

## 学位論文題名

## 矩形断面返しベンド内の凍結熱伝達に関する研究

## 学位論文内容の要旨

凝固を伴う伝熱問題は、自然現象として、水道管や発電用送水管の凍結破壊、船体への着氷、地盤の凍上、河川の凍結などに見ることができる。また、工業的には、冷房・冷凍機器にみられる蒸発管など、熱交換器まわりの着霜・着氷現象、相変化物質（PCM）を用いた潜熱蓄熱装置、鉄鋼製造プロセスにおける金属の凝固、生鮮食品の凍結保存などに深く関与している問題である。

管内の凍結現象は、静止水の凍結と主流を伴う凍結とに大別される。静止水の凍結過程においては、水温が $0^{\circ}\text{C}$ 以下の状態に冷却されても凍結しない、いわゆる過冷却現象が生じ、流体輸送管などの凍結破壊と密接に関連している問題である。近年では、電力需要を平準化する対策として、氷蓄熱システムに対する関心が高まり、水溶液の過冷却凝固に関する研究が盛んに行われている。また、主流を伴う場合の管内凍結現象に関しては、直行流路を対象として、凍結挙動の把握、ならびに凍結閉塞条件についての検討がなされている。また近年、配管系の事故が生じた場合、外部より急冷することにより、人工的に凝固閉塞させ、これにより補修工事を行う試みがなされているが、このような凍結工法は、凍結現象を有効利用した一例として注目されている。一般に、流水を伴う管内の凍結層は、流れ方向に縮小・拡大を繰り返す、いわゆるアイスバンド構造となることが知られている。このように凍結層が形状変化する原因については、定性的な推測に基づく議論の段階にあり、凍結面上の流動状態を測定した報告はなされていない。さらに、凍結を伴う場合の熱伝達特性についての報告例は、非常に少ないのが現状である。

一方、曲がり管は、熱交換を目的とした各種工業機器や、流体輸送の配管系統において必要不可欠な部位であるため、化学工業を始めとして多くの分野で用いられている。近年では、医学分野における動脈硬化の病例が、血管曲がり部で多くみられるとの報告より、血管内流れに関する生体工学的見地からの研究も開始されている。曲がり管内の流体には遠心力が作用するため、直管の場合と比較して複雑な挙動を示すことが知られている。最近では、電子計算機の発達に伴い、数値実験も多くなされ、また、レーザ・ドップラ流速計（LDV）の普及も加わり、曲がり管内の流動挙動もかなり明らかになっている。しかしながら、曲がり管内の流動および熱伝達挙

動については、管断面形状や曲率半径など多変数の条件下で変化するため、個々の場合の解析結果ならびに実験データの集積はあるものの、統一的知見を得るには到っていない。さらに、凍結層の発生など、凝固を伴う場合の複合伝熱問題として、曲がり管内の熱伝達機構を解明することを目的とした研究は非常に少ない。

このように、管内凍結現象および曲がり管の流動特性に関しては、別個の問題として研究がなされているが、曲がり管内の凍結現象を伝熱工学的立場より明らかにした研究は非常に少ない。さらに、流水を伴う冷却管内に成長する凍結層が、流れ方向に凹凸状へと形状変化する原因については、不明な点が残されている。

このような現状に基づき、本論文では、管内凍結現象と曲がり管内流れの複合問題を解明するため、矩形断面を有する返しベンドの凍結現象を検討したものである。返しベンド内の凍結現象を観察し、凍結を伴う場合の熱伝達機構を明らかにするとともに、流水のある冷却管内に観察される凍結の不安定現象の発生原因を検討することを目的としている。

本論文は、8章より構成されている。第1章は序論であり、曲がり管内の凍結挙動に関する研究の意義を述べている。

第2章では、管内凍結挙動、曲がり管内流れ、および管内層流化現象に関する従来の研究について述べるとともに、本研究の目的および位置づけを明らかにしている。

第3章では、曲がり管内の凍結挙動を明らかにするため、矩形断面を有する返しベンドを用いて、凸面のみ冷却した場合の返しベンドにおける凍結挙動および熱伝達挙動について実験的に検討している。返しベンド内の流れは、遠心力の影響により、最大軸方向速度の位置が流れ方向に沿って凸面側から凹面側へと移動するため、このような流動特性が返しベンド内の凍結挙動に大きな影響を及ぼすものと考えられる。本章では、返しベンド凸面上に成長する定常状態における凍結挙動を把握し、これら凍結挙動に及ぼす流速および冷却温度比の影響について検討を行い、さらに、凍結を伴う場合の熱伝達特性に及ぼす、流速、冷却温度比、および流路高さの効果について明らかにしている。

第4章では、返しベンド凹面のみ冷却した場合の凹面における凍結挙動および熱伝達挙動について実験的に検討している。従来より、凹壁面上の境界層内には、流れ方向に軸を有する縦渦列が形成されることが知られているが、これら渦列が凍結層の面性状に及ぼす影響について検討するとともに、冷却凹面上に形成される凍結層を観察し、さらに、流速、冷却温度比、および曲率半径の各因子が凍結熱伝達に及ぼす効果について明らかにしている。

第5章では、返しベンド凹凸両曲面をともに冷却した場合の凍結挙動および熱伝達挙動について実験的に検討している。凹凸それぞれの冷却面上における凍結挙動を観察し、これら凍結挙動

