

学位論文題名

着氷挙動に関する伝熱工学的研究

学位論文内容の要旨

寒冷地では、気流中を飛翔する水滴により、構造物や樹木に着氷現象がみられる。山岳地の樹木に生じる霧氷は、冬期間の風物詩として知られているが、送電線や送電塔にも着氷や着雪が発生し、その重量および気流抵抗の増加により停電の要因となる場合がある。さらに、着氷現象は、航空機の翼やプロペラへの着氷など工業的に障害となる場合が多いが、その中においても北洋を航行する船舶に生じる着氷、いわゆる船体着氷は、最も重要な着氷問題といえる。船体着氷は、海水の飛沫により起こり、人身事故を伴う重大な海難事故の要因となる。そのため、これまでに、実船による観測的研究が多くなされているが、船体着氷は、しぶき発生の原因となる海面状況、船速、気温、海水温度、および風速などの因子が関与する複雑な現象であり、着氷に関与する個々の因子の効果および凍結機構については不明な点が多い。さらに、海水などの水溶液が凍結する場合、氷層内部に不凍部分を含み、純水が凍結する場合とは異なることが知られており、着氷挙動はさらに複雑なものになることが推察される。

また、着氷の生成過程は、気流中における液滴と気流との熱伝達過程、および物体上での凍結熱伝達過程に大別できるが、上述したように、気流中における液滴条件、気流条件、および付着する物体の表面形状など非常に多くの因子が関与し、着氷挙動の解明を困難にしている。そのため、まず着氷挙動の最も基礎となる、物体表面上における液滴の凍結挙動につき詳細に検討する必要がある。物体上における液滴の凍結では、液滴と周囲との熱移動に加え、気流との自由表面を有するために、液滴の変形および表面張力の影響などが生じ、容器内の凍結挙動とは異なる。特に、水溶液滴の凍結では、表面張力が濃度により変化するため凍結挙動に影響を与えることも考えられる。

さらに、着氷による被害を低減するための着氷防除方法に関しては、様々な試みがなされているが、確立された対策はなされておらず、現在、着氷が発生した場合には人手によりハンマーなどで主に除去している。着氷防除に最も有効な対策は、構造物の表面を加熱することであり、経済的な面からは、着氷が発生しない最少の加熱を行なうことが必要とされる。気流と液滴の二相流中における表面加熱時の熱伝達挙動は物体上の液滴の挙動が熱伝達に大きく影響を及ぼすことが知られているが、着氷が発生しない限界における物体まわりの熱伝達挙動については報告されていない。

一方、微細な液滴は、液体の体積に比して冷却される表面積が大きく気流により冷却されやすいなどの特性を利用し、一般には障害の要因となる着氷現象を工業的に応用することが考えられる。海水などの水溶液が着氷した場合、氷層は純氷と高濃度の水溶液にて構成されており、氷層を収集することによりリキッドアイス(氷粒と水溶液の混合物)を迅速かつ連続的に得ることができる。リキッドアイスは、流動性を持ち伝熱管との伝熱特性が良いため、最近、蓄冷熱空調システムの新たな蓄冷熱材とし

て注目されているが、水溶液の凍結・融解は、温度および濃度拡散が関与するため、その挙動は非常に複雑なものとなり、最適なリキッドアイス生成法はいまだ確立されていない。

このような現状に基づき、本研究では、寒冷気流中に置かれた物体まわりの着氷機構を明らかにするために、着氷現象の基礎となる冷却面上に置かれた液滴の凍結挙動および海水噴霧による水平円柱まわりの着氷挙動に関する実験的および数値解析的研究を行った。また、着氷しない限界の表面加熱時における円柱まわりの熱伝達挙動に関する詳細な検討を行い、平均熱伝達に関する無次元整理を行った。さらに、着氷現象を工業的に利用して、リキッドアイスの迅速生成を試み、蓄冷熱量に各因子が及ぼす影響について検討した。

