

学 位 論 文 題 名

Structure Formation in Circular Hydraulic Jumps:
Numerical Studies of Largely Deformed Free-surface Flows

(円形跳水における構造形成：界面の大変形を伴う流れの数値的研究)

学位論文内容の要旨

跳水とは、射流 (早い流れ) から常流 (遅い流れ) に遷移する時に現れる水位の不連続のことである。跳水は古くから河川の設計などの実用的要請から、また界面ダイナミクスの研究対象として多くの研究者により研究されている。しかし、この現象を解析するためには、境界層と界面、更に界面の大変形を同時に扱わなければならない。そのため、現象の解析的、数値的扱いは非常に困難であり、その理解はほとんど進んでいない。そこで、本論文では跳水現象の中でも最も扱が容易であると考えられる中程度のレイノルズ数の円形跳水 (乱流の効果を含まない) に注目し、近年、発達した様々な数値計算手法を駆使することにより、跳水現象の解明に取り組む。ここで、円形跳水は、蛇口からの流水が水平板に衝突する時に、水平板上に形成される円形の水位の不連続が跳水である。円形跳水は、河川などで形成される跳水よりシンプルであるが、構造の転移など跳水現象が持つ重要な性質の多くを共有している。円形跳水の研究による跳水現象の基礎的な理解は、応用面においても重要な役割を果たすと考えられる。

円形跳水の実験は、Niels Bohr 研究所の C. Ellegaard 等のグループにより行なわれている。この実験において、跳水の外側の水位を変化させることにより、大きく分けて 2 種類の流れの構造、Type I と Type II、が形成される。Type I と Type II は、表面渦 (Roller) を伴っている (Type II) か、いない (Type I) かにより判別される。本論文では、このような流れの構造がどのようにして形成されるかを調べる。

この現象を数値的に解析するためには、界面の大変形を扱う必要があるため多くの困難を伴う。そこで、界面の複雑な扱いを避けるために、界面を陰的に扱う数値計算法により計算モデルを構築した。具体的には、C-CUP (Cubic interpolated propagation Combined Unified Procedure) 法、level set 法、CSF (Continuum Surface Force) モデルを組合せ用いることにより構築した。C-CUP 法は、高精度な混相流の計算手法である。本計算において、液相だけでなく気相も含めて計算することにより、界面に流体力学的な境界条件を課す必要がなくなる。level set 法は、移動境界を扱うための方法である。本計算では、level set 関数に距離関数を用いているため、表面張力の計算に必要な曲率の計算を精度良く計算できる。また、この方法は界面のトポロジーの変化にも対応できるため、表面渦を伴う跳水の解析に都合がよい。CSF モデルは、表面張力を体積力として計算する表面張力のモデルである。これら 3 つの方法を組み合わせた計算モデルを用い、軸対象を仮定した 2 次元

(r-z) のシミュレーションを行なった。そして、Type I, Type II の定常状態、Type I から Type II, Type II から Type I への構造転移の再現に初め成功した。

上の計算結果を解析した結果、以下のことが明らかになった。

- Type I から Type II への構造転移の原因：
Type I から Type II への界面プロファイル及び圧力分布の時間発展を調べた結果、跳水の周辺に圧力の上昇が観測され、その圧力上昇による圧力勾配が構造転移に対し重要な役割を果たすことが明らかになった。
- 跳水周辺での圧力上昇の理由：
定常状態での圧力分布と界面プロファイルの関係を調べた結果、跳水周辺の曲率に比例して、圧力が強くなっていることが分かった。圧力は、表面張力 (表面張力は曲率に比例) に比例することから、圧力の上昇は表面張力によるものであることが明らかになった。
- Roller が維持される理由：
Type II の定常状態での圧力を調べた結果、Roller の上部と下部の 2 箇所には圧力上昇が観測された (Type I では 1 箇所)。また、Roller の消滅する過程 (Type II から Type I への転移過程) を調べることにより、Roller の維持に対しても、圧力の上昇による圧力勾配が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 西 浦 廉 政
副 査 教 授 神 保 秀 一
副 査 教 授 儀 我 美 一
副 査 教 授 津 田 一 郎