に及ぼす、流速ならびに流路高さの影響について実験的に検討を行い、さらに凍結を伴う場合の熱伝達挙動に及ぼす各因子の効果について明らかにしている。

第6章では、従来より報告されている、管内流動水が凍結する際の不安定現象について実験的に検討している。強制対流下における複雑な管内の凍結現象は、凍結層の成長に伴い、流動状態が変化し、これにより熱伝達の変化が生じるというように、凍結層、流動状態、および熱伝達の三者が相互に関連し、凍結層の形状変化が誘発される。本章では、このような冷却管内に観察される凍結の不安定現象が、どのようなメカニズムにより発生するのかを明らかにするため、管内に成長する凍結層界面上の流動挙動を、レーザ・ドップラ流速計（LDV）を用いて測定することにより、凍結層が形状変化を開始する初期原因について検討している。

第7章では、返しベンドの凍結実験より得られたデータをもとに、凍結を伴う場合の平均熱伝達率に対する実験整理式を提案している。返しベンドの凍結熱伝達挙動に及ぼす因子の効果に関する実験的検討、および次元解析による無次元数の導入により、平均熱伝達率に対する実験整理式を求めている。また、得られた実験整理式により、返しベンドにおける凍結閉塞条件を算定し、その妥当性について検討している。さらに、返しベンドを蓄冷熱機器として利用する場合の蓄冷熱量を検討し、これに対する実験整理式を提案している。

第8章は結論であり、本研究において得られた結果を要約して述べたものである。凍結を伴う場合の熱伝達特性に関する本研究結果は、凝固を伴う強制対流下の伝熱問題に新たな指針を与えることを述べている。

## 学位論文審査の要旨

主査	教授	福迫	尚一郎
副査	教授	木谷	勝
副査	教授	石黒	亮二
副査	教授	落藤	澄

本論文は、矩形断面を有する返しベンド内の凍結挙動を観察するとともに、凍結熱伝達に関して実験的検討を行ったものである。凝固を伴う伝熱問題は、水道管や発電用送水管の凍結破壊、地盤の凍上、河川の凍結などの自然現象に見い出すことができる。また、工業的には、冷房・冷凍機器に見られる蒸発管など熱交換器まわりの着霜・着氷現象、相変化物質（PCM）を用いた

潜熱蓄熱装置，鉄鋼製造プロセスにおける金属の凝固，生鮮食品の凍結保存などに深く関与している。

本論文では，管内凍結現象と曲がり管内流れの複合問題を解明するため，矩形断面を有する返しバンドの凍結現象を検討したものである。返しバンド内の凍結現象を観察し，凍結を伴う場合の熱伝達機構を明らかにするとともに，流水のある冷却管内に観察される凍結の不安定現象の発生原因を検討し，その結果を8章にまとめている。

第1章は序論であり，曲がり管内の凍結挙動に関しての研究の意義を述べている。

第2章では，管内凍結挙動，曲がり管内流れ，および管内層流化現象に関する従来の研究について述べるとともに，本研究の目的および位置づけを明らかにしている。

第3章では，曲がり管内の凍結挙動を明らかにするため，矩形断面を有する返しバンドを用いて，凸面のみ冷却した場合の返しバンドにおける凍結挙動および凍結熱伝達挙動について実験的に検討している。返しバンド凸面上に成長する定常状態における凍結挙動を把握し，これら凍結挙動に及ぼす流速および冷却温度比の影響について検討を行い，さらに，凍結を伴う場合の熱伝達特性に及ぼす，流速，冷却温度比，および流路高さの効果を明らかにしている。

第4章では，返しバンド凹面のみ冷却した場合の凍結挙動および熱伝達挙動について実験的に検討している。凹壁面上の境界層内に発生する縦渦列が凍結層の面性状に及ぼす影響について検討するとともに，冷却凹面上に成長する凍結層を観察し，さらに，流速，冷却温度比，および曲率半径の各因子が凍結熱伝達に及ぼす効果について明らかにしている。

第5章では，返しバンド凹凸両曲面をととも冷却した場合の凍結挙動および熱伝達挙動について実験的に検討している。凹凸それぞれの冷却面上における凍結挙動を観察し，これら凍結挙動に及ぼす，流速ならびに流路高さの影響について実験的に検討を行い，さらに凍結を伴う場合の熱伝達挙動に及ぼす各因子の効果について明らかにしている。

第6章では，従来より報告されている，管内流動水が凍結する際の不安定現象について実験的に検討し，凍結層界面上の流動挙動を，レーザ・ドップラ流速計を用いて測定することにより，その発生メカニズムを明らかにしている。

第7章では，返しバンドの凍結実験より得られたデータをもとに，凍結を伴う場合の平均熱伝達率に対する実験整理式を提案するとともに，返しバンドを蓄冷熱機器として利用する場合の蓄冷熱量を検討し，これに対する実験整理式を提案している。

第8章は結論であり，本研究において得られた結果を要約して述べたものである。凍結を伴う場合の熱伝達特性に関する本研究結果は，凝固を伴う強制対流下の伝熱問題に新たな指針を与えることを述べている。

以上、これを要するに本論文は、従来不明であった曲がり管内の凍結熱伝達特性について検討を行い、凍結熱伝達に及ぼす諸因子の効果を明らかにするとともに、管内流動水凍結の不安定現象に関して有益な新知見を得ている。これらの成果は凝固を伴う強制対流下における伝熱問題に対して重要な指針を与えたものであり、伝熱工学に寄与するところ大である。よって、著者は、博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。