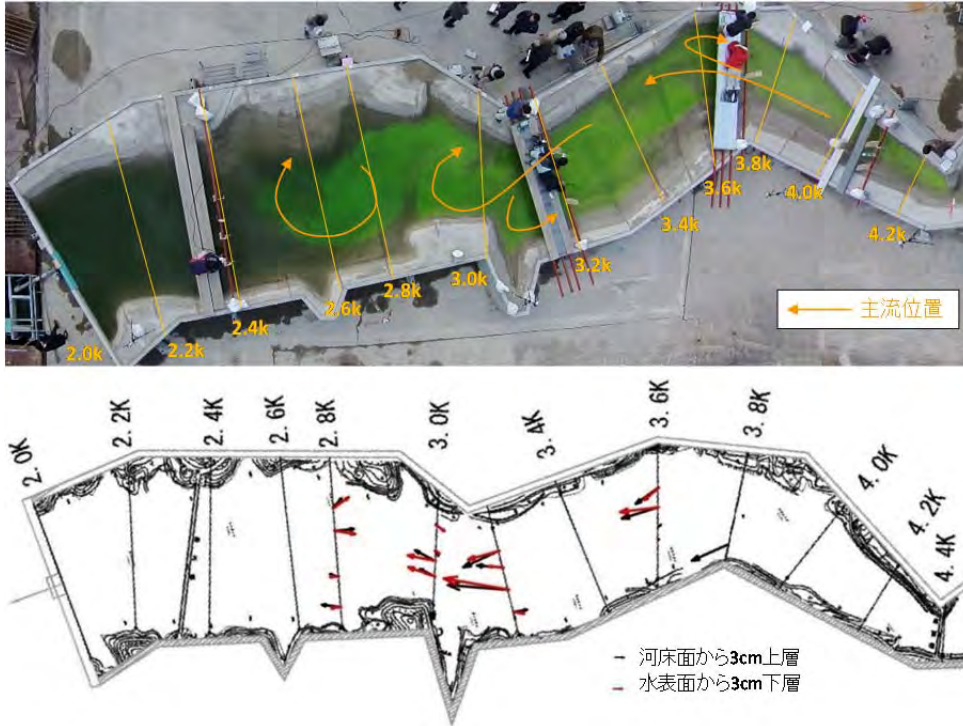




図 3.4-9 流量上昇期における貯水池下流域の流動状況

流量上昇期（実験開始 18 分後）



貯水位ピーク時（実験開始 44 分後）

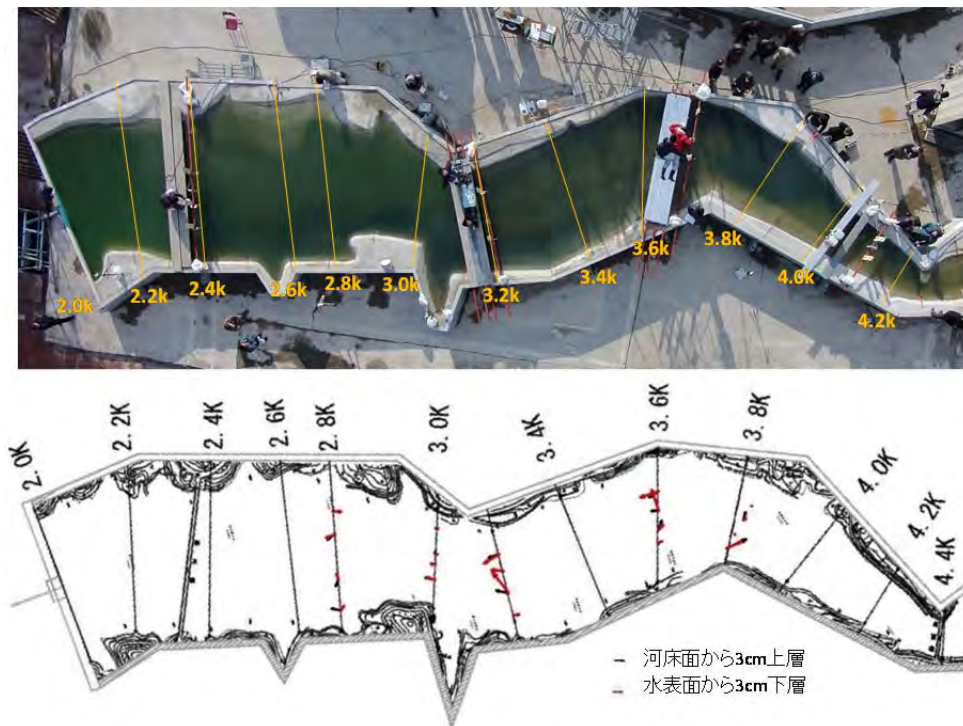


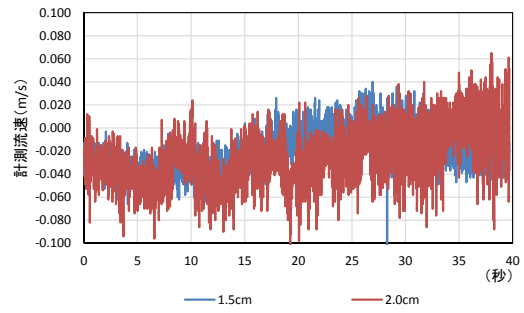
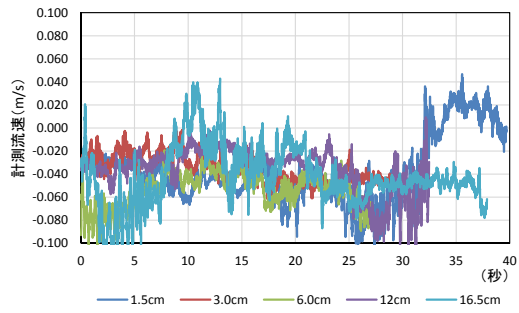
図 3.4-10 貯水池内の流況写真と計測流速の平面ベクトル図

(3) 貯水池内の流速の鉛直分布

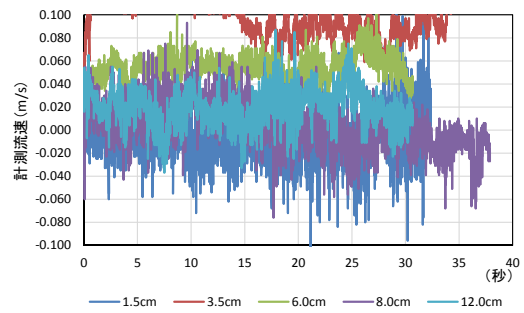
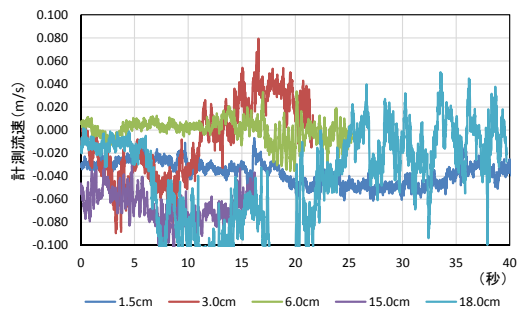
図 3.4-11 に 2.8km 地点と 3.0km 地点における超音波ドップラー式三次元精密流速計による流速計測結果を示す。図中の実線の色の違いは、河床からの計測位置を示しており、計測高さの違いによる流速変化を示している。横軸は計測時間を示しており、流速計測のステップは 0.01 秒間隔である。計測値は瞬間値でありノイズを含んでいることから、全体的な流速の変動傾向を把握するため、図 3.4-12 に示すように、フーリエ級数変換を用いて平滑化処理を行った。ここでは、この平滑化した流速データを基に、流速の鉛直分布の分析を行う。