

氏名(本籍)	荒木 信 幸(山形県)
学位の種類	工 学 博 士
学位記番号	工 博 第 2 1 3 号
学位授与年月日	昭和 4 5 年 3 月 2 5 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専門課程	東北大学大学院工学研究科 (博士課程)精密工学専攻
学位論文題目	噴霧粒群の蒸発に関する研究

(主査)

論文審査委員	教 授 棚 沢 泰 教 授 大 塚 芳 郎
	教 授 弓 削 達 雄 助 教 授 永 井 伸 樹

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 序 論

噴霧された液体燃料の蒸発燃焼を調べる一つの方法として、単一液滴の蒸発燃焼から始まり、液滴間の相互関連から噴霧へと発展させてその機構を解明しようとする研究がある。単一液滴に関しては直径 1 mm 程度の液滴を石英糸ならびに懸垂して蒸発速度を求める研究が大部分であって、実際の噴霧液滴よりかなり大きな液滴についての測定である。したがって、自然対流の影響を強くうけるし、懸垂糸の影響をまぬがれることはできない。これらの欠点を補うために実際に飛ばしている液滴の蒸発燃焼を調べた研究もあるが、その数が少ないうえに測定精度はかなり悪い。

本研究では、実際の噴霧液滴に近い 200 ミクロン程度の均一な粒径を持つ噴霧液滴を作り、温度分布が均一で風速の乱れが少ない高温風洞内に落下させ、その噴霧液滴の蒸発率を求めようとする

るものである。用いた静電微粒化法は粒径が均一で、しかも長時間同一状態に保つことができるので、一定の位置には常に一定の液滴が存在することになって、時間の推移をあまり考慮せずに粒径測定ができる。

第2章 噴霧液滴群の蒸発について

単一液滴の蒸発燃焼については、かなり詳しく調べられてはいるものの、これから実際の噴霧の蒸発燃焼を直接説明つけることは容易なことではない。本章では、これまでに行なわれた単一液滴および液滴群の蒸発燃焼の研究結果をまとめ、両者の連結の手がかりを得るために、まず一列に並んで飛しょう中の液滴群について解析することが有用であることを示した。

第3章 均一な粒径を持つ液滴群の生成

数ある微粒化法を種々検討した結果、静電による微粒化法が噴霧粒群の蒸発を調べるための条件を満足していることがわかった。

5KV ないし10KV の直流電圧が加えられたノズルおよび陽極板と接地電位にある陰極板との距離によって電場の強さを変えると、異なった微粒化現象が得られる。その現象は(I) 静電滴下、(II) 遷移、(III) 均一微粒化、(IV)不均一微粒化、(V) 放電微粒化、に区分できる。均一微粒化状態においてはあたかも一本の糸を引いたように液滴がづらなって微粒化され、粒径分散度が0.1以下の非常に均一な粒径を持つ液滴が得られる。そのときの生成液滴の直径と個数は流量によって変化し、蒸留水の場合、それぞれ100～230ミクロン、毎秒400～1000個、エチルアルコールの場合は130～260ミクロン、毎秒350～800個となる。

第4章 蒸発率測定方法および装置

加熱された空気が流れている風洞内に均一な粒径を持ち、しかも時間とともに変動しない液滴を噴射し、それが下流に移動するにつれて蒸発するようすを写真撮影し、蒸発率を求める。

風洞の長さは3m余もあるので、その間の温度降下を防ぎ、温度分布を均一にし、風速の乱れを少なくすることがこの実験の精度をあげるキーポイントになっている。それで装置の製作時には、風洞の構造を三重にするなど、特にこの点に注意を払った。

落下中の液滴の直径は、直接拡大写真を撮り、それをさらに投光器で拡大し、全倍率を100～125倍として測定した。写真撮影装置は任意の位置に止めることができるエレベーター上に設置

されている。液滴の落下速度は、既知の時間間隔において発する二つの閃光により液滴を写真撮影し、その間の移動距離から算出される。この時間間隔は空気の抵抗を無視できるほど重い物体が自由落下するとき、定った二点を通る時間が常に一定であることを利用した。

第5章 微風速測定用自動平衡型沈鐘式微圧計

本章では、風洞内の風速を測定するために新たに開発した自動平衡型沈鐘式微圧計について述べている。0.5 m/s の風速の動圧は室温において、0.015 mm Ag であり、このような微圧を測定するのに、ばねを用いた沈鐘式微圧計があるが、応答に要する時間が非常に長い。この応答おくれは、沈鐘が変位すること、液面が移動すること、空気が圧縮することによる空気の補給に必要な時間がおもな原因である。応答を早くするには沈鐘の変位を小さくすることが最も効果的であり、それには、ばねを強くすれば良いが、これは同時に指示感度を落とすことになる。この相反する事項をばねの代りに電磁ばねを用いた力平衡方式を採用することにより、変位を数ミクロンにおさえ、十数分も必要であった応答時間を数秒程度まで短縮することができた。

