

氏 名	佐 野 雄 二 さ の ゆう じ
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	論 工 博 第 115 号
学位授与の日付	昭 和 41 年 9 月 27 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	乾式紡糸および熔融紡糸に関する化学工学的研究

論文調査委員 (主 査)  
 教 授 桐 栄 良 三 教 授 水 科 篤 郎 教 授 吉 岡 直 哉

### 論 文 内 容 の 要 旨

この論文は乾式紡糸および熔融紡糸の操作に関して、これを化学工学の見地から細線状高分子流れと空気間の伝熱および高分子溶液（均質材料）からの乾燥の問題として取り扱ったもので、基礎的研究から初めて紡糸操作の解析に及んでいる。

3篇10章からなっているが、第1篇は紡糸操作における空気流と細線間の伝熱係数について実験的および理論的検討を行っている。乾式あるいは熔融紡糸などの合成繊維の乾燥、加熱あるいは冷却の操作の解析には直径 0.1 mm 程度の細線と空気流間の伝熱係数を知る必要がある。一般に前者では並行流が後者では直交流による強制対流が用いられるが、この他自然対流の影響さらに細線の走行による同伴流の影響の問題がある。

これらの複合された流れの場合における伝熱係数を求め、さらに紡糸筒の構造、糸束による影響などについても検討を加えている。

第1章では鉛直に張った単一細線と空気流間の伝熱係数を平行流の場合について測定した実験式を求め、直交流の場合と比較を行った。すなわち鉛直の銅細線（0.04~0.12 mmφ）の一定長（0.7~2.9 m）に電流を流し、その発熱量と温度を測定して、定常状態で空気流（0.9~9 m/sec）に伝えられる場合の伝熱係数を求めた。また紡糸に特有な細線の走行の影響を検討するため銅線を走行させ（0~100 m/min）同様に伝熱係数を測定した。空気はこれに対して平行流（並流および向流）で送られ、あるいは自然対流の状態にある。

細線と平行流の間の伝熱係数は、細線の固定、走行の別なく、

$$Nu = 0.32 + 0.115 Re^{0.50}$$

でまとめられる。自然対流の場合は、細線固定の場合

$$Nu = 0.65 [Gr \cdot Pr]^{0.07}$$

走行の場合

$$\text{Nu} = 0.65[\text{Gr} \cdot \text{Pr}]^{0.07} \text{Re}_w^{0.12}$$

$\text{Re}_w$  は走行速度基準の  $\text{Re}$  数である。

平行流の場合の値を在来多くの実験値の提出されている直交流のそれと比較すると、同一の  $\text{Re}$  に対して後者は前者の約 2 倍の値を示している。

第 2 章では紡糸筒内で問題となる糸束の影響、塔内絞り板の効果、ノズル部での伝熱係数の変化について実験、検討を行ない、細線伝熱が空気流れの乱れに起因する直交流成分により支配されるとの立場から整理した。すなわち主流方向と  $\theta$  の角をなす乱流空気流れ中の細線の伝熱係数は、

$$\text{Nu} = 0.35 + 0.50 [2\alpha^2 + \sin^2 \theta]^{0.25} \text{Re}^{0.50}$$

で整理され強制対流で  $\alpha = 0.06$  となる。

絞り板の効果に関しては、絞り板間隔、穴直径および紡糸筒直径の無次元関数として結果が整理される。

糸束の伝熱係数に及ぼす影響については空気流中に分散した多数の繊維束中の 1 本の細線の伝熱係数をモデル的に測定して、多数繊維の存在はむしろ係数を増大させる傾向にあり、乾式紡糸において、繊維束中へ乱流空気は充分流入できることを見出した。

さらに空気流路中心軸より流路半径の  $1/2$  以内にある細線の伝熱係数は流路中心軸上のそれと変化がなく、向流式乾式紡糸筒において、ノズル近傍における伝熱係数はノズル半径方向の距離の増大につれて増加するのでノズル面の孔配置に考慮が必要であることを述べている。

