

氏 名 (本 籍)	A.T.M.Rofiquel Islam (バングラデシュ)
学 位 の 種 類	博 士 (工学)
学 位 記 号 番 号	甲 第 193 号
学 位 授 与 年 月 日	平 成 15 年 3 月 25 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	Study on a Turbulent Cylindrical Wall Jet Impinging Normally on a Flat Plate (平板に垂直に衝突する円筒形壁面乱流噴流に関する研究)
学位論文審査委員	(主査) 教 授 山 下 新 太 郎 (副査) 教 授 永 田 拓 教 授 安 里 勝 雄 助教授 今 尾 茂 樹

論 文 内 容 の 要 旨

Impinging jets have been studied extensively in both theoretically and experimentally due to their numerous utilities in different engineering applications. But most of the studies are related to the normal impingement of a two-dimensional and a circular free jet on a flat plate. This experimental study considers a turbulent cylindrical wall jet that issues from an annular nozzle, flows along a cylindrical wall and finally impinges normally on a flat plate. In this type of jet flow, the boundary layer on the cylindrical wall grows and the pressure increases in the downstream direction, i.e., an adverse pressure gradient takes place along the cylindrical wall. As a result, the flow separates from the cylindrical wall and then reattaches to the impingement plate, which gives rise to a recirculating flow in the corner region between the cylindrical wall and the impingement plate. This type of jet flow has properties characterized by a wall shear layer, flow separation and reattachment. These phenomena are quite distinct from those of a normal impinging circular free jet on a flat plate, in which the flow field has a free jet region and a free stagnation region without separation and reattachment. The degree of pressure increase depends on the distance from the annular nozzle exit to the impingement plate, while the jet flow properties depend on the wall surface condition. Therefore, three types of wall surface conditions (smooth, semi-rough and rough) and a forward-facing step at an arbitrary location were employed in this study in order to disturb the flow near the wall and to control the thickness of the wall shear layer. Controlling the thickness of wall shear layer is important in many ways, such as, enhancement of heat transfer between the jet and the impingement surface, faster transportation of energy along the radial direction, etc.

The main objectives of this study are;

- (1) to study the characteristics of flow in different regions, i.e., region before impingement,

impingement region, and region after impingement, of an impinging cylindrical wall jet,

(2) to control cylindrical wall jet near the wall surface by imparting roughness to the cylindrical wall and by introducing a front-facing step into the flow, and

(3) to study the complex flow pattern into the recirculating flow region that is originated in the corner region between the cylindrical wall and the impingement plate.

At first, the general properties of a circular free jet, an impinging circular free jet on the flat plate, and a cylindrical wall jet were examined, as preliminary experiment to check the elementary flow properties of the present study. In the main experiment, mean velocities and turbulence intensities were measured with a constant-temperature hot-wire anemometer. Variations in the wall static pressure, the maximum jet velocity, the jet half-width and the boundary layer thickness were examined for different experimental conditions (wall surface conditions, and nozzle-impingement, nozzle-step and step-impingement distances). Mean flow vectors, velocity contours and visualization of flow by an oil-film method represent the flow patterns in the entire flow region and in the corner region between the cylindrical wall and the impingement plate

Basic remarks derived are as follows;

(1) The flow field in the region before the impingement can be classified into two regions; a cylindrical wall jet region near the nozzle exit section where the flow is hardly influenced by the impingement, and an impingement region near the impingement plate where the flow is definitely influenced by the impingement. The lengths of these regions increase with the increase in wall roughness and with the decrease of nozzle-impingement distance.

(2) In the impingement region, the wall static pressure, the jet half-width and the boundary layer thickness increase sharply, whereas the maximum jet velocity decreases rapidly. Furthermore, for the same nozzle-impingement distance, they increase with the increase of wall roughness.

(3) The separation point from the cylindrical wall and the reattachment point to the impingement plate are nearly constant where the nozzle-impingement distance is larger than 20. For the same nozzle-impingement distance, both the separation and reattachment distances increase with the increase of wall roughness. Besides, the recirculating flow region in the corner between the cylindrical wall and the impingement plate widens with increasing wall roughness.

(4) The flow pattern with a front-facing step and without an impingement plate can be classified into three types depending on step-height, H/s . For a small H/s ($H/s=0.5$), the streamlines are nearly parallel to the wall surface and no separation of flow takes place. When H/s equals to 1.0, the flow has distinct separation and reattachment points before and after the step, respectively, and the flow is affected by the nozzle-step distance. For a relatively large H/s ($H/s=2.0$), the flow deflects largely at the step along the radial direction, and does not reattach to the cylindrical wall after the step.

(5) In the case of $H/s=1.0$ where the flow separates and reattaches before and after the step, the flow pattern with a front-facing step and with an impingement plate can be classified into three main types based on combinations of nozzle-step and step-impingement distances, and the separation points and reattachment points are shown.