2.8km 地点では、流量上昇期、流量ピーク時の、貯水池内の流動が大きい時間において、計測流速が正から負、負から正のように、時間的に大きな変動が生じている。例えば、流量ピーク時の赤線（河床から 3cm 付近）の計測流速を見ると、計測開始から約 10 秒間は約 -0.04m/s の流速であるのに対し、その 5 秒後には、約 $+0.02\text{m/s}$ の流速に変化する。特に、河床勾配の変化点である 2.8km 付近では、平面的な水面の広がりに加え、縦横断的な河床勾配が大きく変化することで逆圧力勾配流れが発生し、底面付近で流速の鉛直分布が非平衡状態となり、特徴的な貯水池流れを形成している。水位ピーク時では、流量上昇期、流量ピーク時に見られた非平衡状態の流速変化が生じず、平衡状態の流速分布となる。これは、貯水位が高く、流速が小さくなることで、河床近傍で発生した境界層的な非平衡状態の流速変化の影響が、流れ場全体に及ぼす影響が小さくなったためである。一方、3.0km 地点では、各時間において計測流速のノイズは大きいものの、時間的に大きく変化するような流速は見られない。

図 3.4-13 に計測流速の鉛直分布を示す。この流速値は、流速計の計測値を 10 秒平均して表示している。3.0km 地点の計測流速の鉛直分布を見ると、底面に近づくにつれて流速が低減する分布形状を有している。一方、2.8km 地点では、流速分布に規則性は見られず、時間的に複雑に変化していることが分かる。これは、上述の非平衡状態の流速分布によるものであり、時間的な変動が大きいことから、時間平均のとり方により、評価流速が大きく変化する。