この微圧計を用いて、0.1 ~ 4 m/s の風速を早く正確に測定できる。

第6章 蒸発速度の測定結果と解析

測定された噴霧液滴の蒸発曲線を空気温度をパラメーターにして示すと図1と図2になる。図中の点線は小林（日本機械学会論文集，20，831（1954））が懸垂法によって得た蒸発率を小さな液滴にも適用できるとみなして求めた蒸発曲線（直線）である。

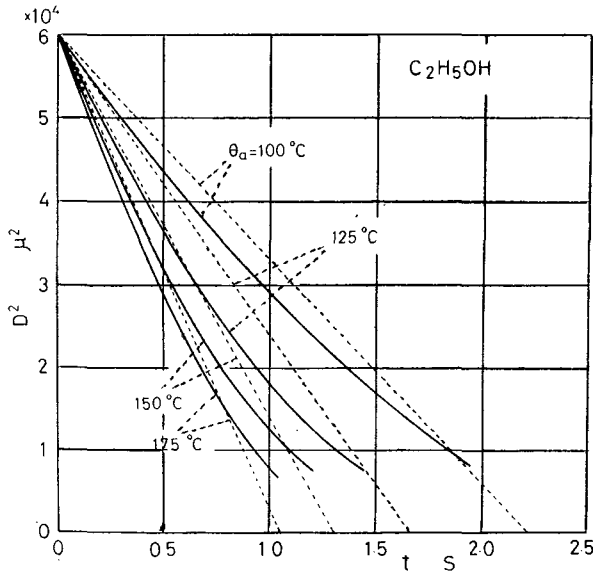


図1 噴霧水滴の蒸発曲線

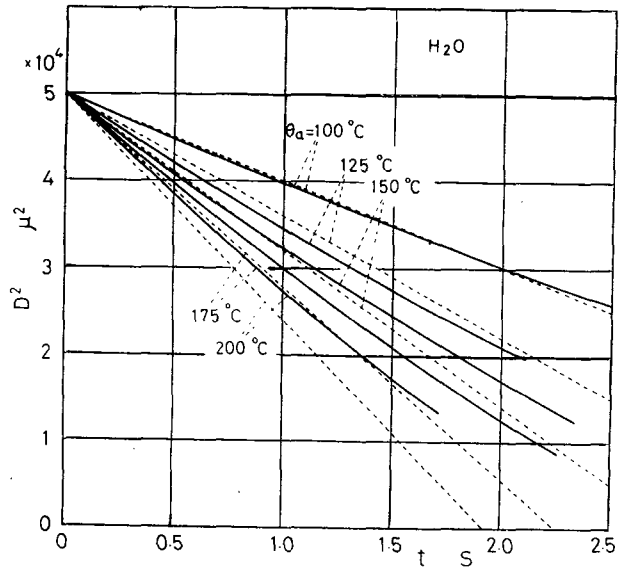


図2 噴霧エチルアルコール滴の蒸発曲線

これらの図からわかるように、蒸発速度は、はじめ大きく粒径が小さくなるとともに減少している、エチルアルコールの場合、それが特に著しくなっている。このように蒸発曲線が湾曲しているのは高温空気と液滴との相対速度が原因しているのではないかと、まず考えられる。従来の熱伝達および物質伝達の研究から、蒸発率は

$$dD^2/dt = -ke_0(1 + 0.3\sqrt{Re}) \quad (1)$$

と書き表わせる。ここで ke_0 は $Re = 0$ のときの蒸発率であり、極限蒸発率と呼ぶことにする。この極限蒸発率は噴霧水滴の場合、粒径の大きさにあまり関係せず一定値を示しているが、噴霧エチルアルコールの場合は粒径が小さくなるとともに減少し、温度が高いほどその傾向が著しくなっている。この原因を調べるために、噴霧液滴と同じ方法と装置を用いて、明らかに単独粒と見なせる液滴についての蒸発曲線を測定し極限蒸発率を求めると、エチルアルコールの場合でも粒径によってあまり変化せず、その値は噴霧の場合に比較して大きく、温度が高くなるにつれて、その差が増大している。このことから噴霧エチルアルコールの場合、液滴間の蒸気の干渉は液滴が蒸発して粒径が小さくなり、落下速度が減少し、単位長さ線上に存在する液滴個数が増加するにつれて盛んになっていること、またその干渉の程度は空気温度が高くなるにつれて激しくなっていることがわかる。

噴霧液滴の密集度をあらわす一つの尺度としての生成液滴個数は毎秒350～1000個である。この密集度の違いによる極限蒸発率への影響は定量的に観察されなかったが、全体として単一液滴との差は明確である。しかしその違いもあまり大きくないことから、単一液滴に近い密集度を持つ液滴群についての測定値であると言える。

またこのようにして求めた単一液滴の極限蒸発率を従来多くの研究者によって求められた懸垂法による蒸発速度係数と比較するとかなり小さな値を示している。これは懸垂法の場合、自然対流と懸垂糸が蒸発を促進するように作用しているためと思われる。

