

論文の要旨

題目 正方形断面を有する曲り管路内における高 Womersley 数脈動乱流構造に関する研究
(Pulsatile turbulent flow in a square-sectioned curved duct at high Womersley number)

氏名 大木 純一

本稿は曲り管路内に生じる脈動流の主に速度場特性について論ずるものである。研究の応用対象は自動車用エンジンの吸排気流れであり、時空間的に複雑な実現象を、曲り管路内流れとして簡略的に捉え、より基礎的かつ学術的観点から流れ場の現象理解を目的とする。流れの諸条件（管路形状や Reynolds 数等）は吸排気流れ特性に基づき、管路の水力直径と時間平均バルク速度から定義される Reynolds 数は $Re = 36,700 \sim 48,000$ 、脈動の無次元周波数を表す Womersley 数は $\alpha = 59.1 \sim 70.9$ である。本稿では、当該現象の着目点ごとに章立てされており、序論及び結論を含めて全 5 章から構成される。

第 1 章では吸排気流れ特性について簡単に述べ、本研究に関連する管内流れを扱う基礎研究のレビューを行う。生体医工学分野における重要性から、曲り管内の脈動層流場に関する議論は活発であり、二次流れ構造等に関して詳細に理解されている。曲り管内（定常）乱流場についても、Swirl-switching に代表される乱流の比較的大規模な組織構造的特性が研究されている。一方、本研究が扱う脈動乱流場については、近年における研究対象の拡大に伴い幾つかの報告例があるが、その議論は未だ不十分である。特に脈動周期よりも小さい時間スケールの議論は少なく、乱流特有の非定常的な特性は未解明である。このことが本研究の学術的背景となる。加えて、第 1 章では、本研究の主な方策である流体実験の意義を、数値計算分野の発展と関連付けて説明する。

第 2 章では、曲り部や曲り通過後に生じる主流の偏流特性及び局所的逆流について述べる。実験で使用した管路は二つの曲りを有する S 字形状を成し、流れの発生源として実機の 4 気筒ガソリンエンジンを使用した。速度 2 成分を取得する時系列 Particle Image Velocimetry (PIV, サンプリングレート: 10 kHz) を用いて管軸に水平な断面内の速度場を計測した。多くの関連研究にて報告されてきたように、曲り内壁側で主流が加速され、上流側に位置する第 1 曲り通過後は高速域が外壁側へと対流される。高周波脈動を有する流れ場に特有の現象としては、曲りの内壁側で生じる逆流がある。この現象は境界層剥離とも捉えられ、曲りに元来存在する管軸方向の圧力勾配と脈動起因の圧力勾配の相加作用によって発生するものと考えられる。このことは、速度データに対する Proper Orthogonal Decomposition (POD) 解析結果（逆流を表すモード構造の非定常的挙動）からも理解できる。

第 3 章では、第 2 章と同様の条件下で、平均的な二次流れ構造に着目した。第 2 章と異なるのは速度場計測手法であり、流れの発生源であるエンジンとの位相が同期されたステレオ PIV を使用した。上流側の第 1 曲り通過後は、二次流れとして最も基本的な Dean 渦に近い構造が観察されるが、第 2 曲り通過後は Dean 渦と逆回転の Lyne 渦が発生する。第 3 章では、実験と同条件下の Computational Fluid Dynamics (CFD) 解析（乱流モデル: RNG $k-\epsilon$ モデル）も扱い、実験で明らかとなった二つの曲りを通過する過程で発達する二次流れ構造に関する考察を加える。二次流れを駆動する力: 遠心力及び圧力勾配を検討することで、第 2 曲りでは曲り内壁方向の二次流れ（曲りと首尾一貫しない流れ）を生じることが直接的に示される。これは第 2 曲り上流側の主流の偏流に起因するものである。また、この仮説は、曲り間の直管長さが異なる管路を対象とした計算結果によって裏付けられる（直管長さが異なると、第 2 曲り前の偏流の程度が変化する）。

第 4 章では二次流れの非定常性に着目し、定常乱流条件で報告されてきた Dean 渦の振動現象、いわゆる Swirl-switching に関する議論が主となる。実験では専用の脈動流発生装置を使用することで、より理想的な（サイン波に近い脈動波形）流入条件と、定常乱流条件を実現した。管路断

面内の速度場は時系列ステレオ PIV（サンプリングレート：5 kHz）によって計測された。面内の速度 2 成分データに対して POD 解析を適用すると、モード 0 として Dean 渦，モード 1 として一つのスワールが断面全体を占める構造が抽出される。モード 1 のスワールが Swirl-switching を記述する重要な構造であり，Swirl-switching を脈動流下で示したのは知る限り本研究が初である。Dean 渦とスワール構造それぞれに対応する時間依存の POD 係数と，バルク速度の時間波形を検証することで，脈動流においては Dean 渦強度やスワール構造の出現に時間的な規則性を有することが明らかにされる。Dean 渦強度の時間変化は，おおよそバルク速度変化に従うが，両者には特定の時間差が存在する。これは，二次流れが曲り部から計測位置（曲り出口から $1D$ 下流， D ：水力直径）まで対流する時間に相当すると推測される。第 4 章では定常乱流場に着眼し，Swirl-switching の起源に対する議論も行う。過去の文献でなされてきた「曲り上流側の主流方向に伸びる大規模構造が対流する」という仮説を受け，本研究では曲り前の主流方向変動速度と曲り後の管路断面内変動速度に対してスペクトル POD（周波数領域の速度データに対する POD）を実施した。曲り後では，ある特定の時間スケール（Strouhal 数： $St=0.38$ ）を有するスワール構造が抽出され，これが Swirl-switching の存在を表す。一方で，曲り前では特定の時間スケールにおけるエネルギーピークが存在せず，あらゆるスケールを有する構造が連続的に分布する。この結果は，Swirl-switching が曲り前の大規模構造に由来するものではなく，曲りを機に突如として発生する秩序だった乱流変動であることを示唆する。

以上のように，本研究では曲り管路内における脈動乱流に特有の現象や，工学上重要となる二次流れ構造を決定する要因，及び曲りに起因する乱流構造等が解明され，第 5 章で包括的な結論を述べる。