

と、流線の曲率による非静水圧分布を考慮した非静水圧流れ場に運動量の定理を適用し、乱流による運動量輸送効果を加えたより普遍的な開水路不等流の基本式を提案した。

- (2) 提案した基本式は分散項，拡散項，底面の曲率による非静水圧を考慮しない場合は水理学の教科書に紹介される通常の開水路不等流の基本式である。また，右辺がなければ左辺が積分可能になり三階微分がなくなることにより，定在波が発生しないことから，右辺の抵抗や水路勾配（水路の断面形状と境界面抵抗特性の非均一性）はまさに定在波を発生させる原因であることが分かる。
- (3) 導出した微分方程式の解として求められる跳水前後の共役水深関係は従来の代数式から求まる解析解と非常に高い精度で一致する。上流端の Fr が大きくなるにつれ，波状跳水（定在波），強跳水の水面形になり，共役水深関係もより解析解に近づく傾向がある。
- (4) 開水路実験により，下流側の境界条件を用いないが，導出した定在波を伴う不等流の基本式が高い精度で水面形を表現することが可能であることが検証された。
- (5) 開水路流れは水路の非一様な断面形状及び抵抗特性に起因し，定在波が生じる。開水路の定在波が生じた場合の最大水深は定在波の波峰となり，定在波を考慮しない不等流の最大水深より大きいことが分かる。河道特性によっては河川計画，防災の観点から，定在波を伴う不等流の水面形を正しく見積もる必要がある場合も存在することが考えられる。

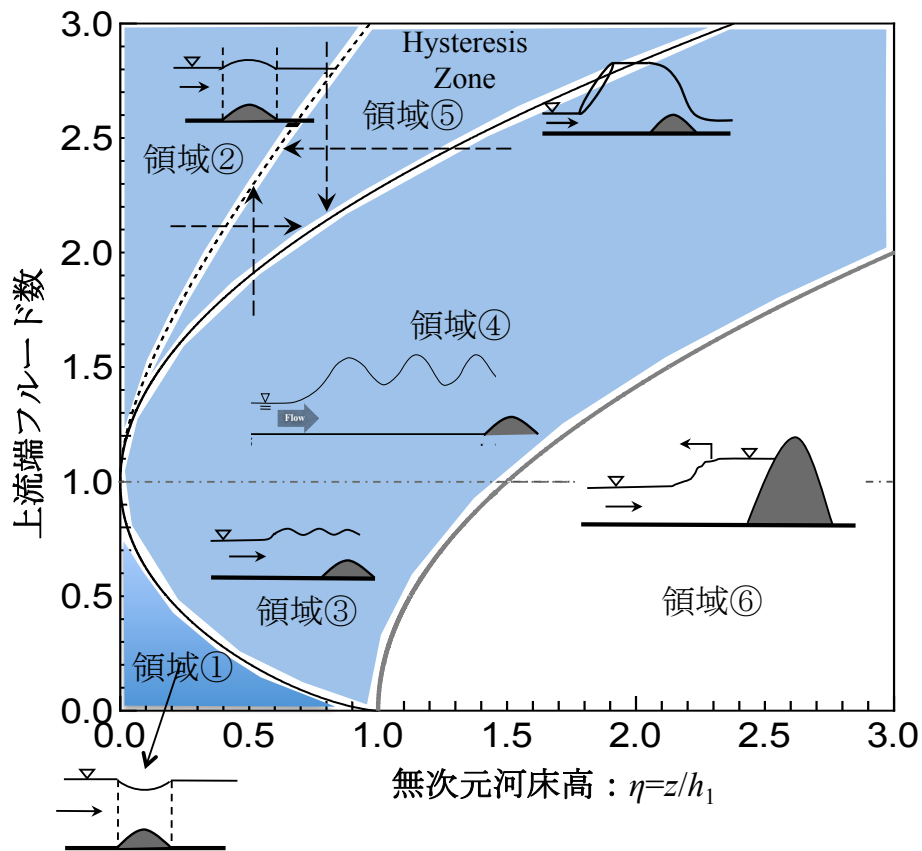


図 4-7 本研究で提案する普遍的な不等流の基本式の解析対象となり得る
不等流水面形の存在範囲

参考文献

- 1) Boussinesq, P. J.: Essai sur la théorie des eaux courantes. Imprimerie Nationale, Paris. 1877.
- 2) Iwasa, Y. and Kennedy, J. F.: Free surface shear flow over a wavy bed. Journal of Hydraulic Division, ASCE. Vol. 94(3): 431-454. 1968.
- 3) 細田尚・多田彰秀：鉛直加速度を考慮した基礎式による開水路流れ定在波の水面形解析，水工学論文集，第 38 巻：457-462. 1994.
- 4) 細田尚・Manojkumar LANGHI：簡易な水深積分モデルによる跳水部の水面形の再現解析について．土木学会論文集 B1（水工学）. Vol.69. No.4：I_833-I_888. 2013.
- 5) Whitham, G.B.: Linear and Nonlinear Waves. John Wiley and Sons: 431-484. 1974.
- 6) Benjamin, T. B. and Lighthill, M. J.: On Cnoidal waves and bores. Proceedings of the

Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 224, No. 1159: 448-460. 1954.

