

超高速回転体の微粒化特性に関する研究

小 笠 原 慎

要 旨

微粒化技術は、さまざまな分野に利用されているが、いずれの分野でも使用目的に適合する噴霧特性が要求されており、自動車の噴霧塗装では、平均粒径 $20\sim 40\ \mu\text{m}$ が適切とされている。自動車の噴霧塗装技術には、多くの問題点があり、塗料の塗着効率は通常約 6~7 割であるが、形状が複雑なものについては、約 5 割と言われている。また、塗着しない塗料は、再利用されることなく、すべて廃棄され、それがコスト増加につながっている。塗装工程では、塗装ブースの空調や焼き付けの工程で使用されるオーブンで、自動車工場全体のエネルギーの約 40 % を使用する場合もある。したがって、省エネルギー・省資源の立場から、効率の良い塗装技術を実現するためのひとつの手段として、噴霧塗装における微粒化プロセスの解明が重要と考えられる。

現在、自動車の噴霧塗装では、粘性流体の微粒化に適用でき、高い生産性と仕上がり品質が優れているロータリー・ベルカップ塗装機が多く利用されている。しかしながら、ロータリー・ベルカップの形状やその内面での液体の流れが微粒化に及ぼす影響については不明な点も多い。そこで本研究では、表面流動状態および周端の分裂模様の観察、液膜流動特性の検討、ベルカップ周端から発生する液糸直径、平均粒径の計測などを行い、微粒化機構の追究や塗着効率を改善するための粒径制御等の検討を行った。

本論文は、上記内容を含んだ第 1 章の緒論を含め、6 章から構成されている。

第 2 章は、実験装置概略、実験方法、本研究で用いたベルカップの特徴、ベルカップ表面の液膜厚さの測定について述べている。

第 3 章は、ロータリー・ベルカップ表面の液体の流動状態が微粒化に及ぼす影響を明確にするために、液体流量と回転数の変化などの実験条件がベルカップ表面の液体の流動状態とその周端の分裂模様に及ぼす影響について述べている。

水の場合では、ベルカップ周端の分裂模様を、擬似滴状分裂、Rayleigh 分裂、滴状分裂、繊維状分裂、微細繊維状分裂の 5 種類に分類した。また、本研究で使用したベルカップでは、従来の円板の場合のような膜状分裂にはならないことを明らかにした。実塗料を模擬したグリセリン水溶液の場合では、周端の分裂模様を擬似滴状分裂、Rayleigh 分裂、Rayleigh 分裂 II、膜状分裂、繊維状分裂、微細繊維状分裂の 6 種類に分類した。特に超高速回転の領域では、ベルカップ周端からの分裂模様は、微細繊維状分裂であり、この時の個々の液糸の分裂は、Rayleigh 分裂であり、目視ではあるが、液糸直径に大きなばらつきがないことを確認した。

表面の流動状態の分類では、水の場合、流動状態が鋸状波であると、周端では、繊維状分裂や微

学位記番号と学位：博第 47 号、博士（工学）

授与年月日：平成 23 年 3 月 19 日

授与時の所属：大学院工学研究科機械システム工学専攻博士後期課程

細繊維状分裂であり、微粒化が良好であることがわかった。また、グリセリン水溶液の場合、液膜の流動状態は、低速回転の領域では、Smooth film、中速回転の領域では Radial streakwise film、高速回転の領域では、Partial dry film が主として確認され、流動状態は、流量によらず、回転数に大きく影響されることがわかった。さらに、このような液膜の流動状態が周端の分裂模様に影響を及ぼすことを明らかにした。また、溝の存在の微粒化への影響について、溝なしベルカップとの比較検討を行った結果、周端の溝が、溝直前の液膜の流れを変化させ、粒径のばらつきの小さい液滴が生成させる役割があることを確認した。

第4章は、ロータリー・ベルカップ表面の液膜の特性について述べている。

回転円板の液膜厚さを触針法により測定し、液膜厚さの理論値と実測値とがよく一致することから、ベルカップ表面の液膜厚さ測定にも適用できることを示した。また、回転円板の液膜厚さを触針法にて測定を行った結果から、ベルカップ表面の液膜が平滑かつ周方向にも均一な厚さであることがわかった。

液膜速度を二重露光撮影より求めた結果、すべての流量において実測値が計算値より小さくなることが明らかになった。また、流量が少ないほど実測値と計算値との差が大きくなるが、これは、ベル表面上を流れる液膜の周方向でのすべりの影響や、回転方向とは逆向きの力が液膜に作用しているため、半径方向液膜速度が小さくなったと考えられる。