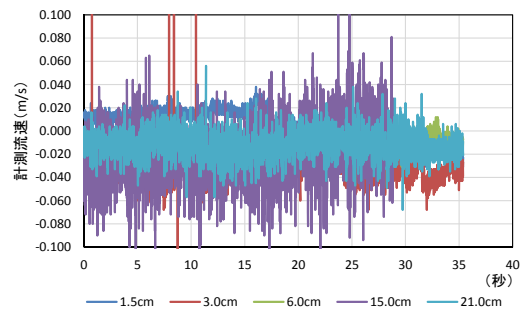
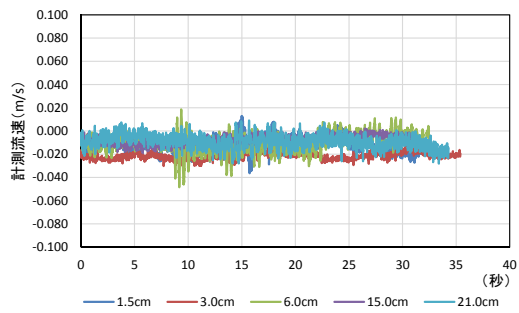
以上より、ダム貯水池特有の地形特性である、平面的な水面の広がりに加え、縦横断的に河床勾配が大きく変化する区間では、時間的に大きく流速が変動し、底面付近で流速の鉛直分布が非平衡状態となることで、特徴的な貯水池流れを形成している。



実験開始 20 分後 (流量上昇期)



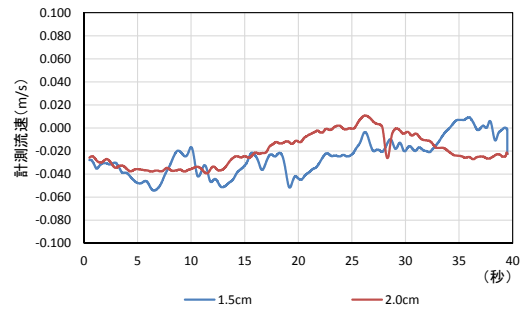
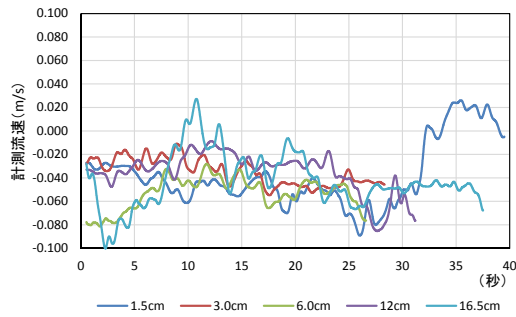
実験開始 32 分後 (流量ピーク)



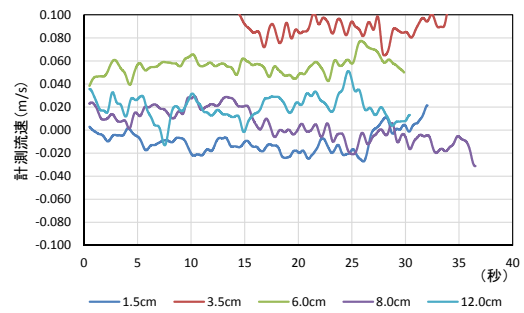
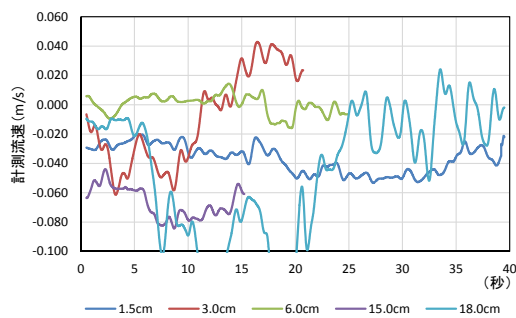
実験開始 44 分後 (水位ピーク)

図 3.4-11 超音波ドップラー式三次元精密流速計による流速計測結果

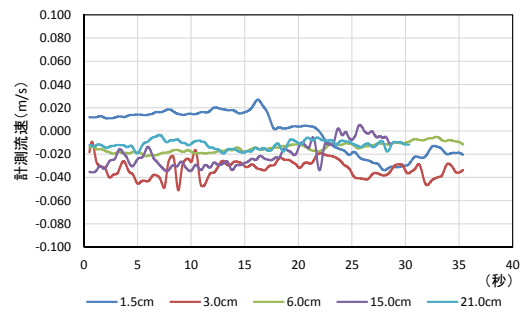
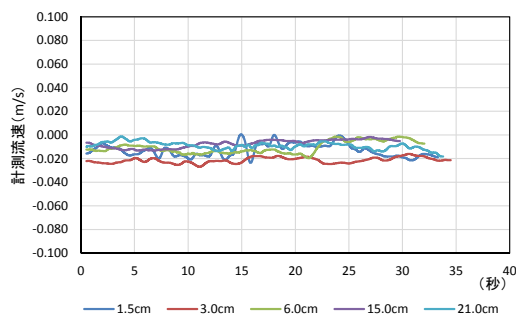
(左 : 2.8km 地点, 右 : 3.0km 地点)



実験開始 20 分後 (流量上昇期)



