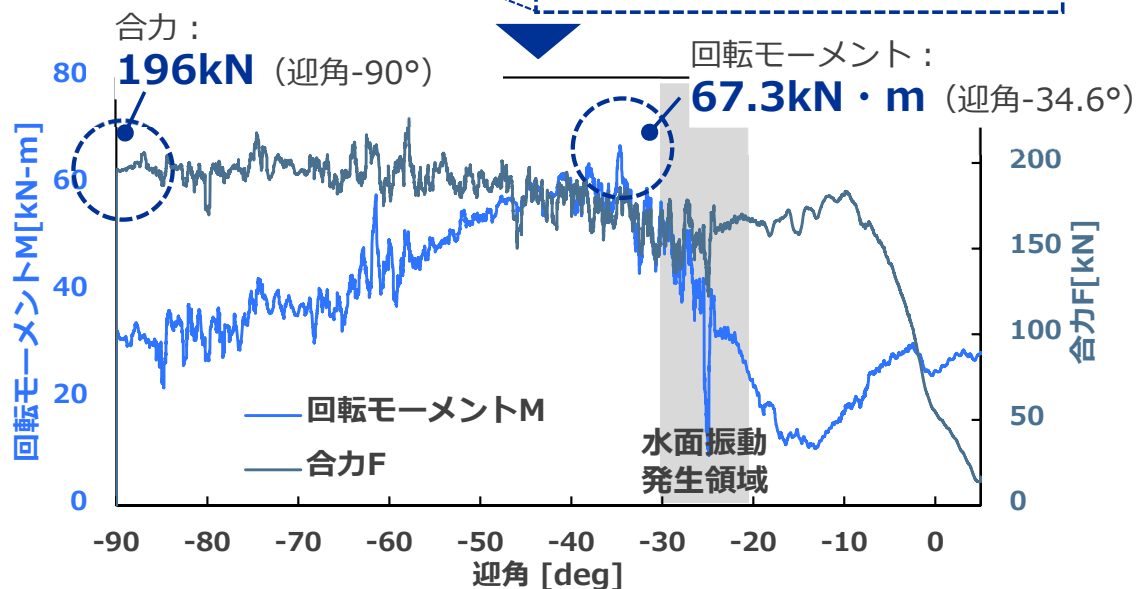
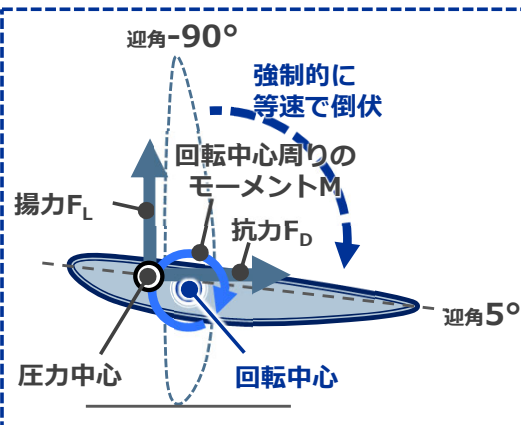
越流効率への影響

ゲートや回転機構への構造的な作用

- ✓ 回転速度を油圧ダンパで制御し、等速で徐々に倒伏する仕組みとした。そのため、ゲートは起立状態から倒伏姿勢になる過程で、前述の水面振動のような**不安定な流れ場に一定時間さらされる**。また、従来の下ヒンジ起伏ゲート等と異なり、倒伏時に流水中にあるため、揚力・抗力が無視できない。
- ✓ 数値流体解析により、倒伏姿勢になるまでの流れの変化とゲートへの作用圧力（ゲートは流れの影響を受けずに等速で強制倒伏）を予測し、圧力を積分することで、揚力・抗力や、それらによる回転軸周りのモーメントを一連で検証した。
- ✓ 回転軸に作用する合力は起立時（迎角-90°）で196kN、回転モーメントは最大67.3kN・mであり、**従来基準⁵⁾の設計手法に基づく計算値と良好に一致し、特別大きな応力は発生しない**ことを確認した。