第 3 章では流れに垂直な円筒の伝熱について断続的な熱浸透モデルの適用を試みて、このモデルによる円筒の温度分布を計算した。さらに接触時間を円筒後方に生ずる渦列の周期にとる場合に  $50 < \text{Re} < 10^4$  で計算式は実験値と良好な一致を示す。このモデルは境界層流を単純化した近似モデルであり、伝熱係数の推算までにはいたらないが、 $\text{Nu}$  数の関数形を推定できる点で有利である。

第 4 章では細線走行の場合の同伴流による伝熱係数を境界層理論より求めた Sakiadis の速度分布式より計算して実験値と比較し、理論値は実験値より 20~30% 低くなることを見出した。

任意の方向から細線にあたる乱流空気の場合の伝熱係数を、直交流、平行流の式から等価ベクトル又は等価加算法で計算し実験値との一致を確めた。

溶融紡糸における繊維と空気間の伝熱係数を直交流、自然対流および同伴流のそれぞれについて求め、これらに上述の加算法を適用して求めた結果は実測値と良好な一致を示した。

乾式紡糸の場合の平行流、自然対流、同伴流について同様な計算を行って実測値との比較を行ったが等価加算法が良い結果を示した。

いずれの紡糸操作でも強制対流が支配的で同伴流および自然対流の影響は小さい。

第 2 篇では高分子溶液の乾燥過程は繊維内の溶剤が繊維表面に拡散し、表面で境膜を通して空気本体中に移動する現象であり、これを均質材料よりの水分拡散過程の問題として乾燥機構を考察した。主としてポリビニル・アルコール (P. V. A.)—水系について実験的および理論的検討を行ない、第 1 篇の結果とあわせて乾式紡糸の乾燥過程を追跡すると共に乾式紡糸筒の設計および操作条件の設定に資する結果をえた。

第5章では P. V. A. 水系の溶液の平衡蒸気圧と濃度の関係を竹中の方法に従い測定し、第6章以降の計算の基礎数値をえた。蒸気圧の対数は常例の通り濃度をパラメーターとして絶対温度の逆数に比例する。蒸気圧の濃度依存性を定める Flory-Huggins の式中の諸数値を求め、さらに溶解熱を算出した。なお 400 Kg-水/m<sup>3</sup> 以上の水分濃度では蒸気圧は水のそれと等しいと近似できる。

第6章では P. V. A. 水系およびセルローズ・アセテート-アセトン系溶液の単一液滴（直径 1.5~2.5 mm）の乾燥を行ない、その乾燥特性を求めている。すなわち液滴を細いガラス棒の先端にとりつけた細い熱電対（40 $\mu$ f）に懸吊し、これに乾燥用空気を送ってその質量変化を棒の撓みから求め、同時に滴温度の測定を行ない、写真撮影により滴の形の変化を追跡した。P. V. A. 水系にあっては乾燥速度は恒率、減率第1および第2段の3段階に分けられること、表面濃度と液内濃度の勾配は表面近傍で著しく大きいことが判る。恒率期間では表面から境膜を通しての移動が律速であり、減率第2段では材料内部からの拡散が律速となる。減率第1段ではその両者が影響し、滴表面では滴濃度とその蒸気圧は平衡関係にあり、表面蒸発速度の推進力を規定することとなる。減率第2段の速度から溶剤のみかけの拡散係数が求められ、滴温の関数として与えられる。拡散方程式の解を求め、これに熱・物質移動の相関関数およびみかけの拡散係数を用いて、恒率終了時間および減率第1段終了時間を求める無次元式を導出した。以上の結果を用いて、平均含水率の減少曲線および材料温度上昇曲線を計算より求めることができるが、これらは実験と良好な一致を示した。

セルローズ・アセテート-アセトン系においては有機溶剤の乾燥であるため恒率期間は極めて短かく、乾燥は減率段階のみと考えられる。前と同様にしてみかけの拡散係数が求められた。