実験開始 32 分後 (流量ピーク)



実験開始 44 分後 (水位ピーク)

図 3.4-12 超音波ドップラー式三次元精密流速計による流速計測結果
フーリエ級数による平滑化处理 (左 : 2.8km 地点, 右 : 3.0km 地点)

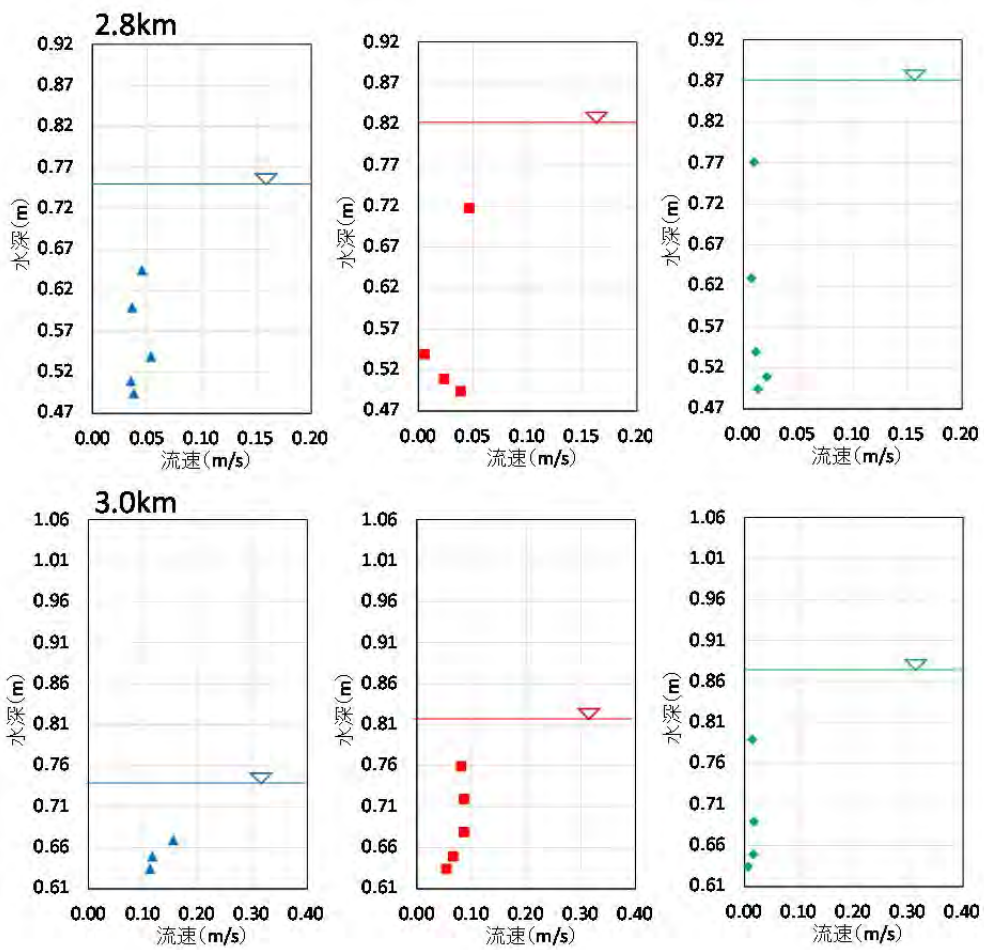
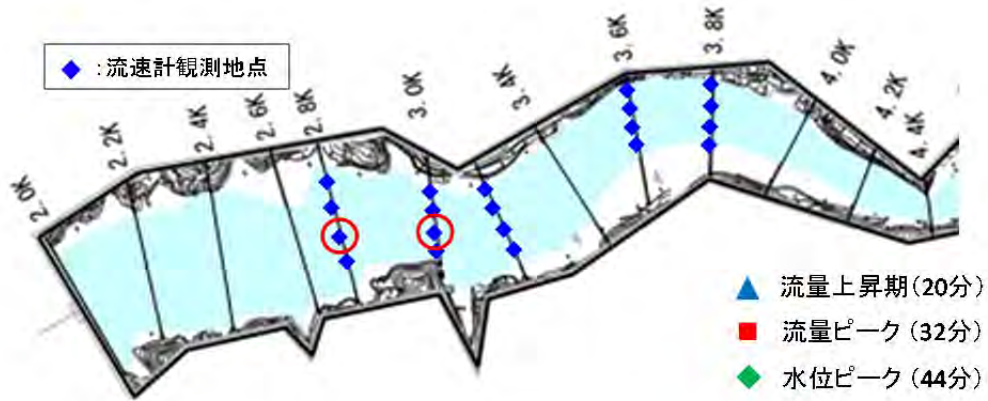


