

学 位 論 文 題 名

着氷防除のための限界熱流束に関する研究

学位論文内容の要旨

冬期間の気温が氷点以下となる寒冷地域では、気流中に存在する微小な水滴が平衡凍結温度以下に冷却され、液体にとって物理学的に不安定な過冷却状態になる。さらに過冷却状態の液体は、物体との衝突に代表される外的要因により、凝固することが知られている。また対象液体が水の場合、この現象は気象学上、着氷と呼ばれる。着氷は自然現象の一つとして、冬期間の樹氷や霧氷に代表されるように、比較的身近に見られる現象である。しかしこれらは着雪と並び様々な被害をもたらすことが良く知られている。例えば、冬期間の北洋を航行する船舶に対する着氷は、甲板、手すり、および通信用アンテナなど、表面が暴露状態となるあらゆる箇所が生じる。これらは乗組員による人為的除氷作業を必要とし、危険な作業を強いることとなる。また確実に除氷を行えない場合、船体は重心を上昇させるだけでなく、風圧の授受面積を増大させるため、本来の復元能力を低下させる。そのため冬期間における船体への着氷は、転覆を引き起こす要因の一つとなっている。同様に航空機においては、地上待機時、低空を航行する離着陸時、あるいは過冷却雲中の飛行時に着氷を生じることが知られている。これらは安全航行に必要な操縦機器への動作障害、あるいは翼前縁部への付着による流体性能の低下を引き起こす。その結果、墜落の原因を誘引し、多くの人命を危険にさらすこととなる。さらに近年、自然エネルギーの有効利用の促進に伴い、風力発電への着氷被害が報告されている。タービンブレードへの着氷は、回転翼の空力性能を著しく低下させ、結果として獲得電力を減少させる。さらに付着氷により機器の重心が変化し、軸の偏心を引き起こすため、装置寿命の短縮化が問題となっている。また我々の日常生活に身近な被害としては、構造物や送電線に対する着氷が挙げられる。山岳地域の高周波装置、送信用アンテナなどへの着氷による被害は、日常生活に必要な情報伝達に障害を引き起こすため、大きな問題となっている。送電線への着氷は、付着氷の自重や見かけ面積の増加により、風圧を受けて容易に断線事故や鉄塔の崩壊を起こすことも良く知られている。これらの電気および電波通信機器類は、山頂付近や平地においても高所に位置していることが多く、それらの着氷防除は現在も人為的な除去作業に頼っており、莫大な費用と安全管理上、危険な作業の一つとなっている。このように着氷現象は、人命に関わる重大な事故を引き起こす要因とされており、産業分野においても経済的に莫大な損失を招くため、早急な防除策が必要とされている。

着氷防除に関しては、これまで様々な対策が検討され、いくつかの防除方法が試行されている。しかしながら確実に着氷を防除できる方法は確立されていないのが現状である。中でも熱工学的な観点からの防除方法として、着氷した付着面に熱を供給して、氷層を融解させる方法、あるいは予め雪氷が付着し得ない熱を供給して着氷を未然に防ぐ方法が、より確実に有効な手段と考えられる。しかし供給熱量が大きく、経済性の観点から一般の着氷防除手段としては、広く用いら

れていないのが現状である。これらの状況を考慮すると、最も確実な着氷防除手段と考えられる熱供給方式において、その供給熱量を必要最低限度に抑えることが可能であるならば、エネルギーコストを考慮した上で、特定の防除対策物に対しては、利用価値が高くなると考えられる。さらに現在、一部の地域で太陽光発電や風力発電のような、自然エネルギーによって得られる電力を用いた熱供給方式による着氷雪防除方法が、試験的に採用されている。これらのシステムを設計する上で、防除に必要な最低限度のエネルギー供給量を定量的に把握することは、重要な課題の一つである。

以上のような現状に基づき、本研究は熱供給方式による着氷防除方法に着目し、これまで詳細な検討が行われていない着氷限界時のメカニズムの解明、および着氷防除システムの構築に必要な伝熱工学的資料を得ることを目的としている。まず着氷防除の検討に先立ち、着氷時の過冷却凝固現象を想定した単一液滴の過冷却凝固実験を行った。次に噴霧液滴を含む寒冷気流中に水平に置かれた細線に対して、着氷防除のための最小限度の熱流束に関する実験的検討を行った。また限界熱流束供給時の熱収支に関する解析モデルを構築し、着氷限界熱流束および熱伝達特性を解析的に検討した。加えて限界熱流束を供給し、氷点以上に保たれた物体近傍の液膜を対象として、熱伝達特性に関する数値シミュレーションを行った。

本論文は、全7章より構成されている。第1章は序論であり、着氷現象に代表される過冷却を伴う相変化現象の諸問題の解明に関して、その研究の意義について述べた。

第2章では、着氷に関する従来の研究、ならびに過冷却凝固の制御という観点より行われている液滴凝固の研究を紹介している。一方、着氷防除に関しては、多岐の分野における取り組み、および施行されている防除方法を紹介し、それぞれの特徴を述べた。さらに本研究の位置付けと目的を示した。

第3章では、着氷現象の最も単純化した状態を想定し、物体に置かれた液滴の凝固過程について実験的な検討を行った。特に着氷防除の基礎資料とするため過冷却状態からの凝固現象について詳細な観察を行い、過冷却凝固時の熱伝達特性に関する検討を加えた。