第7章では P. V. A. の乾式紡糸における繊維の乾燥の実験とその解析を行った。すなわち紡糸筒（筒長 5.1 m）を設備し、塔頂にノズルを設け繊維は筒中で乾燥され筒底でまきとられ、空気はこれと向流もしくは並流に送られる。繊維の乾燥過程を第5、第6章の結果を用いて考察し、さらに第4章の伝熱係数の結果とあわせて現象を解析して、熱と物質移動の両面から乾燥過程を追跡した。恒率期間の乾燥速度は熱・物質移動の相似則から表面境膜の係数を第1篇の結果を用いて計算する。減率第2段の速度は内部拡散が律速抵抗であり、第6章でのみかけの拡散係数を用いて円筒方程式を解いて求めることができる。減率第1段はこの両者の共存する期間として求められる。

以上の考察により筒内各位置における含水率および材料の温度変化はすべて  $(L/\text{den}\cdot u)$  と紡糸条件、空気流条件の関数として表わされる。Lは筒長、den はデニール、uは走行速度であり  $(L/\text{den}\cdot u)$  は、繊維1デニールの筒内滞留時間を表わす。紡糸条件（濃度、温度、蒸気分圧）の影響は  $(l/L)$  ( $l$ : 絞り板距離) について相似で、L, den および u の影響は  $(L/\text{den}\cdot u)$  の形で整理されることを計算過程より導出し、実験的にこれを裏づけた。 $(L/\text{den}\cdot u)$  対含水率の対数が含水率 0.4 Kg-水/Kg-P. V. A. 以下では空気温度のみを変数として直線で近似され、乾燥の大部分は減率第2段にあることを示し、またこの関係から内部拡散係数を求めることができる。この関係は実際の紡糸操作においても極めて有用な関係である。

さらに乾燥過程を恒率と減率第2段で近似し、恒率については第4章で求めた Nu 数および第6章で求めた恒率終了時間を用い、減率第2段では先に求めた拡散係数を用いて、繊維の含水率および温度変化

を計算して実測値と良好な一致をえた。

第8章においてはアクリル繊維（ポリアクリルニトリル—ジメチルアセトアミド系）につき第7章と同様の実験を行ない、第7章と同じく溶剤含有率と紡糸諸条件の関係を検討した。P. V. A. と同様に (L/den·u) 対溶剤含有率の関係は空気流温度分布のみにより変化し第7章の結果を裏づけた。空気流の温度は特に筒下部における低溶剤含有率の部分で大きく影響するが、これは材料温度が空気温度に近く、みかけの拡散係数に温度の影響が表われるためである。

第3篇ではポリプロピレンの溶融紡糸操作における繊維の冷却過程を解析して、繊維の冷却および変形の問題を実験的および理論的に検討した。溶融紡糸では一般に直交流が用いられ、また単純な伝熱のみで繊維の凝固が行なわれるのでその解析は物質移動を伴う乾式紡糸にくらべて幾分簡単である。

第9章では繊維の冷却過程の計算において、紡糸筒では表面伝熱条件が変化することに着目して、初期温度分布が放物線状の場合の無限円筒の温度変化に関する計算図表を作製して、表面条件が段階的に変化する場合の円筒の温度分布の時間的変化を簡単に求める方法を述べた。

第10章ではポリプロピレン繊維の溶融紡糸の実験を行なった。270°C 近くに加熱した溶融ポリプロピレンを 0.7 mm $\phi$ ×10 孔のノズルから 10 g/min で押し出し、紡速 250~500 m/min で紡糸筒長 1 m を走行させて巻取り、空気は 0.7 m/sec で繊維に対して直交流に送られる。紡糸塔内を走行する繊維の温度は零位接触法により測定され、繊維径は望遠レンズを付設したカメラにより撮影された。一方繊維温度変化を計算する方法として、繊維半径方向の温度分布を考慮に入れて第9章の線図を用いて計算する方法と、温度分布を無視する計算法について求めた。伝熱係数は第4章の結果を適用し、Nu 数は等価加算法によった。これらの計算結果と実測値とは良好な一致を示した。さらに繊維の直径変化より Trouton 粘度を算出した。これを用いて一般化された直径変化が計算される。これらより溶融紡糸操作における繊維温度および直径の変化を計算により一般的に求めることができた。