本論文は、8章より構成より構成されている。第1章は、序論であり、着氷挙動に関する研究の意義について述べている。

第2章においては、着氷現象に関与する液滴の熱伝達挙動に関する従来の研究について述べるとともに、水溶液噴霧による着氷挙動、冷却面上の液滴の凍結挙動、および着氷限界における熱伝達挙動に関する詳細な検討がいままで行われていないことを示し、本研究の目的および位置づけを明らかにした。

第3章においては、非常に多くの因子が関与する着氷挙動の最も基礎となる、静止空気中および寒冷気流中における、冷却壁面上に置かれた純水および水溶液の単一液滴の凍結挙動について詳細に検討した。液滴の凍結挙動に及ぼす、液滴水溶液濃度、気流温度、冷却壁温度、および気流速度など各因子の効果について実験的検討を行うとともに、表面張力の効果を検討するために、下面より冷却される液滴内部の熱伝達挙動について数値解析を行なった。さらに、内部流動の可視化および凍結組織の観察を行い、各因子が凍結挙動に及ぼす効果および表面張力の影響について明らかにした。

第4章では、海水噴霧を伴う低温気流中に置かれた水平円柱まわりの着氷挙動に関して、着氷の因子である気流速度、気流温度、液滴温度、液滴径、および液滴流量を変化させた場合の、着氷形状、表面性状、および着氷量に及ぼす効果について詳細な実験的検討を行った。さらに、円柱まわりの塩分濃度を測定し、氷組織を観察することにより、純氷とは異なる不凍部分（ブライン）を含む着氷の挙動について検討を加えた。

第5章では、寒冷気流中に置かれた水平円柱に海水滴が着氷する現象に対し、熱・質量バランスに加え、氷層に含有される塩分（溶質）のバランスを考慮して解析モデルを提案し、数値解析による円柱上部の局所の氷層厚さおよび形状の推定、さらに氷層内塩分濃度の算定を行ない、各因子を変化させた場合の実験結果と比較検討することにより、本着氷モデルの妥当性を検討した。

第6章では、着氷防除対策として有効な手法である物体表面加熱時において、着氷が発生しない限界における局所および平均熱伝達挙動に関する詳細な検討を行った。海水噴霧を伴う低温気流中に置かれた水平円柱表面を通電加熱して、円柱表面の液滴の挙動を観察するとともに、着氷に関与する各因子が、着氷限界における加熱円柱周りの局所熱伝達挙動に及ぼす効果について実験的に検討し、平均熱伝達に関する無次元整理を行い、整理式を与えた。

第7章では、着氷現象の工業的利用として、水溶液が着氷した場合、氷層を収集することにより蓄冷熱材としてのリキッドアイスを得ることができることに着目し、低温気流中に水溶液を噴霧して、リキッドアイスを迅速に生成する方法を提案し、関与する基礎的事項について実験的に検討した。寒冷気流中に置かれた水平円柱上にプロピレングリコール水溶液を噴霧し、気流温度、気流速度、および液滴流量の各因子が生成挙動および蓄冷熱量に及ぼす効果について検討するとともに、リキッドアイス生

成率に関する整理式を示した。

第8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ものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 福 迫 尚一郎

副 査 教 授 飯 田 誠 一

副 査 教 授 工 藤 一 彦

副 査 教 授 石 川 迪 夫

学 位 論 文 題 名

着氷挙動に関する伝熱工学的研究

着氷現象は、航空機や地上構造物への着氷および北洋における船体着氷など、工業的に重大な障害となる場合が多い。着氷は、多くの因子が関与する複雑な現象であり、さらに海水などの水溶液が凍結する場合、水が凍結する場合とは異なることが知られているが、着氷の各因子が及ぼす効果は詳細に検討されていない。また、物体表面加熱が、最も有効な着氷防除方法であるが、経済的な面からは、着氷が発生しない最少の加熱を行なうことが必要とされ、その際の熱伝達挙動について明らかにする必要がある。一方、着氷現象を工業的に応用することが考えられ、水溶液噴霧により蓄冷熱材であるリキッドアイス（氷粒と水溶液の混合物）を得ることができる。