学 位 論 文 題 名

Structure Formation in Circular Hydraulic Jumps: Numerical Studies of Largely Deformed Free-surface Flows

(円形跳水における構造形成：界面の大変形を伴う流れの数値的研究)

跳水とは、射流(早い流れ)から常流(遅い流れ)に遷移する時に現れる水位の不連続のことである。跳水は古くから河川的设计などの実的要請から、また界面ダイナミクスの研究対象として多くの研究者により研究されている。しかし、この現象を解析するためには、境界層と界面、更に界面の大変形を同時に扱わなければならない。そのため、現象の解析的、数値的扱いは非常に困難であり、その理解はほとんど進んでいない。そこで、申請者は跳水現象の中でも最も扱いが容易であると考えられる中程度のレイノルズ数の円形跳水(乱流の効果を含まない)に注目し、近年発達した様々な数値計算手法を駆使することにより、跳水現象の解析に取り組んだ。ここで、円形跳水は、蛇口からの流水が水平板に衝突する時に、水平板上に形成される円形の水位の不連続のことである。円形跳水は、河川などで形成される跳水より単純であるが、構造の転移など跳水現象が持つ重要な性質の多くを共有している。円形跳水の研究による跳水現象の基礎的な理解は、応用面においても重要な役割を果たすと考えられる。

円形跳水の実験は、Niels Bohr 研究所の C. Ellegaard 等のグループにより行なわれている。この実験において、跳水の外側の水位を変化させることにより、大きく分けて2種類の流れの構造、Type I と Type II、が形成される。Type I と Type II は、表面渦(Roller)を伴うか(Type II)、伴わないか(Type I)により判別される。申請者は、このような流れの構造がどのようにして形成されるかを調べた。

跳水現象を数値的に解析するためには、界面の大変形を扱う必要があるため多くの困難を伴う。そこで、界面の煩雑な扱いを避けるため、界面を陰的に扱う数値計算法により計算モデルを構築した。具体的には、C-CUP (Cubic interpolated propagation Combined Unified Procedure) 法、level set 法、CSF (Continuum Surface Force) モデルを組合せ用いることにより構築した。C-CUP 法は、高精度な混相流の計算手法である。本計算において、液相だけでなく気相も含めて計算することにより、界面に流体力学的な境界条件を課す必要が

なくなる。level set 法は、移動境界を扱うための方法である。本計算では、level set 関数に距離関数を用いているため、表面張力の計算に必要な曲率の計算を精度良く計算できる。また、この方法は界面のトポロジーの変化にも対応できるため、表面渦を伴う跳水の解析に都合がよい。CSF モデルは、表面張力を体積力として計算する表面張力のモデルである。これら3つの方法を組み合わせた計算モデルを用い、軸対称性を仮定した2次元(r - z)のシミュレーションを行なった。そして、Type I, Type II の定常状態、Type I から Type II, Type II から Type I への構造転移の再現に初めて成功した。

申請者は、上の計算結果を解析することにより以下のことを明らかにした。

- Type I から Type II への構造転移の原因：
Type I から Type II への界面プロファイル及び圧力分布の時間発展を調べた結果、跳水の周辺に圧力の上昇が観測され、その圧力上昇による圧力勾配が構造転移に対し重要な役割を果たすことが明らかになった。
- 跳水周辺での圧力上昇の理由：
定常状態での圧力分布と界面プロファイルの関係を調べた結果、跳水周辺の曲率に比例して、圧力が強くなっていることが分かった。圧力は、表面張力(表面張力は曲率に比例)に比例することから、圧力の上昇は表面張力によるものであることが明らかになった。
- Roller が維持される理由：
Type II の定常状態での圧力を調べた結果、Roller の上部と下部の2箇所に圧力上昇が観測された(Type I では1箇所)。また、Roller の消滅する過程(Type II から Type I への転移過程)を調べることにより、Roller の維持に対しても、圧力の上昇による圧力勾配が重要な役割を果たしていることが明らかになった。

以上の結果は、現在まで、解析が困難であるがゆえに経験則による理解しか得られていなかった跳水現象の構造形成に対し新しい知見を与えるものであり、その意義は大きい。よって、申請者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格あるものと認める。