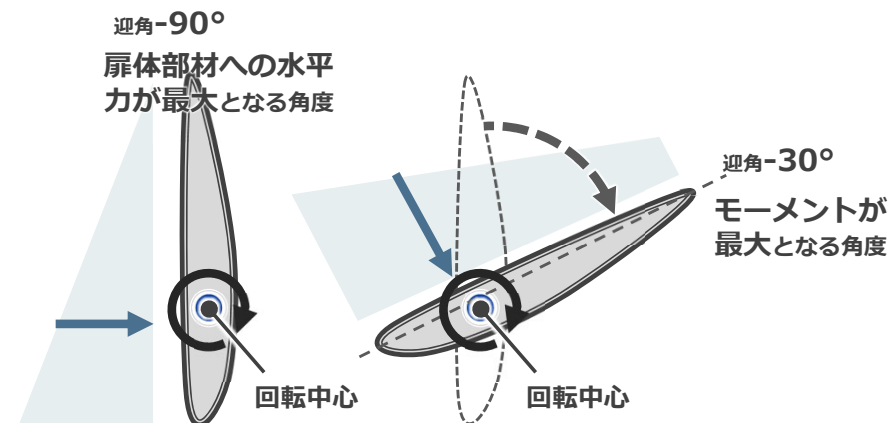
計算条件

ゲートを3分（等速）で強制倒伏
ゲート周りの圧力を積分し揚力・抗力の
合力と回転中心周りのモーメントを算出
（計算ピッチ1/100秒）

鋼製起伏ゲート設計要領（案）⁵⁾

従来技術基準

主桁等の扉体部材への荷重は起立時（迎角-90°）に最大となるとして設計
回転モーメントは倒伏途中（迎角-30°）に最大となるとして設計

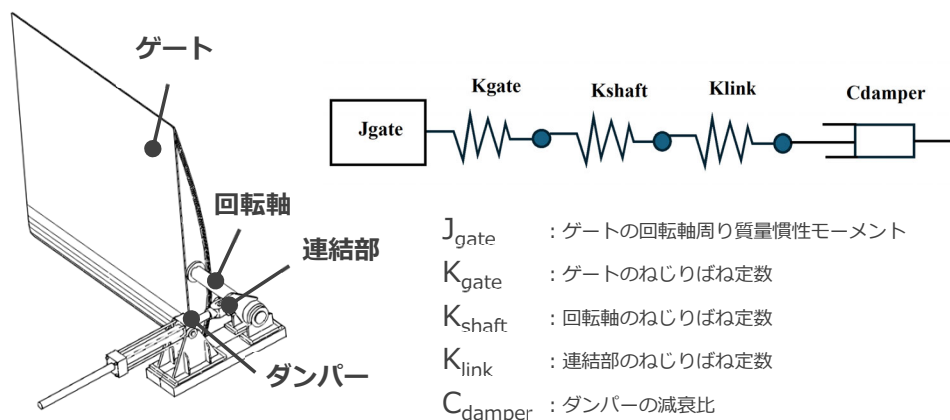


項目	数値流体解析	従来基準準用	
合力	196kN (迎角-90°)	203kN (迎角-90°)	扉体部材の設計に使用
回転モーメント	67.3kN・m (迎角-34.6°)	60.0kN・m (迎角-30°)	回転機構の設計に使用

良好に一致

ゲート固有振動数との比較（共振の可能性）

- ✓ ゲート背面の圧力変動に起因してゲート自身が振動し、回転軸部の損傷やゲート本体の疲労につながる恐れがあった。
- ✓ 数値流体解析によりゲート背面の圧力変動の振動数を算出し、ゲートの固有振動数と比較した結果、明確な差があり、**共振の可能性が低い**ことを確認した。
- ✓ 簡易的な検証であり、流量条件やモデル化条件によっては共振の可能性を完全には否定できないため、**開閉速度を極力早く設定して振動発生領域を速やかに通過させる**ことが重要となる。

簡易モデルで求めた
翼型ゲート回転方向の固有振動数

ゲートのみが質点をもつ、回転方向に振動するモデル。
 shaft（回転軸）、link（連結部）、damper（ダンパー）は回転に対するねじりばねとして作用し、それぞれが直列で接続された、簡易的なねじり振動モデルで算出した。

