

|             |  |
|-------------|--|
| 氏 名         | やま かわ のり を<br>山 川 紀 夫                                  |
| 授 与 学 位     | 工 学 博 士  |
| 学位授与年月日     | 昭和49年4月10日   |
| 学位授与の根拠法規   | 学位規則第5条第2項   |
| 最 終 学 歴     | 昭和37年3月<br>東北大学工学部機械工学科卒業                              |
| 学 位 論 文 題 目 | 結霜時における熱および物質移動に関する研究                                  |
| 論 文 審 査 委 員 | 東北大学教授 大谷 茂盛 東北大学教授 前田 四郎<br>東北大学教授 武山 斌郎 東北大学教授 只木 楨力 |

## 論 文 内 容 要 旨

本論文は6章よりなっている。以下各章ごとにそれぞれの内容を概説する。

### 第1章 緒 論

一般に冷たい伝熱面に霜が付着し、それが生長すると伝熱効果は悪くなるといわれており、伝熱という観点からは霜層は一種の断熱材的要素を持つと考えられる。しかしこのような結霜現象は冷凍および冷蔵をはじめ、特殊空調用乾燥空気の製造、混合ガスの分離精製過程など各種工業でみられ、とくに最近では遠心分離法によるウランの濃縮精製過程などに応用され、急激に注目をあびつつある。

結霜現象は熱と物質の同時移動過程であり、さらに霜層の性状が複雑に影響する現象である。したがって、その解析にあたっては熱移動に対する物質移動の干渉、霜層表面の凹凸による境界

層の乱れ、および凹凸に伴う伝熱面積の増加、さらに霜層内空隙を通しての水蒸気の拡散による物質移動および熱移動などを考慮せねばならず、実験的にも理論的にも多くの困難をとまなう。

結霜過程における熱および物質移動を取り扱った報文としては、強制対流のもとでは二重管式熱交換器を用いた亀井・水料らの研究、また自然対流のもとでは結霜下における球まわりの熱移動を取り扱ったD. C. Holtenをはじめとし約20編を数える。しかしこれらの報告はデータの精度を左右する霜層表面温度の測定および熱収支などの検討において充分と思われるものが少なく、信頼性にとぼしい。したがって結霜時における熱および物質移動機構に関しては不明な点が多い。

本論文においては、結霜過程における熱および物質移動機構を解明し、装置設計上および操作上の基礎的資料を得る目的で、強制対流および自然対流のもとで、結霜時の熱および物質移動を実験および理論の両面から検討した。

## 第2章 上向きおよび下向き水平平板の強制対流下における結霜時の熱および物質移動

水平平板を用い強制対流下における結霜時の熱および物質移動に関して実験を行ない、空気・霜層表面間の局所熱伝達係数 $h$ および局所物質移動係数 $k_c$ などを測定し、それにおよぼすと考えられる種々の因子の影響について検討した。

実験に際しては一般固体の熱伝導度の測定法の一つである比較法の原理を応用した。すなわち伝熱板には厚いステンレス板を標準板として用い、その上に霜層を形成させた。実験精度を左右する霜層表面温度の測定に関しては、従来の方法を種々検討した結果、ここでは新たに(1)きわめて細い熱電対により気流中および境界層内の温度分布および温度変動をとらえ霜層表面温度を外挿するいわゆる境界層法、および(2)赤外線輻射温度計による2つの方法を併用し、信頼度の高い霜層表面温度を求めた。

気流の温度 $t_a$ 、湿度 $c_a$ 、速度 $u_a$ 、伝熱面温度 $t_w$ および伝熱面の向きを変え、それらの因子が霜層の厚さ $l_f$ 、密度 $\rho_f$ 、あるいは $h$ および $k_c$ などにどのような影響をおよぼすかを検討した結果、気流速度が遅く、湿度が高く、伝熱面温度が低い場合には厚い霜層が形成され、また気流速度が速く、気流温度、湿度および伝熱面温度が高い場合には霜層の密度は大きくなることがわかった。また霜層の厚さ、付着重量および霜層密度の経時変化より、霜はその生成過程において層表面だけでなく、霜層内部でもかなりの量の霜が形成されていることが推察された。

熱および物質移動速度は時間の経過と共にそれぞれの条件下で一定値に漸近する傾向があるが、結霜過程における $h$ は時間的にあまり変化はなく、ほぼ一定値をとる。 $h$ の値は霜層表面の粗さおよび物質移動の影響を受け、McAdamsの式より約1.5倍位大きな値を示した。霜層表面の