本論文は、寒冷気流中に置かれた物体まわりの着氷機構を明らかにするために、着氷現象の基礎となる液滴の凍結挙動、および海水噴霧による円柱まわりの着氷挙動に関する実験的および数値解析的研究を行い、さらに、加熱円柱まわりの着氷限界熱伝達挙動、および水溶液噴霧によるリキッドアイスの迅速生成に関する検討結果をまとめたものであり、8章より構成されている。

第1章は、序論であり、着氷挙動に関する研究の意義について述べている。

第2章においては、着氷現象に関与する液滴の熱伝達挙動に関する従来の研究について述べるとともに、水溶液噴霧による着氷挙動、冷却面上の液滴の凍結挙動、および着氷限界における熱伝達挙動に関する詳細な検討がいままで行われていないことを示し、本研究の目的および位置づけを明らかにした。

第3章においては、非常に多くの因子が関与する着氷挙動の最も基礎となる、静止空気中および寒冷気流中における、冷却壁面上に置かれた純水および水溶液の単一液滴の凍結挙動について詳細に検討した。液滴の凍結挙動に及ぼす、液滴水溶液濃度、気流温度、冷却壁温度、および気流速度など各因子の効果について実験的検討を行うとともに、表面張力の効果を検討するために、下面より冷却される液滴内部の熱伝達挙動について数値解析を行なった。さらに、内部流動の可

視化および凍結組織の観察を行い、各因子が凍結挙動に及ぼす効果および表面張力の影響について明らかにした。

第4章では、海水噴霧を伴う低温気流中に置かれた水平円柱まわりの着氷挙動に関して、着氷の因子である気流速度、気流温度、液滴温度、液滴径、および液滴流量を変化させた場合の、着氷形状、表面性状、および着氷量に及ぼす効果について詳細な実験的検討を行った。さらに、円柱まわりの塩分濃度を測定し、氷組織を観察することにより、純氷とは異なる不凍部分（ブライン）を含む着氷の挙動について検討を加えた。

第5章では、寒冷気流中に置かれた水平円柱に海水滴が着氷する現象に対し、熱・質量バランスに加え、氷層に含有される塩分（溶質）のバランスを考慮して解析モデルを提案し、数値解析による円柱上部の局所の氷層厚さおよび形状の推定、さらに氷層内塩分濃度の算定を行ない、各因子を変化させた場合の実験結果と比較検討することにより、本着氷モデルの妥当性を検討した。

第6章では、着氷防除対策として有効な手法である物体表面加熱時において、着氷が発生しない限界における局所および平均熱伝達挙動に関する詳細な検討を行った。海水噴霧を伴う低温気流中に置かれた水平円柱表面を通电加熱して、円柱表面の液滴の挙動を観察するとともに、着氷に関与する各因子が、着氷限界における加熱円柱周りの局所熱伝達挙動に及ぼす効果について実験的に検討し、平均熱伝達に関する無次元整理を行い、整理式を与えた。

第7章では、着氷現象の工業的利用として、水溶液が着氷した場合、氷層を収集することにより蓄冷熱材としてのリキッドアイスを得ることができることに着目し、低温気流中に水溶液を噴霧して、リキッドアスを迅速に生成する方法を提案し、関与する基礎的事項について実験的に検討した。寒冷気流中に置かれた水平円柱上にプロピレングリコール水溶液を噴霧し、気流温度、気流速度、および液滴流量の各因子が、生成挙動および蓄冷熱量に及ぼす効果について検討するとともに、リキッドアイス生成率に関する整理式を示した。

第8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ものである。

これを要するに、著者は、船体着氷など多くの障害となる一方、工業的に利用可能な着氷現象に対し、これまで検討されていなかった、冷却面上における液滴の凍結挙動、水溶液噴霧による円柱まわりの着氷挙動、および表面加熱時の着氷限界熱伝達挙動を明らかにしたものであり、着氷現象を予測・防除し、また工業的に利用するに際しての重要な基礎資料を提供し、多くの有用な新知見を与えており、伝熱工学の進歩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あるものと認める。