液糸直径と液膜厚さとの関係を調べた結果、液膜がベルカップ表面に均一に広がらず、円周方向に膜厚分布があることを写真や液糸直径の実測値から明らかにした。これは、液体供給孔の影響によるものと考えられる。

高速回転でカップ表面の液膜が平滑で薄い場合、周端の溝により、液体流量が各溝に均等に配分されるために、液糸直径は均一であり、液体流量の変動の影響が抑えられることを明らかにした。また、溝の幅により液糸が制約されているため液糸直径に大きな影響がない。

第5章は、ロータリー・ベルカップの微粒化における液糸直径と平均粒径との関連について述べている。

溝なしベルカップの場合では、回転数に関係なく、生成される液滴に大きなばらつきがあり、粒度分布幅が広がっているのに対し、周端に溝がある場合、微粒化が促進され、粒度分布幅が狭くなり、また、周端からの分裂模様は、基本的に Rayleigh 分裂であるため液糸直径から平均粒径を推算可能であることを明らかにした。

次にベルカップ形状による液糸直径および粒径の変化の検討を行った結果、溝が深い"深溝ベルカップ"の液糸直径および粒径が最も小さく、溝幅が狭い"多溝ベルカップ"が最も大きくなる結果となった。このことから、溝深さと幅の他に、溝出口先端からベルカップ周端までの距離が液糸直径に影響していると考えられる。

第6章の結論は、以下のように要約される。

- (1) 周端からの分裂模様を観察し、高速回転の場合、周端にあるすべての溝から液糸直径にばらつきのない液糸が発生し、細かな液滴を生成する微細繊維状分裂になることを確認した。
- (2) 周端に溝が存在することにより、強制的にカップ表面の液膜を分割し、膜状分裂の発生はなく微細繊維状分裂になる領域が広がることを確認し、本研究で用いたベルカップは、従来の回転円板での分裂模様の分類と一致しないことがわかった。
- (3) ベルカップ表面の流動特性を観察・分類した結果、高速回転で液膜が薄く均一な状態で周端部

の溝に達する場合には、それぞれの溝に流れる液体流量のばらつきが抑えられ、その結果、微細繊維状分裂になり、微粒化が良好であることがわかった。

- (4) 回転円板での液膜厚さを触針法にて測定した結果、回転円板表面の液膜厚さの実測値と理論値が一致していることは、液膜が平滑かつ周方向にも均一な厚さであることを意味している。
- (5) 液糸直径の測定結果から液体供給孔の存在により、液体の粘度が高い条件では、液膜がベルカップ表面円周方向に膜厚の分布があることがわかった。
- (6) ベルカップ周端の溝により、液糸直径が制約され、高速回転の場合、粒度分布幅が狭く、均一な液滴を生成することがわかった。
- (7) 個々の液糸の分裂模様は、Rayleigh 分裂であるため、液糸直径から平均粒径を推算可能であることを示した。

主指導教員 大 黒 正 敏

Study on the Atomization Characteristics of an Ultra-High-Speed Rotary Bell

Shin OGASAWARA

Abstract

Spray technology is widely used in industrial applications such as internal combustion engines. The atomization characteristics must be suitable for each specific application. For example, in automobile spray painting, a Sauter mean diameter of 20–40 μm is thought to be appropriate. However, there have been several problems in automobile painting technology. For example, the transfer efficiency of spray paint is at most 60–70% and decreases to 50% for complicated parts. The paint that does not adhere to the body must be disposed of without being reused, which increases the production cost. In addition, in the automobile painting process, approximately 40% of the total energy consumed by the automobile factory is used for the baking oven and air conditioning of the painting booth. Therefore, the realization of efficient painting technology is also necessary from the standpoint of energy savings and resource conservation. Thus, elucidation of the spray painting process is an important problem.

Recently, the rotary bell cup has been widely used in automobile painting and can be applied to high-viscosity fluids to produce relatively uniform spray droplets. The rotary bell cup can spray a large surface area per unit time, enables high productivity, and produces a very high-quality appearance. Atomization by rotary bells has thus been investigated extensively. However, the effect of the shape of the rotary bell cup and the flow inside the rotary bell cup on the atomization characteristics has not been sufficiently investigated. In the present study, we focus primarily on the effect of liquid flow on the inner cup-shaped surface on atomization. In addition, we estimate the atomization characteristics based on the diameter of the liquid ligaments issuing from the cup edge.