粗さ、および物質移動のそれぞれの影響をNu数対Re数線図中に定量的に示した。なお、物質移動の影響については境界層内で水蒸気が凝縮し、そこで潜熱を放出し、境界層内温度勾配が急になるためと考え、これを実験的に立証した。

### 第3章 垂直円筒の強制対流下における結霜時の熱および物質移動

円筒およびフィン付円筒伝熱面をそれぞれダクト内に設置し、そこに空気を十字に流し、結霜過程における円筒まわりの局所熱伝達係数およびフィン表面における熱流束分布などを測定し、実際の装置設計上の基礎的知見を得た。

試料円筒にはCu(70%)・Mn(30%)合金を使用し、その端面に多数の熱電対挿入孔をあけ円筒壁内温度分布を測定することにより、等温線を求め、半径方向の局所熱流束を算出した。なお霜層表面温度の測定は第2章において述べた方法に準じた。

実験結果によれば、円筒まわりに付着する霜層の厚さ、付着重量および霜層の密度は円筒まわりに決って一様ではない。霜層は時間の経過と共に、円筒側面から後方にかけて脹らみを増してくる。また前方よどみ点附近ではサンドイッチ状の霜層が形成されるため、霜層の密度は時間の経過と共に複雑に変化している。円筒まわりの熱流束および熱伝達係数は円筒前方において大きな値を示し、剥離点近傍と思われる90°附近で最小値を示した。また円筒まわりの局所熱伝達係数の値は平板における場合と同様、時間的にあまり変化せず、円筒まわりの平均熱伝達係数は物質移動のない場合の値に比べ約2倍程度大きな値を示した。

一方フィンに付着した霜の性状は場所によりかなり異っている。また、過大なフィンを用いるとフィン外縁では結霜せず、水滴が付く場合も観察される。フィン表面の温度分布を実測し、等温線に沿ってフィンを切断し、結霜を伴う場合のフィン形状決定の一方法を提案した。フィン表面における熱流束は時間的、および場所的に異なり、時間の経過と共に大きくなる傾向を示した。しかし、ここでは一枚のフィンについての基礎的実験であり、今後フィンの大きさ、形状、およびフィン間隔などを変えた結霜下における詳細なる研究が待たれる。

### 第4章 霜層内における熱および物質移動と霜層の有効熱伝導度

霜層は相当な空隙部を持っているが、層内部でおきている水分移動およびそれに伴う熱移動に関してモデルを用いて検討し、さらに霜層の有効熱伝導度の推算を試みた。

伝熱板上に付着する霜層は熱的抵抗となるため、その熱伝導度がどのような値を示すかを知ることが極めて重要であるが、ここではまず、簡単な霜柱モデルを用いて霜層内部での移動過程を検討した。半径 $r$ の霜柱が単位面積あたり $m$ 本存在すると考え、種々の仮定のもとで得た熱および物質収支式をRunge-Kutta-Gillの方法により数値積分を試み、霜層内部で起きていると

予想される水蒸気の拡散，それに伴う潜熱移動および層内の温度分布などを計算した。その結果，霜層内厚さ方向の温度勾配により，層内においてはそれぞれの水蒸気分圧に応じた物質移動が起きるが，その際の発生熱は伝熱面温度，霜層表面温度および霜層の密度により大きく変化することがわかった。さらに霜層内の温度分布を解析した所，層内の温度分布は直線ではなく，物質移動の影響を受け，上に凸の分布を示した。

霜層の有効熱伝導度  $\lambda_f$  を実測し，霜層の性状を表わすと考えられる霜層の密度  $\rho_f$  との関係で点綴した。その結果， $\lambda_f$  は  $\rho_f$  の増加と共に増加することは当然であるが，予想されるごとく実験条件の違いによりかなりのバラツキを生じ， $\lambda_f$  はただ単に  $\rho_f$  のみの関数で表わすことはできないことがわかった。そこで水柱モデルを用いて，熱流を固体部の伝導伝熱の項と空隙部内の物質移動による潜熱移動の項の和として霜層の有効熱伝導度の推算を試みた。その際モデルの伝導伝熱に対する補正項として  $\alpha_0$  を導入した。上向き伝熱面に用いた強制対流下での結霜実験より  $\alpha_0$  に関し Eq. 4.4.14 で示す実験式を得た。

$$\alpha_0 = 0.484\rho_f + 0.127 \quad (4.4.14)$$

その結果霜層の有効熱伝導度  $\lambda_f$  は Eq. 4.4.13 を用いることにより推算が可能であり，またこの推算方法は別の実験（自然対流，下向き伝熱面，別の上向き低温面および円筒伝熱面）の霜層の  $\lambda_f$  にも適用できることがわかった。

$$\lambda_f = \frac{(1-m\pi r^2)DL_HK_0K_1(e^{\xi t_f} - e^{\xi t_w}) + \alpha_0 m\pi r^2 \lambda_f (t_f - t_w)}{(t_f - t_w)} \quad (4.4.13)$$