- 7) Benjamin, T. B.: Verification of the Benjamin-Lighthill conjecture about steady water waves. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 295: 337-356. 1995.
- 8) Chanson, H. and Montes, J.S.: Characteristics of undular hydraulic jumps. Experimental apparatus and flow patterns, *Journal of hydraulic engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 2: 129-144. 1995.

第5章

結語

第5章 結語

本研究は水理学の最も根幹的な基礎の一つである不等流の水面形に関する解析的な研究である。水理学は数千年の発展を経て、特に18世紀中葉以降の Bernoulli(及びその一家), Manning, Darcy, Bazin, Bresse, Kelvin, Boussinesq, Rayleigh, Böss, Stokes, Korteweg, de Vries, G.I. Taylor, Lighthill, Lemoine 等が非常に精力的に幅広い先駆的な研究を行い、水理学の確固たる基礎を築いた。その後第2次世界大戦前後には水理学の名著の発行に代表されるように、水理学は近代的な系統化され、学問の全体像がそのときから形成されたと言われている。日本においての本格的な水理学の発展はまさに20世紀30年代の物部博士や本間教授に代表される先駆者の出現である。いずれの先駆者も水面形に関する研究は学問及び実務の両面において不可欠な重要さから、多くの研究をされた。

本論文は、人類が水の制御と利用の方法に関する学問の一つの重要な根幹である開水路不等流水面形を対象としたものである。静水圧仮定が可能な流れ場において開水路の断面形状に起因する不等流水面形の特徴を解析的に解明すると共に、非静水圧流れ場における高精度な波状跳水を伴う不等流水面形をも解析可能な基本式を導出し、停滞する基礎水理学に関する研究を促進することを目的としたものである。導出した解析解や基本式を直線矩形水路実験及び「近代水理学の父」と追われたアイオワ大学教授であった H. Rouse 教授 (1906-1996) の実験水面形により検証した。本研究全体を通じ、得られた主な成果を以下にまとめる。

第1章では、開水路水面形に関する水理学の歴史的流れを振り返り、本研究の位置づけを明確にした。また、研究の目的を達成するための論文構成、概要を明示した。

第2章では、不等流の水面形は必ず不定流の過程を経て形成されることが実験によって確認し、流量が上昇過程においては非一様水路床断面をもつ開水路において上流側に伝播する段波が発生する。時間と共に段波が消え不等流の水面形が形成される。段波の通過点は大きな水深がもたらされる。不等流の形成過程から、不等流は不定流と対等の独立した現象ではなく、不定流の特殊な状態である。つまり、不定流の一種であると考えられる。

非一様断面区間前後において、Bernoulli の定理を適用し、上流側フルード数と不等流の形成原因である形状ファクター（無次元河床高 η 及び縮流部の縮流率 ε ）との関係を明らかにし、水面形の存在範囲に関する包括的な解析をしている。Bernoulli の定理の破綻条件を解析的に導出し、破綻する条件を跳水は発生限界とし、上流側のフルード数と無次元凸部高さ及び水路縮小率の関係より見られる跳水の有無を軸とした各種水

面形の存在範囲を解析的に明示した。理論的に導いた跳水・段波の発生領域を水路実験及び H. Rouse 教授の実験映像から解析した結果で検証し、整合性が高いことを示し、本解析手法による各種水面形の存在範囲の合理性を示した。本解析結果の包括性と便利さから、本解析結果を参照しつつ本論文の他の章で扱う種々の水面形に関する解析を行った。

第3章では、Man-Machine システムを利用して、非一様断面形状をもつ開水路流れの不等流水面形の非線形基本式の解析解を導出し、開水路の断面形状に起因する不等流水面形の特性を解析的に解明した。開水路実験の結果及び H. Rouse 教授(1906-1996)の実験結果との比較により導出した解析解の合理性を検証した。不等流解析解を実験水路で計測した水面形で検証した結果、本研究で導出した解析解は実験結果とよく整合していることが分かった。本研究で導出した解析解より、流れの状態が常・射流遷移・非遷移のいずれの場合でも解析的に説明することができる。Rouse 教授の実験結果との比較から、数値的な解析では比較的難しい遷移水面形においては特に整合性が高いことが分かった。導出した解析解は十分厳密であると言えよう。そのことは停滞する基礎水理学の研究に一石を投じることとなることを念頭においた。本章の解析的アプローチによる不等流の非線形支配方程式の解析解を求めた。

