

## 論文の内容の要旨

水路床や水路断面特性が流れ方向に一様でない一般的な水路において、流れは水路床形状や横断面形状の流れ方向の変化特性の影響を受け不等流となり、上流から与える流量あるいはフルード数次第では流れの状態が常流から射流に、または射流から常流に遷移する。このような水面形遷移を有する流れにおいては、水面形を表す基本式の中に含まれる特異点が有限の近傍にある条件で解析しなくてはならない。一方、非静水圧を考慮しなければならない現象として、水路床や水路断面形状の変化、境界抵抗の非一様性により開水路流れには波状跳水と呼ばれる水面が滑らかに上昇する接続部を持ち、接続部より下流側には定在波列が存在する特徴を持つ水面形がある。未だ射流から常流の遷移問題の工学的解明が十分とは言えず、通常不等流の水面形と定在波を伴う不等流の統一した基本式は存在しない。

縮流部のある開水路実験から、流量を増大させる過程において縮流部上流側から段波が発生して更に上流側に伝播することを確認した。不等流の水面形は静的な過程と見なせるものとはかなり異なるダイナミックな過程である。形成された水面形について、開水路断面形状の非一様性によって生じる不等流の水面形は **Bernoulli** の定理を用い、上流端フルード数と水路形状の関係よりその成立破綻条件を解析的に明らかにすることによって前述の段波や跳水の発生範囲を解析的に求めた。同様の方法と手順により、非一様床(凸部を有する)開水路においても各種水面形の存在範囲を解析的に明示した。その結果を計 110 ケースの実験結果との比較よりその妥当性を検証している。また、**H. Rouse** の実験 (1940 年代前半)からもその妥当性を証明している。

流れが常流・射流間の遷移・非遷移する水面形解析解をもとめた。その解析は特異点付近の水面形を求めるため、扱う流れ区間が短く、摩擦を考慮しないものとする。基本式は水深に関する非線形の式でありかつ上述のような流れの状態が遷移する特異点が存在するため、人間が直接解析的に解くことはほぼ不可能である。本研究では数式処理システムを援用しつつ、非一様水路幅(縮流部)及び非一様水路床(凸部)をもつ開水路不等流水面形の解析解を求めた。解析解より、常流から常流への水面形、射流から射流への水面形、射流から常流への水面形、常流から射流への 4 つの遷移あるいは非遷移の水面形を表すことができるものであることを示した。本解析解結果もまた開水路実験より検証し、1940 年代前半に **H. Rouse** によって行われた実験の水面形に適用し、高い精度で実験結果を説明できた。

射流から常流への遷移流れ場問題の工学的解明をめざし、開水路流れにおける運動量の定理から流線の曲率による鉛直加速度を考慮した水面形方程式を提案すると共にその解の特徴を示した。水面の曲率及び水路床の曲率による鉛直方向の加速度の効果を検討した非静水圧分布流れ場として解析した。さらに、流れ場は乱流場であることを考慮し、乱流による運動量の輸送効果を加えたより厳密な運動量の定理を適用した。定在波を伴う場合の水面形も表現できる一元化した普遍的な不等流の水面形の基本式を導出した。実験水路で起こした波状跳水を伴う不等流水面形の再現性を検証した。導出した基本方程式は高精度であり、十分合理的妥当なものであることを検証した。

## 論文審査の結果の要旨

### 1. 博士学位請求論文

開水路断面の不均一性に起因する不等流の水面形形成に関する基礎的研究

### 2. 論文審査結果の要旨

(当該分野での位置づけ, 論文構成, 独自性及び成果, 課題, 評価等)

水面形が遷移する流れにおいて, 水面形を表す基本式の中に含まれる特異点が有限の近傍にある条件で解析しなくてはならない. その代表的な解析法として, 岩佐のトポロジ的な数学を用いた特異点理論を応用し, 特異点近傍の水面形特性を定性的に特定できる. 岩佐の手法は水面形自身の具体的な解析というよりは水面形形成の数学構造の解明に議論の中心がおかれているきらいがある. 非静水圧流れ場において水路床や水路断面形状の変化, 境界抵抗の非一様性により, 開水路流れには波状跳水と呼ばれる水面が滑らかに上昇する接続部を持ち, 接続部より下流側には定在波列が存在する特徴を持つ水面形がある. これらについては, 多くの先駆的な研究がなされてきたが, 未だ射流から常流の遷移問題の工学的解明が十分とは言えず, 通常不等流の水面形と定在波を伴う不等流の統一した基本式は存在しない. 以上の水理学をめぐる歴史的展開に続き, 本研究では水理学の基礎をより盤石にすると共に, 開水路不等流の水面形に関する次元解析法の精緻化を目指して実施したものである. 論文の構成とそれらに基づく成果は下記のとおりである.

第1章では, 既往の研究を精査した上で本研究の目的及び研究全体の体系について述べている.

第2章では, 縮流部のある開水路実験より, 不等流水面形はダイナミックな段波の過程を経て形成されることを再現している. 形成された水面形について, Bernoulli の定理を用い, 上流端フルード数と水路形状の関係よりその成立破綻条件を解析的に明らかにすることによって各種水面形の存在範囲を解析的に明示した. その結果を計 110 ケースの実験結果との比較によりその妥当性を検証している. また, H. Rouse の実験からもその妥当性を証明している.

第3章では, 水面形を定量的解析的に求めている. 本解析結果についても開水路実験において検証しており, 1940 年代前半に H. Rouse によって行われた実験の水面形を適用し, 高い精度で実験結果を説明できている.

第4章では, 射流から常流への遷移流れ場問題の工学的解明をめざし, 開水路流れにおける運動量の定理から流線の曲率による鉛直加速度及び乱流による運動量の輸送効果を考慮した水面形方程式を提案すると共にその解の特徴を示している. 導出した基本式は, 定在波を伴う場合の水面形も表現できる一元化した普遍的な不等流の水面形の基本式と言える.

第5章では, 結語として, 全体の研究成果を総括している.

以上, 上記いずれの成果も理論解析をベースとした新しい解析結果と解析手法が得られている. 特に, 波状跳水を伴う不等流は実際の河川において発生している現象であり, 波状跳水の波峰の水深は共役水深で求める跳水の水深より大きく超過することが示されている. これについては河川計画, 防災の実務において非常に重要な意味を持つものであるが, これまでの実務で考慮されていないという点を本論文では指摘しており, 非常に意味のあるものである.

これらのことから本博士学位請求論文は水理学及び河川工学において新規の知見を得た内容であり, 実用上も重要な貢献をしていると認める. さらに, 口述試問による試験の結果も踏まえ, 審査員一同は銭潮潮氏の博士学位請求論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと判断した.