図 3.4-13 計測流速の鉛直分布

(4) ダム貯水池における洪水流下特性分類

以上の結果を踏まえ、ダム貯水池内の流動を、洪水流下特性に応じて分類した。ダム貯水池では、図 3.4-14 に示す様に貯水池上流区間、貯水池上流区間と下流の湛水区間の間にある遷移区間、貯水池下流の湛水区間の 3 つの特徴的な区間に分けられる。なお、これらの区間は、流入する洪水流の規模、波形特性、貯水位の相対関係により変化するものである。

第一の貯水池上流区間では、上流河川から慣性力の強い洪水流が流入し、これが貯水池内で地形性の大きな平面渦を形成しながら流下する。第二の遷移区間では、流下方向の水深、川幅の増大や、貯水池河岸の微地形により、複数の平面渦が相互に干渉しながら流下する特徴を有している。第三の湛水区間では、洪水流の流速が小さく、流れが停滞する区間である。

特に遷移区間では、大きな運動量を持った上流域からの流れが遷移区間に流入する。この区間は、貯水池内の流れ構造を規定する重要な区間であり、平面的な水面の広がりに加え、河床勾配の大きな変化により、底面付近で流速が小さくなり、流速の鉛直分布が非平衡状態となることで特徴的な三次元流れを形成することが明らかとなった。ダム貯水池内の遷移区間、湛水区間を流下する洪水流は、貯水池の地形変化と遷移区間の非平衡流れにより、縦横断的、時間的に流速分布を変化させながら流下する。このため、貯水池内の流動現象を詳細に評価するには、貯水池内の三次元的な流動機構の評価が必要となる。

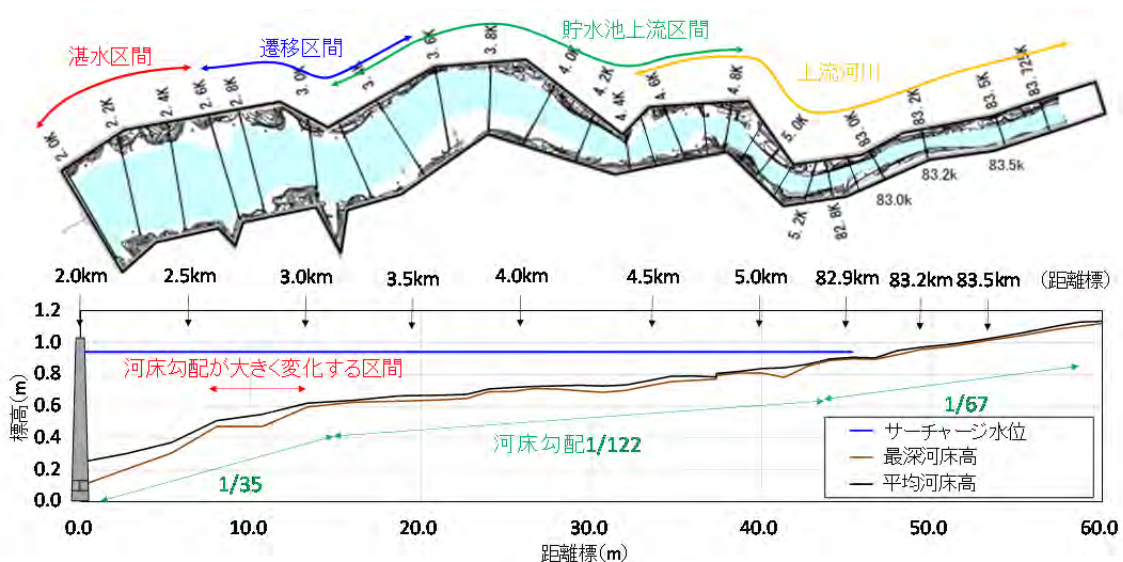


図 3.4-14 貯水池内の地形特性と区間分け

3.5 大規模洪水を対象とした水理実験

ダム貯水池内に流入する洪水流の流動は、貯水池特性（湛水領域の大きさ、縦横断的な河道形状）や、流入洪水の特性により複雑に変化する。ここでは、草木ダムに計画流量以上の大洪水が発生した場合を想定し、貯水池内で発生する洪水流の流動機構について計測し、分析を行う。

3.5.1 実験条件

(1) 実験条件

大規模洪水を対象とした実験では、中規模洪水を対象とした実験と同様に、H25.9洪水波形（現地流量 $1,000\text{m}^3/\text{s}$ ）を対象に、ピーク流量が $2,200\text{m}^3/\text{s}$ になるように引き伸ばして設定する。なお、草木ダムの計画流量は $1,880\text{m}^3/\text{s}$ であり、本実験で対象とする洪水規模は、流量確率で約 $1/200$ となる大規模洪水である。通水時間は、中規模洪水を対象とした場合と同じ条件とすると、貯水位はサーチャージ水位を超え、非常用洪水吐きからの放流が必要となる。このため、本検討では、通水時間を $2/3$ に引き縮めることで、ピーク水位がサーチャージ水位相当となる様に調整している。初期湛水位は、草木ダムの夏季制限水位相当し 0.74m とする。また、放流量ヒドログラフは、草木ダムの放流操作に準じて設定しており、洪水後は、夏季制限水位まで貯水位を下げるため、一定量放流を行う。