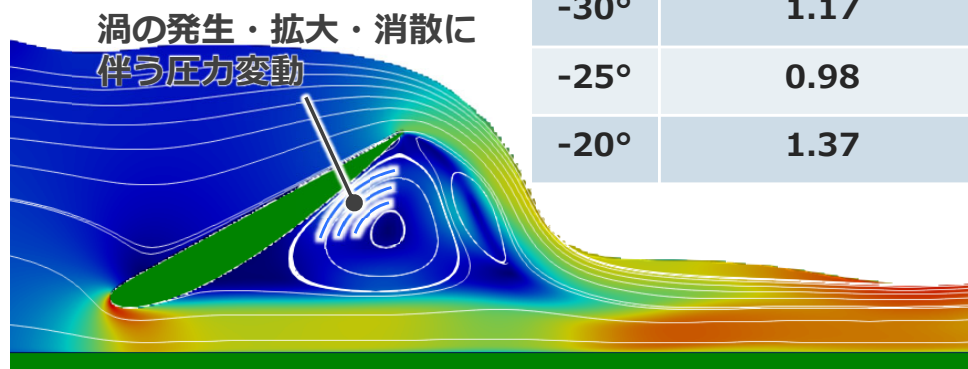
$$f_n = 0.12 \text{ Hz}$$

$$f / f_n = 8.16 \sim 11.42 \text{ と明確に差があり共振は生じないと推測}$$

数値流体解析で求めた
圧力変動の周波数

表 1 - ゲート迎角ごとの卓越周波数

迎角	周波数 f (Hz)
-30°	1.17
-25°	0.98
-20°	1.37



$$f = 0.98 \sim 1.37 \text{ Hz}$$

まとめ

無動力自動開閉ゲートを活用した既存越流堤の可動堰化技術の開発の中で実施した水理模型実験において確認された、特徴的な水面振動について、CFD解析により現象を再現し、水面振動を有する流れによるゲート本体及び回転機構への構造的影響を明らかにした。

- 成果 ✓ 翼型ゲートを迎角5 deg、-10 deg、-20 deg、-30 degに固定した水理模型実験での水面形や流速分布は、CFD解析結果とよく一致した。VOF法により自由表面場をモデル化した本方法の翼型ゲート周辺の流れ解析は一定の妥当性があるといえる。
- 課題 ✓ 今後、**水面振動がより顕著となる迎角の確定と、その条件下における水面振動がゲート構造に与える影響**について、CFD解析によって詳細に検討を進める予定である。
- 成果 ✓ ゲートの下流側で渦流が発生・拡大・消失を繰り返して生じる水面振動は、迎角-20 degから-30 degまでの範囲で発生することを模型実験により明らかにした。
- 課題 ✓ 簡略化モデルに基づく評価であることから**共振の発生を完全に排除することはできず、設計思想としては振動発生領域を速やかに通過する開閉速度を採用する**必要がある。なお、ゲート振動時における流体力の越流堤および支持構造への影響については、本研究では検討していない。これらの影響評価については、**越流堤本体の設計も含めた検討**が必要であり、今後の課題とした。
- 成果 ✓ 水面振動に起因する流体力変動と翼型ゲートの固有振動数との間には明確な乖離が認められ、共振の可能性は低いと判断した。
- 課題 ✓ その他、実河川において越流堤可動堰化を適用する際には、本研究で対象とした鉛直二次元的な流れに加え、河道流下方向の流速成分を伴う流れの影響を考慮する必要がある。実河川では、越流堤川表側の流下方向の流れにより発生する**堰柱・翼型ゲート周りの剥離流等の三次元的な流れ**により、越流特性やゲートに作用する流体力が本研究結果とは異なると想定される。今後は、河道部と越流堤部をモデル化した三次元模型実験により、上記の三次元的な流れを考慮した翼型ゲート周りの流況及び構造への影響について詳細な検討を進めることが課題である。

参考文献

- 1) 国土交通省：【令和7年度】総力戦で挑む防災・減災プロジェクト，2025.6.
- 2) 山本佳久：可動堰型越流堤方式への改良に伴う洪水調節効果について（六角川水系牛津川牟田辺遊水地施設改良），一般社団法人九州地方計画協会公益自主事業（九州技報），第53号，2013.7.
- 3) 国土交通省社会資本整備審議会河川機械設備小委員会：答申 河川機械設備のあり方について，2022.7.
- 4) 加谷一人，金目達弥，岩佐隆広，稲蔭亮介，近藤和仁，西嶋貴彦，新里英幸，外山正幸，南家岳史，田中規夫：遊水地越流堤のピークカット効率を向上させる無動力自動開閉ゲートの研究，令和7年度土木学会全国大会 第80回年次学術講演会，2025.9.
- 6) 一般社団法人ダム・堰施設技術協会：鋼製起伏ゲート設計要領（案），2020.10.