



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Formation of Cyclic Steps by Water on Ice Surface [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	WU, Zhuyuan
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15621号
Issue Date	2023-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90839
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	WU_Zhuyuan_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 WU Zhuyuan

審査担当者 主 査 教 授 泉 典洋
 副 査 教 授 渡部 靖憲
 副 査 准教授 岩崎 理樹

学位論文題名

Formation of Cyclic Steps by Water on Ice Surface

(氷表面上に流れる水によるサイクリックステップの形成)

サイクリックステップは、その上下流に跳水を伴う長波長河床形態である。ステップの上流側では流れは Froude 的な亜臨界流 (常流) であるが、下流側に向かって加速し超臨界流 (射流) となる。このようなステップは、地球上の河川、海底、氷上、火星の氷冠など、さまざまな環境で観察することができる。本研究では、氷上に形成されるサイクリックステップに焦点を当てる。氷上のサイクリックステップの形成と特徴を理解することは、温度変化、流れの特徴、形態などの寒冷地環境に関する知識を深めることにつながる。さらに、将来人類に多くの選択肢を提供するための宇宙探査の研究にも役立つ可能性がある。火星の氷冠上のサイクリックステップは風によって形成されるが、風による流れの平衡状態を知ることは困難であるため、本研究では氷上の水の流れによって形成されるサイクリックステップについて取り扱う。

第 1 章では本研究の背景および既往研究との関連や本研究の目的について述べている。

第 2 章では問題の定式化を行っている。本研究では、氷上を流れる水によって形成されるサイクリックステップの形成を再現する解析モデルを提案する。平坦な氷の表面を流れる定常かつ一様な超臨界流状態を想定し、この流れによって氷の表面が不安定になり、その結果、一連のステップが自然に形成される。この形成過程には、力学的過程と熱力学的過程の両方が含まれる。水温は氷温より高く、気温より低いと仮定する。モデルは、水深平均を取った流れの運動方程式および連続式、熱の移流拡散方程式に加えて、熱収支による氷表面の凝固・融解の方程式 (Stefan 方程式) の 4 つの方程式から構成される。ステップのない等流状態を基にして全ての変数の正規化を行う。さらに、氷表面の変化は非常にゆっくり起こるため、流れの方程式は定常と近似できることから、支配方程式に準定常の仮定を適用する。実験的観察に基づき、その形状を維持したまま上流に移動するサイクリックステップを仮定する。このような氷上の周期的なステップの特徴を記述するために、移動座標系を導入する。さらに操作を加えると、支配方程式は正規化された 3 つの一階微分方程式となり、それを解くためには対応する境界条件が必要になる。流れは跳水によって超臨界領域から亜臨界領域へと遷移する。したがって、各跳水の前後で運動量保存が適用できる。さらに、氷床の高さと水深平均水温は跳水の前後で一定であると仮定する。しかし、これらの境界条件のみでは問題を閉じることはできず、波長を決定できない。解析から、跳水下流端において取り得る水温の最小値が最も長い波長に対応することが明らかとなり、最長の波長が選択されるという仮定を用いて解析を行なった。

第 3 章は問題の解法について記述している。第 2 章で定式化した 2 点境界値問題を Newton-

Raphson スキームを用いたシューティング法で解く。計算は、特異点を避けるために Froude 臨界点 (Froude 数が 1 である点) よりわずかに離れた点から開始し、上流方向および下流方向に向かって行う。計算によって、1 ステップにわたる水深平均水温および水深平均流速、底面高さの分布を再現することができる。さらに、等流状態での水深が分かれば実際のステップのスケールを求めることができる。このモデルによって計算された結果をこれまでの実験結果と比較し、モデルの妥当性を検証する。

第 4 章では解析によって得られた結果を示すとともに結果に対する考察を行っている。氷上に周期的なステップが形成される過程を説明することが可能となり、空気や水、氷の熱伝達容量、等流 Froude 数、波長の間の関係を示すことができた。また、解析で得られたステップを実験結果と比較し、モデルの妥当性を検証した。また、氷上に形成されるサイクリックステップと混濁流によって形成されるサイクリックステップの間に存在する共通点と相違点について考察を行なった。この 2 つのタイプのサイクリックステップについて、定式化および形成プロセス、波長、各パラメーターの関係について比較を行った。

第 5 章では以上の結果を結論としてまとめている。

これを要するに、著者は氷上を流れる水によって形成されるサイクリックステップの形成プロセスを説明するための理論的なモデルを提案し、サイクリックステップの波長や形状を理論的に導くことに成功した。また、実験によって得られたサイクリックステップの波長とある程度良好な一致を見ている。寒冷地や地球以外の天体では氷が地形を形成することも多いが、本研究は様々な氷地形形成メカニズムを解明するための基礎的な知見を得るための重要な試みであり、河川工学・理論地形学の進展に寄与するところ大である。よって著者は北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格があるものと認める。