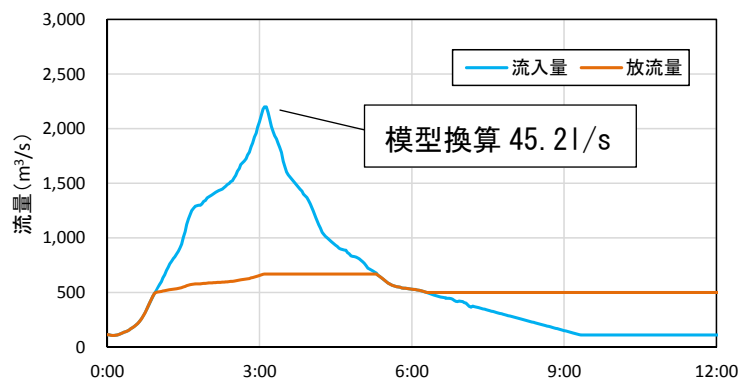


図 3.5-1 流入量、放流量ヒドログラフ（大規模洪水）

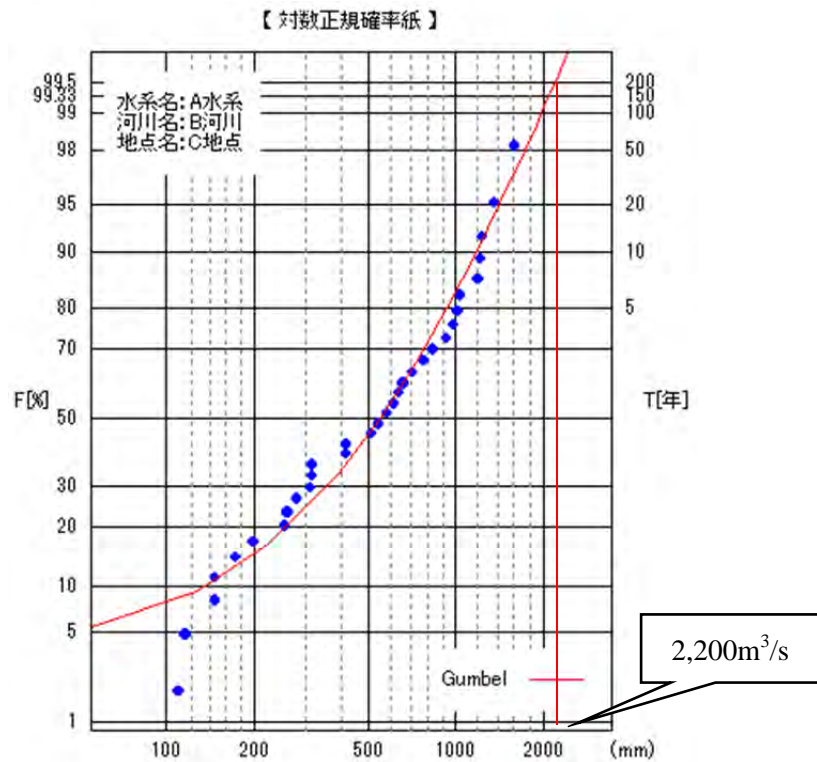


図 3.5-2 大規模流量の設定

(2) 計測体制

図 3.5-3 に計測位置の平面図を示す。計測項目は、水位、流入量、放流量である。水位はポイントゲージ、量水標（堤体部）、上流端の流入量、下流端の放流量は電磁流量計により計測する。大規模洪水を対象とした水理実験では、中規模洪水を対象とした水理実験と比較して、貯水池内の流動が大きく、縦横断的な水位変化が発生するものと想定される。本実験では、縦断的な水位変化だけでなく、大きな平面渦が発生する 3.4km～3.8km の区間において、横断的な水位変化の計測を実施している。