This dissertation is organized as follows.

Chapter 1 introduces the problem to be considered.

Chapter 2 describes the experimental setup, the rotary bell cup used in the experiment, and the method used to measure the liquid film thickness on the rotary bell cup.

In Chapter 3, the investigation of the liquid flow pattern on the cup surface under different operating conditions (primarily for high-viscosity liquids) and the effects of these flow patterns on the breakup pattern at the cup edge are described. The results show that the presence of grooves at the cup edge induces the division of the liquid film on the cup surface without the occurrence of film breakup, thus forming large regions that experience fine-ligament breakup. This yields a breakup pattern at the bell cup that differs from the breakup patterns of conventional rotating flat disks. Observation and classification of the flow patterns on the cup surface revealed that, in the case of radial streak and partial dry film formation, the flow rate into the grooves was uniform and the breakup pattern from the cup edge was that of fine-ligament breakup, which enables good atomization. The variations in the ligament

diameter with the different liquid flow rates are suppressed by the grooves in the cup edge and by the constraint on the ligaments generated by the groove width. Consequently, no large effects were observed when the liquid flow rate was varied.

In Chapter 4, the characteristics of the liquid film of the cup surface, which is a preliminary process in an atomization by rotary bell cup, are described. Measurement of the liquid film thickness on a flat disk by the contact needle method yielded values close to the theoretical values, indicating that the liquid film on the surface was smooth with uniform thickness in both the circumferential and radial directions. This also indicates that ligaments that form at the cup edge should be uniform with little variation in diameter. Measurement of the ligament diameter confirmed that the liquid flow ports tend to induce a non-uniform spread of the liquid film over the bell cup surface, in the film thickness profile in the circumferential direction. In contrast, the measured values of the radial liquid film velocity become smaller than the calculated values. This may result, for example, from slippage between the liquid film and the rotary bell cup surface in the circumferential direction or from a force in the direction opposite to the rotation that acts on the liquid film, which flows radially due to the Coriolis force.

In Chapter 5, the atomization of the rotary bell cup, which describes the relationship between the liquid ligament diameter and the Sauter mean diameter, is discussed. The ligament diameter was confirmed to be constrained by grooves in the cup edge, and uniform droplets with a narrow droplet size distribution were confirmed to form at high rotational speeds. The Rayleigh breakup of individual ligaments demonstrates that it is possible to effectively estimate the mean droplet size by performing calculations using the ligament diameter. Other than the depth and width of the groove, the distance from the groove tip to the rotary bell cup edge affects the ligament diameter and drop size. Ligaments form at all of the edge grooves and undergo Rayleigh breakup, giving rise to a narrow droplet size distribution. Under these conditions, provided that breakup occurs in the fine-ligament breakup region, similar results will presumably be obtained for a high-viscosity liquid.

Chapter 6 presents the conclusion and summarizes the results of the present study. The main findings are as follows:

- (1) Observation of the breakup patterns at the cup edge revealed that ligaments form at each groove in the cup edge without diameter variation at high rotational speeds and yield uniformly fine droplets by fine ligament breakup.
- (2) The presence of grooves at the cup edge induces the division of the liquid film on the cup surface without the occurrence of film breakup, thus forming large regions and leading to fine-ligament breakup. This demonstrates a breakup pattern in the bell cup that differed from the breakup pattern characteristics of conventional rotating flat disks.
- (3) Observation and classification of the flow characteristics on the cup surface revealed that, in the case of radial streak film and partial dry film formation, the flow rate into the grooves was uniform, and the breakup pattern from the cup edge was that of fine-ligament breakup, which enables good atomization.
- (4) Measurement by the contact needle method of the liquid film thickness on a rotating disk yielded values close to the theoretical values, indicating that the liquid film on the surface was smooth with

uniform thickness in both the circumferential and radial directions. This also shows that ligaments that formed at the cup edge should be uniform and have little variation in diameter.

(5) Measurement of the ligament diameter confirmed that the liquid flow ports tend to impart a non-uniform spread of the liquid film over the bell cup surface for the film thickness profile in the circumferential direction.

(6) Changes in the ligament diameter at different liquid flow rates are suppressed by the grooves in the cup edge and by the constraint exerted on the ligaments by the groove width. Thus, no significant effects were observed when the liquid flow rate was varied.

(7) The Rayleigh breakup pattern of individual ligaments demonstrates that it is possible to effectively estimate the mean droplet size by calculation using the ligament diameter.

Professor(Chairperson) Masatoshi DAIKOKU