第7章 蒸発しつつある液滴群の抵抗係数

ダブルフラッシュ法により液滴の落下速度が測定され、自動平衡型沈鐘式微圧計により風速が測定されているので、蒸発しつつある液滴群がどの程度の抵抗を受けながら風洞内を落下しているかが算出される。これによると蒸発しつつある液滴群の抵抗係数は測定された範囲内 ($1 < Re < 20$) で $Re^{-0.8}$ に比例し、高温になるに従って小さくなっている。これは蒸発によって境界層が厚くなり速度勾配が小さくなって摩擦抵抗が減少するためであり、また液滴後方にできる渦はふき出た蒸気により弱められるので形状抵抗が減少するためであると考えられる。

第8章 結 論

温度分布が均一で、風速の乱れが少ない高温低速風洞を製作し、静電微粒化法によって得られた粒径200ミクロン程度の微小な単一液滴および噴霧液滴をこの風洞内に落下させ、蒸発速度を求めた。さらに詳しく述べると次のようになる。

- (1) 静電微粒化法は、生成液滴直径が非常に均一で、長時間安定に微粒化できることを見いだした。
- (2) 蒸発に対する相対速度の影響として、Ranzらの式が適用できることを確かめ、相対速度零のときに相当する極限蒸発率を導入して、懸垂法などによる蒸発速度係数と比較すると自由落下中の微小液滴の極限蒸発率は、かなり小さいことがわかった。
- (3) 生成液滴個数毎秒350～1000個の密集度を持つ液滴群の蒸発速度を測定し、単一液滴との差から、蒸気の干渉状態を推定した。
- (4) 風洞内の速度分布を測定するために、応答時間を大幅に短縮した自動平衡型沈鐘式微圧計を開発した。
- (5) 蒸発しつつある噴霧液滴の抵抗係数を測定し、固体球の抵抗係数と比較して、小さな値を示すことを確かめ、各空気温度についての実験式を求めた。

終りに臨み、長い間にわたって終始懇切な指導助言を与えられた棚沢 泰教授に心から感謝いたします。さらに、箱守京次郎助教授、永井 伸樹助教授の適切な指導助言に対し、感謝の意を表します。また、快く援助を与えて下さった梅原 正彦氏をはじめ棚沢研究室の方々に感謝いたします。

審査結果の要旨

液体燃料噴霧の蒸発と燃焼は各種の燃焼器や各種の原動機内で常に行なわれている。

そのため近年液粒の蒸発や燃焼が盛んに研究されているが、単一液粒を石英製の細い糸などで吊り下げたものが多く、粒径も1 mm程度で非常に大きい。

これに対して本研究は、直径が0.2 mm程度の均一な微粒群を生成し、熱風風洞中を落下させて蒸発に関する法則を検討したものである。

本論文は8章にわかれており、第1章は序論、第2章は液粒群の熱伝達と物質移動について考察したものである。

第3章は均一の液粒の群を発生させる方法に関するもので、種々の微粒化法を検討した結果、毛細管に懸垂する液粒に高圧静電場をかければ液粒は細く引き伸ばされて微細な液粒群となることを見出した。さらに粒径を均一にするための条件を求め、0.2 mm程度の均一な液粒を定常的に毎秒350～1000個の割合で生成させることができた。

第4章は液粒群の蒸発率を測定するための垂直熱風風洞の設計と構造に関するもので、特に風洞内の温度と風速分布を均一にするための二重構造、静電気を帯びた液粒が壁面に附着することを防止するための中和用イオン発生装置、落下中の微小な液粒の直径の変化を撮影するため垂直方向に自由に移動できる瞬間撮影装置、液粒の落下速度を求めるためのダブル・フラッシュ法などの研究を行ない、これらの成果を取り入れて熱気流中での蒸発率を測定できる装置を作った。

第5章は風洞中低速気流を速く測定するため新たに研究した自動平衡型沈鐘式微圧計に関するものである。

従来の細いピトー管と連結した沈鐘式微圧計では応答を速くすれば感度が落ちるので数十秒の応答時間が必要であった。

これに対して差動変圧器と復元用磁石を使った自動平衡装置を試作して、感度と復元性を独立させた結果、応答時間を数秒に短縮することができた。

第6章は水、アルコールなどの液粒群の蒸発率を測定し、その結果を数式で表示したものである。

すなわち第4章で述べた装置によって熱気流に対して相対速度を持つ液粒群の蒸発率を測定した結果、単一粒の蒸発率より低い値が得られた。これは物質移動に対する液粒間の干渉によるものでアルコールなど蒸発し易い液体の場合には、この傾向が強い。

これらの実験値を整理して無次元の実験式で表示した。

第7章は蒸発しつつある液粒の流動抵抗係数が普通の球に対する係数より小さくなることを実験によって示したものであり、第8章は結論である。

以上本論文は従来測定することのできなかつた熱気流中に浮遊する液粒群の蒸発率を測定したもので熱工学上寄与するところが少なくない。

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。