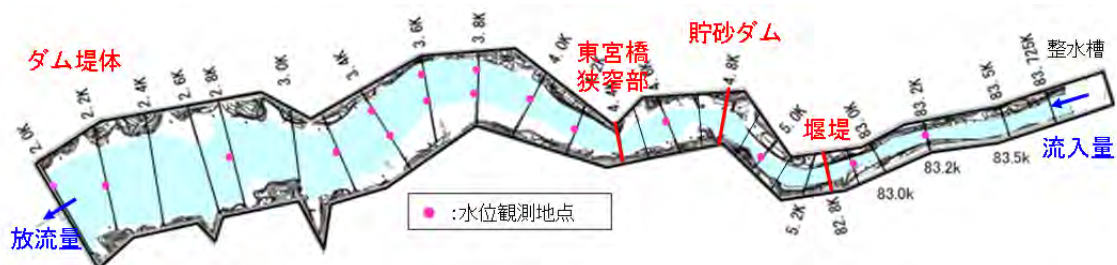


図 3.5-3 計測位置

3.5.2 実験結果

図 3.5-4 に計測水位縦断図とダム堤体付近の貯水位との水位差を示す。流量上昇期（実験開始 12 分，19 分）は，4.0km より下流の区間において貯水池内の水面がほぼ水平になっており，湛水領域が形成されている。この区間の平面流況を見ると，大規模洪水時においても流速は小さく，洪水流が停滞する。一方，4.0km～5.0km 付近までは縦断的に水面勾配を有しており遷移領域となっている。大規模洪水時は，中規模洪水と比較して洪水規模が大きいため，貯水位が高くなっており，堰堤付近まで湛水領域が形成される。堰堤より上流の区間では，通常の河川と同様に洪水が流下する。ダム堤体付近の貯水位と各地点の計測水位差を比較すると，全体的に，ダム堤体付近の貯水位より各地点の計測水位の方が低い。この要因については，第 4 章で詳述する。

図 3.5-5 に，3.4km，3.6km，3.8km 流動部における左右岸の水位差を示す。3.4km 地点では，左右岸の水位差に大きな差は見られない。一方，3.6km 地点，3.8km 地点では，流量上昇期（実験開始 12 分，19 分）において，最大で約 6mm 右岸側の水位が高くなる。この地点は，洪水流が 3.6km 付近の外岸部で水衝部となり，主流と逆流に分けられる区間である。この様に，3.6km 付近の外岸部では，平面渦を含む複雑な流況を形成し，局所的な水位上昇が発生している。

以上より，大規模洪水時では，遷移領域における流動が，中規模洪水時と比較して大きく，貯水池内で特徴的な水位分布を形成していることが明らかとなった。なお，大規模洪水時における貯水池内の水位分布や流動特性については，第 4 章で詳述する。