## 論文審査の結果の要旨

乾式紡糸および溶融紡糸は湿式紡糸と並んで広く合成繊維の製造工程に用いられているが、紡糸操作の研究は専ら紡糸条件と得られる繊維の糸質あるいは構造の関係を実験的に追跡するに留っていた。この操作の研究には高分子の配向、結晶化などの繊維構造の変化を追求する物理化学的立場と、細線状高分子溶液の濃度、温度などの変化を追求する移動現象論的な立場があるが、著者は後者の立場から研究を進めた。

すなわち紡糸過程を細線状高分子流れと空気流間の熱および物質の移動現象として扱い、紡糸中の乾燥および加熱、あるいは冷却過程について化学工学的立場から検討を加え、紡糸操作における繊維の濃度、温度などの状態変化を実験的ならびに理論的に明らかにし、さらに紡糸筒の構造、操作条件の影響を明確に解析した。

本研究の基礎となるものは一つは細線と空気流間の伝熱係数の決定であり、その二つはポリビニル・アルコール水溶液その他の合成繊維の溶液のような均質材料からの溶剤の乾燥過程である。著者はこの両者について精密な実験と理論的解析を行なった。前者については平行流と細線間の伝熱係数を求める実験式

を提出した。後者に関しては均質材料内の水分拡散と材料表面より空気中への蒸発過程として、材料内水分移動に関しては拡散方程式の解を求めてみかけの拡散係数を求め、表面よりの蒸発に関しては表面蒸気圧と濃度の平衡関係と熱と物質移動の相似則を用いて移動速度を求め、均質材料の乾燥機構を熱移動と物質移動の両面から初めて系統的に明らかにした。

ついで紡糸操作に特有な各種条件の影響の解析に進んだ。まず細線と空気流間の伝熱係数に影響を与える紡糸筒構造および操作、すなわち、細線走行ならびに糸束の影響、絞り板の効果につき定量的な結果をえている。さらに強制対流の他に存在する自然対流、走行同伴流の伝熱係数への影響を求め、任意方向から細線にあたる乱流空気の場合も含めて総合した伝熱係数の求め方を論じ、実験との一致を確かめている。

繊維の乾燥および加熱に関しては、紡糸筒を設備して実際操作を行うと共に、先に述べた基礎に立脚し、さらに上述の紡糸に特有の伝熱係数の計算値を用いて、筒中での繊維の乾燥曲線と温度上昇曲線を計算より求めて実験と対応させ、その有用性を確かめた。ここに紡糸操作において溶液状態から糸状に変化する過程が初めて明らかにされたことになる。さらにこの計算中著者は紡糸筒操作に関して極めて有用な操作変数群を見出したが、これは実際操作上益する所が大きい。著者はビニロン、アセテートおよびアクリル繊維につき上述の研究を行なって成果をえた。

さらにポリプロピレン繊維の紡糸は熔融状態から冷却凝固させる熔融紡糸法によるが、著者はこの冷却過程における走行繊維の温度と直径の変化を測定し、現象の解析を行った。繊維に対して空気は直交流で接触するが、この場合の伝熱係数について熱浸透モデルの見地から検討を加えた。また紡糸筒内で表面伝熱条件の変化することに着目して繊維の温度分布とその変化の計算に便利な計算図表を作製した。これらの結果を用いると熔融紡糸の諸条件を定めれば紡糸中の状態変化を計算より求めることができ、この結果は実験と良好な一致を示している。

以上のように本研究は乾式および熔融紡糸に関してこれを化学工学的に解析して、紡糸中の状態変化を初めて明らかにしたもので学術上および工業上寄与するところが少なくない。よってこの論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。