第4章では、水面定在波及び水路床の曲率が水深内において Boussinesq 流の一次線形近似の仮定のもと、流線の曲率による非静水圧分布を考慮した非静水圧流れ場に運動量の定理を適用し、乱流による運動量輸送効果を加えたより普遍的な開水路不等流の基本式を提案した。非静水圧流れ場において波状跳水(定在波)を伴う不等流水面形の基本式を導出し、その特徴を詳細に調べた。

提案した基本式は分散項、拡散項、底面の曲率による非静水圧を考慮しない場合は水理学の教科書に紹介される通常の開水路不等流の基本式。また、右辺がなければ左辺が積分可能になり三階微分がなくなることにより、定在波が発生しないことから、右辺の抵抗や水路勾配(水路の断面形状と境界面抵抗特性の非均一性)はまさに定在波を発生させる原因であることが分かる。導出した微分方程式の解として求められる跳水前後の共役水深関係は従来の代数式から求まる解析解と非常に高い精度で一致する。上流端の Fr が大きくなるにつれ、波状跳水から強跳水の水面形になり、共役水深関係もより解析解に近づく傾向がある。

開水路実験により、下流側の境界条件を用いないが、導出した波状跳水を伴う不等流の基本式が高い精度で水面形を表現することが可能であることが検証された。

上記いずれの成果も理論解析をベースとし新しい解析結果や解析手法が得られてお

り、必ず直ちに全ての研究結果が実用に結びつくことは難しいであろう。しかし、その中の波状跳水を伴う不等流は実際の河川に起きる現象であり、波状跳水の波峰の水位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は表 4-1 及び図 4-4 より分かる。本来無視できるようなものではなく、河川計画、防災の実務において非常に重要な意味を持つことは明らかであるにもかかわらず、これまでの実務では考慮されていない。最後に、本研究は基礎水理学の発展の流れにあることを念頭におきつつ少しでも基礎水理学の更なる発展に寄与できれば深甚である。

謝辭

謝辞

本論文は中央大学理工学部都市環境学科教授山田正先生のご指導により取りまとめたものです。著者は学部4年から6年間にわたり山田先生に多くの懇切なるご指導、御鞭撻を頂きました。研究の方法やその意義のみならず学問に対する考え方、研究者としての心構えや情熱、哲学などについて親身なるご教授を頂戴しました。公私と共に著者の成長を最大限に促して頂いたことに深甚なる感謝の意を表します。

埼玉大学大学院理工学研究科教授田中規夫先生、中央大学研究開発機構教授福岡捷二先生、中央大学理工学部数学科教授小林良和先生、中央大学理工学部都市環境学科教授檜山和男先生、大下英吉先生におかれましては本学位論文の副査として非常に多くの貴重なご意見ばかりではなく、著者の今後の研究生活にとっても有益なご助言ご指導を頂きました。ここに紙面を借りて厚く御礼を申し上げます。

水理研究会において、本研究について多くの議論する機会を頂き、福岡先生、田中先生、東京大学社会基盤学科准教授知花武佳先生をはじめ、諸先生及び学生諸君からご助言を頂いたことに深謝致します。

米国イリノイ大学土木環境工学科(Dept. of CEE, UIUC)教授 Gary Parker 先生は著者にイリノイ大学 Ven Te Chow Hydrosystems Laboratory への Visiting Scholar として短期留学の素晴らしい機会を与えて頂き、基礎研究の重要性を指摘して頂くと共に数多くの有益なご助言を頂きました。ここに記して御礼申し上げます。

新潟大学自然科学研究科環境科学専攻准教授安田浩保氏、独立行政法人土木研究所水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) 専門研究員の本永良樹氏には本研究の遂行にご助言のみならず、著者が所属する研究室の先輩として多くのご指導を頂きました。研究者、教育者としての姿勢や後輩、学生の指導に関しても多くのことを教わったことに深謝致します。

本論文を完成するために、著者の後輩として本論文に欠かせない水理実験に全力で協力をして頂いた笠間雄一郎氏をはじめ、多くの後輩学生諸氏に助力を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

また、学校法人中央大学、独立行政法人日本学生支援機構、公益財団法人高山国際教育財団、文部科学省には経済面から長年にわたって著者の留学生生活を強力に支援して頂いたことに深謝する次第であります。

これまで私の勉学に常に心から応援をして頂いた両親に心から感謝を申し上げます。最後に、著者の留学のきっかけから作って頂き、この最高の勉学研究の機会を与えて頂いただけではなく、11年間の長きにわたって全ての面においていかなる状況下でも著

者を全身全霊で支えて頂いた叔父, 叔母及び二人の従兄弟には心から最深の感謝を表します.