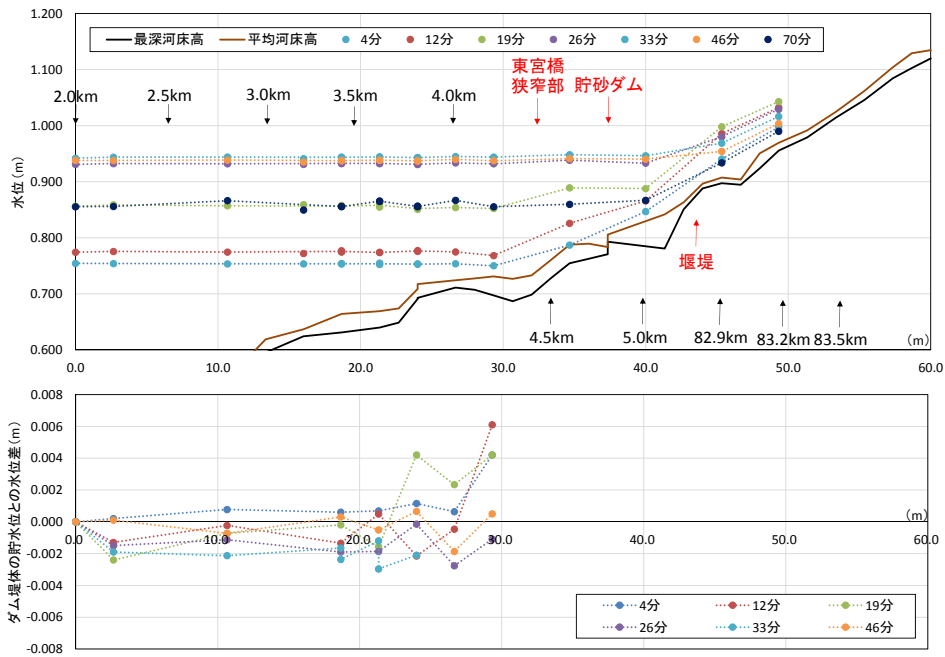


図 3.5-4 計測水位縦断図とダム堤体付近の貯水位との水位差

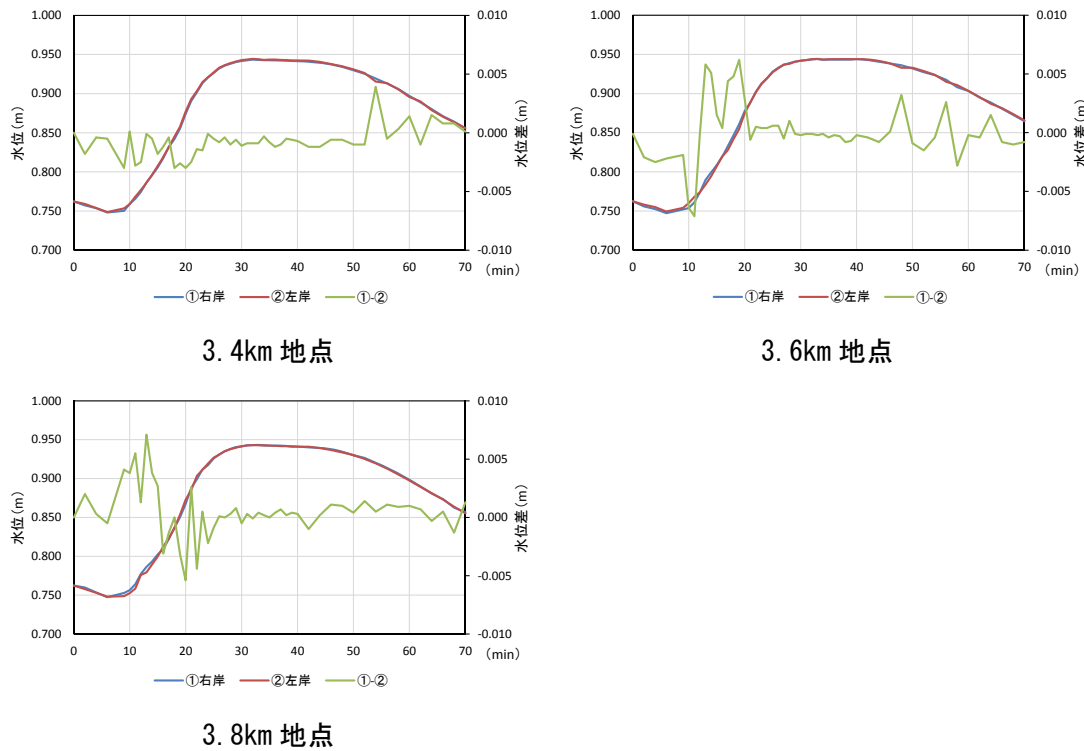


図 3.5-5 3.4km, 3.6km, 3.8km 流動部における左右岸の水位差

3.6 まとめ

本章では，ダム貯水池内の洪水流動の実態を把握するため，現地ダムにおける洪水観測と大型水理模型実験から，ダム貯水池内の洪水波形の伝播機構やダム貯水池内の洪水流動について分析した．以下に，実験結果から得られた知見をまとめて示す．

- ・ 現地ダムで得られた観測データから，ダム貯水池内の水位波形の伝播特性について分析した．その結果，上流河川から貯水池へ流入する洪水流は，遷移領域で水位波形を大きく変形し，湛水領域ではほぼ水平に貯水位が上昇することを示した．また，現地観測では水位波形の伝播特性については分析可能であるが，貯水池内の流速や流動等のデータ収集は難しく，十分な分析が困難なことを示した．
- ・ ダム貯水池内の洪水流動の実態を明らかにするため，ダム貯水池の大型水理模型に洪水流を流下させ，貯水池内の洪水流動を詳細に計測した．その結果，ダム貯水池内の洪水流動は，貯水池上流区間，貯水池上流区間と湛水区間の間にある遷移区間，貯水池下流の湛水区間の3つの特徴的な区間に分けられることを示した．
- ・ 第一の貯水池上流区間では，上流河川から慣性力の強い洪水流が流入し，これが貯水池内で地形性の大きな平面渦を形成しながら流下する．第二の遷移区間では，流下方向の水深，川幅の増大や，貯水池河岸の微地形により，複数の平面渦が相互に干渉しながら流下する特徴を有している．第三の湛水区間では，洪水流の流速が小さく，流れが停滞する区間である．
- ・ 遷移区間では，平面的な水面の広がりに加え，河床勾配の大きな変化により，底面付近で流速が小さくなり，流速の鉛直分布が非平衡状態となることで特徴的な三次元流れを形成することを示した．

以上より，ダム貯水池内の遷移区間，湛水区間を流下する洪水流は，貯水池の地形変化と遷移区間の非平衡流れにより，縦横断的，時間的に流速分布を変化させながら流下することが明らかとなった．このため，貯水池内の流動現象を詳細に評価するには，貯水池内の三次元的な流動機構の評価が必要であり，第4章で底面の非平衡流れを考慮した準三次元貯水池流動解析法を構築し，計測値と解析から定量的な議論を行う．

参考文献

- 1) 矢野勝正, 芦田和男, 高橋保: 境界条件による洪水流の変形に関する研究 (第 1 報), 京都大学防災研年報第 8 号, pp.257-270, 1965.
- 2) 芦田和男, 高橋保: 境界条件による洪水流の変形に関する研究 (第 2 報), 京都大学防災研年報第 9 号, pp.579-591, 1966.
- 3) 高橋保: 河道における洪水流特性に関する研究, 京都大学博士論文, 1971.
- 4) 流量観測の高度化マニュアル (高水流量観測編) Ver1.1, 独立行政法人土木研究所, 水害・リスクマネジメント国際センター, 2015.
- 5) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 京都大学防災研年報第 5 号, pp.252-259, 1962.