

ヘリシティを用いた変分法による旋回乱流の研究

Variational approach to turbulent swirling flows, with the aid of helicity

吉澤 徹 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

横井喜充 西島勝一 東京大学生産技術研究所

伊藤早苗 九州大学応用力学研究所 〒815-8580 春日市春日公園6-1

伊藤公孝 核融合科学研究所 〒509-5292 土岐市下石町322-6

Akira Yoshizawa, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 153-8505

Nobumitu Yokoi and Shoiti Nisizima, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

Sanae Itoh, Research Institute of Applied Mechanics, Kyushu University 87, Kasuga, Fukuoka 815-8580

Kimitaka Itoh, National Institute for Fusion Science, Toki, Gifu, 509-5292

A mechanism of sustaining projecting velocity structures is sought in turbulent swirling flows, with the aid of a variational method. The turbulent-energy production rate, which expresses the energy-cascade rate from large-to small-scale components of motion, is a primary cause of the disappearance of such structures. The helicity arising from a swirling motion is identified with an effect hampering the energy cascade. The variational principle is applied under the condition that the production rate of turbulent energy is minimum with the constancy of helicity. The resulting state is expressed by the mean vorticity proportional to its curl. Two flow phenomena are examined on the basis of this vorticity equation; one is the retardation or reversal of the centerline axial velocity of a swirling pipe flow, and the other is the acceleration of the centerline axial velocity of a rotating-pipe flow. The difference between these two mechanisms is related to the centerline axial component of the vorticity.

旋回（回転）を伴う流体運動は、自然現象を含めて種々の流れで観測される。これらの流れが乱流状態にあるとき、乱れの持つもっとも基本的な性質である、強い拡散

（混合）効果だけではその特徴を理解できない場合が少なくない。

流体運動と旋回効果が密接した例としては、円管内旋回乱流がある。旋回のない円管内乱流においては、平均流速分布は層流状態に比べ、平たんな形をしている。これは、層流状態のような中心部の尖った流れ構造は、乱れによる強い拡散作用の下では持続できないためである。

羽根車で流体を旋回させながら円管内を流すと、中心部が減速し、最大速度点が軸からずれる。入り口での旋回速度をさらに上げると中心部の逆流が発生し、旋回速度が粘性のため減少するにつれて逆流が消え、最終的には通常の平たんな流速分布をもつ円管内乱流となる。このような旋回流の挙動から、層流状態での流速分布以上の際だった（尖った）平均流構造が、乱れによる拡散効果に抗して存続し得ることが分かる。

これに対して、円管壁を回転させ、一定圧力勾配下で流れを発生させるとどうなるのであろうか。静止円管内旋回流では軸を含む領域が旋回源となっているが、この場合旋回源は流体の最外側部すなわち円管壁にある。回転円管内流れの観測より、十分に発達した状態では平均流は非回転の場合に比べ、中心軸領域が加速され、む

しろ層流状態の流速分布に近づくことになる。この場合にも、層流的な速度分布が乱れを伴いながら維持されている。

旋回源の位置の差を除くと、平均流が中心軸方向の流れと同軸まわりの流れ（回転運動）からなるという意味では、上の2つの流れは一見極めて類似している。しかし、中心軸部分では一方は減速し（逆流さえ生じる）、他方は加速するという、正反対の挙動を示す。

この2つの流れの挙動の差を引き起こす機構はなんであろうか。旋回（回転）運動が本質的な流れの解析は、いぜんとしてアンサンブル平均乱流モデルにとってむずかしい課題となっている（回転円管内乱流は3次の非線形モデル、応力型のモデルで研究が進んでいる）。平均流のような大きなスケールの流れ成分を扱うという点では、乱流粘性および2次相関型モデルと類似しているが、ヘリシティを拘束条件として用いる、変分法という全く異なる視点で旋回流を考えてみる。

本研究においては、静止円管内旋回流では中心軸領域、回転円管内流では最外側部がそれぞれヘリシティ注入領域になることから、層流化の原因の差異は中心軸付近での渦度の挙動の差と関係することが示される。

アンサンブル平均乱流モデルにこれらの知見を取り入れることが、今後の課題となる。