論文審査結果の要旨

衝突噴流はその工業的利用用途の広さから理論的にも実験的にも数多くの研究が行われているが、そのほとんどは二次元噴流や円形噴流の平板への衝突に関するものである。そこで申請者は、環状の噴出口から出た環状噴流が円筒面に沿って流れ、下流に設置された平板に衝突する流れを実験的に明らかにした。この円筒形壁面噴流においては、下流方向に境界層が成長し圧力が増加する。すなわち、逆圧力こう配を生じる。その結果、噴流は円筒面からはく離して衝突平板へ再付着する流れとなり、円筒と衝突平板の角部に循環領域を形成する。このように、壁面せん断層、はく離、再付着によって特徴づけられる衝突噴流は、はく離も再付着も生じない自由噴流が平板へ衝突する場合とは全く異なったものとなる。ここで、圧力の増加は環状噴流出口と衝突平板までの距離に依存し、また噴流の特性は壁面の条件に依存する。そこでこの研究では、粗さを変えた壁面と円筒面に段をつけた場合を取り上げ、壁面せん断層を操作することでこの衝突噴流の特性がどのように変わるかを調べた。こうした特性の解明は、噴流と平板との熱伝達や半径方向への物質輸送の促進と抑制に結びつくものである。

この研究の主な目的は以下の通りである。

- (1) 平板に垂直に衝突する円筒形壁面乱流噴流の、衝突前領域、衝突領域、衝突後領域のそれぞれの流動特性の解明
- (2) 円筒面の粗さを変えた場合と円筒面に段をつけた場合の噴流特性の解明
- (3) 円筒と衝突平板の角部にできる循環領域の複雑な流動の解明

論文では、まず予備的実験として、この流れの基礎となる円形噴流、衝突円形噴流、円筒形壁面噴流のそれぞれの流動特性を調べ、これまでの実験結果と比較検討した上で、平板に垂直に衝突する円筒形壁面噴流の特性を実験的に明らかにした。実験には定温度熱線流速計を用い、平均速度分布、乱れ強さ分布、平均速度ベクトル分布とその等値線図、最大速度・噴流半値幅・境界層厚さの変化、および静圧分布を、円筒壁面粗さ、衝突平板までの距離、ステップの位置を種々に変えて調べた。また、油膜法による流れの可視化を行い、はく離・再付着を含む流れ場の様子を調べた。以下に本研究で得られた結論を要約する。

- (1) 衝突前の領域は、衝突の影響を全く受けない円筒形壁面噴流領域と衝突領域に分けることができ、円筒面が粗いほど衝突領域が広がる。また、衝突平板までの距離が近いほど衝突領域の割合が大きくなる。
- (2) 壁面静圧、噴流半値幅、境界層厚さ、噴流最大速度のいずれも円筒形壁面噴流領域と衝突領域との境界において急激に変化し、その変化は壁面が粗いほど著しい。衝突領域内では、壁面静圧、噴流半値幅、境界層厚さは急激に増加し、噴流最大速度は急増する。
- (3) 衝突平板までの距離 L と噴流出口幅 s との比 L/s が 20 以上では、はく離点の位置と再付着点の位置はほぼ一定となる。円筒と衝突平板の角部からこのはく

離点および再付着点までの距離は円筒面が粗いほど長くなり、粗面の場合ほど角部にできる循環領域が大きくなる。

- (4) 衝突平板のない段付き円筒上の壁面噴流は、ステップ高さによって3種類に分類される。ステップ高さ H と噴流出口幅 s との比 H/s が小さいとき ($H/s=0.5$)、流線は壁面にほぼ並行で流れはく離しない。 H/s が 1.0 の場合には、ステップで流れはいったんはく離した後円筒面へ再付着する流れとなる。このときのはく離点位置と再付着点位置は噴出口からステップまでの距離に依存する。 H/s がかなり大きくなると ($H/s=2.0$)、流れはステップにおいて半径方向へ大きく偏向し、円筒面へ再付着しなくなる。
- (5) ステップで流れがいったんはく離した後円筒面へ再付着する段付き円筒上の壁面噴流 ($H/s=1.0$) に衝突平板をつけた場合、噴出口からステップまでの距離とステップから衝突平板までの距離の組み合わせによって、流動形態はさらに3種類に分けられ、それぞれの場合はく離位置、再付着位置を示した。

本論文によって得られた以上の知見と成果は、工学上および工業上、重要な貢献をするものであると判定された。

最終試験結果の要旨

山下新太郎、永田 拓、安里勝雄、今尾茂樹で構成する審査委員会は、この論文および論文別刷に対して、ジャーナル論文2編および国際会議論文3編は申請者によって書かれており、その論文は学位論文として十分に完成された内容を有しているものと認め、最終試験（公聴会）を平成15年2月14日に開催して審査した。審査委員会において、学力、研究能力および外国語能力（英語）について口頭による試問を行い、審議の結果、合格と判定した。