

高時間分解能PIVによる円柱ウェークの乱流解析

Turbulence analysis of a circular cylinder wake by
means of time-resolved PIV

近江 和生
(Kazuo OHMI)

円柱ウェーク（後流）の複雑化したカルマン渦の3次元挙動と、それに伴うウェーク自体の乱流化現象について、2次元および3次元 PIV を用いて実験的に調べた。円柱のウェークにおいては、境界層が乱流剥離を始める臨界レイノルズ数よりはるか以前の領域で、ウェークの相似則さえ未だ成立しない低レイノルズ数の領域においても、発生カルマン渦には不規則な3次元変形が発達し、渦軸線の主流方向への傾斜、finger や knot の発生、隣り合う渦のスパン半ばでの位相転位（繋ぎ替え）、スパン方向に周期的な縦渦の発生、といった特徴的な3次元構造の発達過程が知られている。しかしこれらの現象に関する報告の多くは、流れの可視化等の定性的な実験観察法に基づくものか、熱線、LDV、圧力変換器等の一点計測法でウェークをトラバースした結果に基づくもので、得られた知見についてはさらに精密かつ定量的な検証を行う必要がある。そこで本研究では、円柱ウェークの発達過程を3次元 PIV による測定実験で定量的に可視化解析して、従来の定性的な可視化実験と一点計測法による定量的な実験結果を相互に関連付けるような、空間および時間の両基軸から現象進展を調べることを試みた。

円柱ウェークのPIV実験は、試験部水路が $175 \times 175 \times 950 \text{ mm}^3$ の回流式水槽で行った。供試円柱はアスペクト比が比較的小さい模型（直径19 mm に対してスパン長175 mm）で、水路の下流部中央で軸方向を水平または垂直にして設置した。これらの円柱軸方向に対して、PIVの流速測定面は常に水流進行方向と平行な鉛直断面であり、したがってこの測定面は円柱軸に対して平行または垂直の位置関係となる。2台のステレオ撮影用CCDカメラが、この測定面に対し互いに逆方向の傾斜光軸角で固定されており、それらのレンズは合焦点撮影のためにアオリを付けた Scheimpflug 配置で固定した。カメラ画像の較正は、実験に先立って測定部でドットパターンを描いた較正板を撮影し、画像のマッピング関数を決定する方法で行った。実験での一様流速は $5.5 \sim 11.0 \text{ mm/s}$ の範囲であり、レイノルズ数は100または200に設定した。一様流れの乱れ強さはこの範囲の平均流速において1.5%以下であった。円柱両端部での攪乱が、円柱ウェークの本来的な3次元構造に干渉することが予想されるので、円柱のアスペクト比は9.21を最小値とする5通り値に設定して、それによるウェークの進展過程への影響も調べた。これらの実験結果を通して、円柱ウェークの3次元構造に関する以下のような特徴的な挙動を明らかにすることができた。まず円柱軸に対して垂直な測定断面でのPIV結果によれば、瞬時渦度分布を通して見られるウェークの形状は典型的なカルマン渦の配置形状であるものの、同じ瞬間の3次元速度分布では、渦度分布で見た渦度のピーク部分（渦中心）断面垂直方向の流速成分が同様なピークを形成しているのが観察され、すでにこの段階で個々のカルマン渦の渦核部分には、渦の軸方向への微弱な二次流れが形成されていることが明らかになった。また、このような断面渦度と断面垂直

方向速度との間の相関関係は、高いレイノルズ数の実験 (=200) でさらに増大し、これに対応して後流域での強い乱れはより下流域まで拡大し、レイノルズ剪断応力については近傍後流域での生成がとくに増大する点も明らかになった。

次に円柱軸に平行な測定断面でのPIV結果に関しては、まずレイノルズ数100の実験ではカルマン渦の渦軸は円柱軸に対してほぼ平行であるものの、時に一時的ではあるが過去の実験でも指摘された渦のfingerの発生、あるいはスパン方向に小さな渦のセル構造が発生する現象が見られ、レイノルズ数がかなり低い領域でこのような3次元構造が見られることから、アスペクト比の小さい円柱ではウェークの3次元化がより早い段階から発達することが明らかになった。一方レイノルズ数200の実験では、渦軸は円柱軸に対してしばしば傾斜角をもち、しかもこの傾斜方向が時間とともに変化し得ることが観察された。それに加えて、カルマン渦の渦核はスパン方向により短くセル構造化し、渦の下流進展にともなって渦軸がスプリッティングを起こしたり、前後の渦軸間で繋ぎ替えを生じたりのような3次元現象が観察された。これらに対応して乱れの分布結果から、より大きいレイノルズ数での近傍後流域でより活発な乱れ生成が観測され、時間平均速度の分布結果からは渦軸が円柱軸に対して時間平均的にも傾斜角度を持つことが確認された。

以上の実験結果より、アスペクト比の小さい円柱による実験ではアスペクト比の大きい実験と比較して、様々な不規則形態の3次元渦運動が100程度の低レイノルズ数領域からすでに観察され、これらの3次元渦運動は円柱スパン方向に配列する小規模のセル構造や、渦軸が主流方向に短く突出するfinger構造、あるいは渦軸のスプリッティングや渦軸同士の繋ぎ替え等の、さらに不規則な3次元渦構造へと発達していくことが明らかになった。