## 第5章 密閉系における結霜時の自然対流熱伝達

底面を加熱し，一側壁を冷却し，天井壁および他の側壁を断熱した二次元の密閉系を考え，結霜を伴う場合と結霜を伴わない単純伝熱の場合につき，実験および理論の両面から検討を加えた。

結霜を伴わない場合に対しては，連続の式，運動量の式および熱収支式を連立させ，そこに流れ関数および渦度を導入し，差分法により数値解を導き，系内の温度分布，対流速度などを求めた。そしてその妥当性を実験により立証した。計算は Gr 数にして  $1 \sim 7 \times 10^5$  の範囲で行なったが， $Gr < 1,000$  では系内にほとんど流れはなく， $3 \times 10^3 < Gr$  ではじめて系内に対流の影響が表われ，Gr の増加と共に伝導伝熱の影響が少なくなることがわかった。

結霜を伴う場合について実験を行ない，熱伝達係数および温度分布などにつき，結霜を伴わない単純伝熱の場合と比較検討した。この場合も熱伝達係数は物質移動の影響を受け，結霜を伴う場合の方が相当大きな値を示すことがわかった。

## 第6章 総括

結論として本論文を要約し，第2章から第5章までの結果を総括した。

## 審査結果の要旨

結霜現象は冷凍および冷蔵をはじめとして、特殊空調用乾燥空気の製造、混合ガスの分離精製など、各種プロセスに付随しておこる熱と物質の同時移動過程の一つであり、相変化をともない且つ霜層の性状が複雑なため、その移動機構は従来あまり研究されておらず、不明な点が極めて多い。本論文はかかる結霜過程における移動機構の解明を目的として行った強制対流および自然対流下の基礎的研究をまとめたもので、6章よりなる。

第1章は緒論であり、本研究の動機とその目的を述べ、既往の研究を概説している。

第2章では、はじめに実験精度を左右する霜層表面温度測定に関する従来の方法の不備を指摘し、あらたに細い熱電対による境界層法を提案し、赤外線輻射温度計と併用して、信頼度の高い値を得ることに成功している。ついで上向きおよび下向き水平平板を用いて、強制対流下の結霜実験を行い、熱伝達係数および物質移動係数を求め、それらにおよぼす諸因子の影響を検討している。その結果霜層表面の粗さおよび物質移動のため、熱伝達係数はMcAdams式の約1.5倍になることを見出し、それぞれの影響をNusselt数対Reynolds数線図中に定量的に示している。

第3章は垂直円筒およびフィン付円筒伝熱面を用いて行った強制対流下の実験結果を述べたもので、結霜過程における円筒まわりの局所熱伝達係数およびフィン表面における熱流束分布など、実際の装置設計上の基礎資料を提出している。

第4章では、実測が困難である霜層内部における熱および物質移動速度を理論的に解析し、層内における水蒸気の拡散とそれにとまなう潜熱移動量および層内温度分布などを計算し、それらにおよぼす空気温度・湿度、伝熱面温度および霜層の密度などの影響を考察している。さらに霜層の有効熱伝導度を実測し、その推算法を提案している。すなわち霜層を氷柱群で表現し、熱流は固体部をとおしての伝導伝熱と空隙部内の物質移動による潜熱移動の和と考え、有効熱伝導度の推算をこころみたところ、多くの実測値に適用できることを明らかにしている。

第5章では、底面を加熱し、一側壁を冷却した密閉系における自然対流熱伝達に関し、結霜をとまなう場合と結霜をとまなわない単純伝熱の場合につき、実験と理論の両面から検討を加え、系内の温度分布、対流速度分布および熱伝達係数などにおよぼすGrashof数の影響を明らかにしている。

第6章は総括である。

以上要するに本論文は、結霜過程における熱と物質の移動特性および霜層の有効熱伝導度に関して新しい検討を加え、それぞれの機構を明らかにし、物質移動をとまなう伝熱工学の分野に重要な知見を与えたもので、化学工学の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。