第4章では、実際の着氷現象を考慮し、噴射液滴を混濁した寒冷気流中に、着氷物体として白金細線を水平に保持し、その細線表面に着氷が生じない最小限度の熱流束について気流温度、気流速度、細線径、および液滴径をパラメータとした実験を行い、定量的な最適加熱条件を得た。また着氷限界時の熱伝達特性についても検討した。

第5章では、第4章の実験結果に基づき、細線に対して噴射液滴の直径分布を考慮し、さらに種々の仮定を基に限界時の熱収支を考慮した解析モデルを構築し、様々な条件下における着氷限界熱流束の予測を試みた。さらに実験結果と比較することにより本解析の妥当性を検討した。

第6章では、先の第4章の結果に基づき、着氷限界時に凝固せずに物体表面において形成される液膜が、付着面と周囲空気により加熱と冷却を同時に受けて、複雑な熱伝達挙動となることに着目し、境界適合座標系を用いた数値解析シミュレーションを行った。なお解析は液膜を単純化した状態として、物体表面に置かれた単一液滴を対象とした。解析では液滴の温度条件により生じる水の密度逆転現象、および表面張力差に基づくマランゴニ対流を含めた伝熱特性についても検討を行った。

第7章は、結論であり、本研究で得られた結果を要約して述べた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 池 川 昌 弘
副 査 教 授 宮 本 登
副 査 教 授 工 藤 一 彦
副 査 助 教 授 山 田 雅 彦

学 位 論 文 題 名

着氷防除のための限界熱流束に関する研究

着氷現象は、船舶や航空機の安全運行の障害、送電線の断線や鉄塔の倒壊など、重大な事故を引き起こす要因とされており、防除策が必要とされている。着氷防除に関しては、着氷した付着面に熱を供給して、氷層を融解させる方法、あるいは予め雪氷が付着し得ない熱を供給して着氷を未然に防ぐ方法が、確実に有効な手段と考えられる。しかしながら供給熱量が大きく、経済性の観点から、一般的な着氷防除手段としては、広く用いられていないのが現状である。これらの状況を考慮すると、その供給熱量を必要最小限度に押さえることが可能であるならば、特定の防除対策物に対しては、本方式の利用価値が高くなると考えられる。さらに現在、一部の地域で太陽光発電や風力発電のような、自然エネルギーによって得られる電力を用いた熱供給方式による着氷雪防除方法が、試験的に採用されている。これらのシステムを設計する上で、防除に必要な最低限度のエネルギー供給量を定量的に把握することは、重要な課題の一つである。

以上のような現状に基づき、本研究は熱供給方式による着氷防除方法に着目し、これまで詳細な検討が行われていない着氷限界時の伝熱メカニズムの解明、および着氷防除システムの構築に必要な伝熱工学的資料を得ることを目的としている。

本論文は、全7章より構成されている。第1章は序論であり、着氷現象に代表される過冷却を伴う相変化現象の諸問題の解明に関して、その研究の意義について述べている。

第2章では、着氷に関する従来の研究、ならびに過冷却凝固の制御という観点より行われている液滴凝固の研究を紹介している。一方、着氷防除に関しては、多岐の分野における取り組み、および施行されている防除方法を紹介し、それぞれの特徴を述べてるとともに、本研究の位置付けと目的を示している。

第3章では、着氷現象のもっとも単純化した状態を想定し、物体に置かれた液滴の凝固過程について実験的な検討を行っている。特に、着氷防除の基礎資料とするため、過冷却状態からの凝固現象について詳細な観察を行い、過冷却凝固時の熱伝達特性に関する検討を加えている。

第4章では、実際の着氷現象を考慮し、噴射液滴を含んだ寒冷気流中に、着氷物体とし

て白金細線を水平に保持し、その細線表面に着氷が生じない最小限度の熱流束について、気流温度、気流速度、細線径、および液滴径をパラメータとして実験を行い、定量的な最適加熱条件を導いている。また、着氷限界時の熱伝達特性についても検討を行っている。

第5章では、第4章の実験結果に基づき、細線に対して噴射液滴の直径分布を考慮した着氷限界時の熱収支解析モデルを構築し、様々な条件下における着氷限界熱流束の予測を試み、実験結果と比較することにより解析モデルの妥当性を検証している。

第6章では、先の第4章の結果に基づき、着氷限界時に凝固せずに物体表面において形成される液膜が、付着面と周囲空気により加熱と冷却を同時に受けるために、複雑な熱伝達挙動となることに着目し、境界適合座標系を用いた数値解析シミュレーションを行っている。解析モデルは、液膜を単純化した状態として、物体表面に置かれた単一液滴を対象としている。解析では、液滴の温度条件により生じる水の密度逆転現象、および表面張力に基づくマランゴニ対流を含めた伝熱特性についても検討を行い、興味深い結果を得ている。

第7章は結論であり、本研究で得られた結果を要約して述べている。

これを要するに、本研究は、着氷防除の最も一般的な方法である熱供給方式に着目し、種々の径の液滴を含む気流による着氷現象を詳細に解明することにより、必要最小限の供給熱量を把握するための新しい伝熱工学的資料を提供しており、着氷工学、伝熱工学に貢献するところ大なるものがある。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あるものと認める。