

平面ポアズイユ流の乱流遷移における 不規則変動の成長過程

西 岡 通 男*

流れの不規則化は乱流遷移を特徴づける本質的な過程である。最近、カオス理論の発展によって、同心円筒間のクエット流やベナール対流などの遷移が盛んに研究されているが¹⁾、それは、この理論の成果として、流体運動のような散逸力学系においてその制御パラメータを連続的に変えていくと有限回の解の分岐の後に非周期運動（カオス）が出現することが見いだされたからであり、上記の閉じた流れの系での乱流の発生との密接な関係が注目されている。このカオスは時間的には非周期的で不規則な運動状態であるが、運動の空間構造は比較的単純であり、規則的な層流状態とほとんど変わるところがない。このように単純な構造の運動が、外乱を必要とせず系固有の振舞としてカオスに至ることは極めて注目に値する。ところで、境界層や自由剪断流のような外乱環境に敏感な開いた流れの系においては不規則化の原因として外乱（流れに潜む残留乱れや音波のように外から加わる乱れ）の寄与を無視することはできない。事実、文献²⁾は、二次元後流において人為的に導入された周期的な波動と残留乱れから成長する自然攪乱との干渉を調べ、流れの不規則化が両者の非線形の相互干渉により進行することを明確に示している。すなわち、開いた流れの系では、不規則（連続スペクトル）外乱に由来する攪乱が成長して互いに干渉しあうことが不規則化に大きく寄与すると考えられる。

さて、壁乱流への遷移過程における重要な特徴は、遷移最終段階において局所的な乱流が現れ、不規則化が一挙に進む点であるが、一連の不安定過程でどのように不規則化が進むかという詳細は

これまで良く理解されていなかった。そこで、本稿では、平面ポアズイユ流のリボン振動攪乱による亜臨界乱流遷移の実験結果³⁾に基づき、流れの不規則化がどのように進むか考察する。

まず、この遷移過程を概説すると、リボン振動法で導入されたT-S波動の実効値振幅が中心速度の約1%を越すと、基本流のспан方向の僅かなゆがみ成分とT-S波動の非線形干渉によって、T-S波動に同期する斜行波対が生まれ、これが二次不安定で増幅し、波動系は三次元発達する（peak-valley構造）。その結果高剪断層が形成され、さらに高周波二次不安定で高剪断層からヘアピン渦が生まれる。ヘアピン渦が次々生まれる段階になると、それらの通過に伴い、直下の壁近くから剪断層が立ち上り、ヘアピン渦として浮上し始める。この段階はもう局所的な乱流の状態である。

さて、各段階の代表的な u 変動をスペクトル解析した結果と考察をまとめよう。

- (1) 残留乱れは実効値で中心速度 U_c の約0.09%程度であり、そのスペクトル成分 $E(f) \Delta f / U_c^2$ ($\Delta f = 0.5648\text{Hz}$) は 10^{-8} 以下、主成分は、約700Hzのファンノイズを除くと、30Hz以下の音波的な低周波成分と60~70HzのT-S波動成分で、いずれも連続スペクトルである。
- (2) リボン振動法による規則的なT-S波動（72.3Hz）が数居振幅約1%を越し、斜行波が成長し始めると、それまで互いに独立であったT-S波動と残留乱れ（主に30Hz以下の低周波成分）が干渉し始め、基本波周りに側帯的に連続スペクトルが成長する。またこれに呼応して低周波成分も増加する。

* 大阪府立大学工学部

- (3) そこで、基本波とその側帯波成分を抽出し、その合成波形を
- $$u(t)/U_c = A_0[1+A(t)] \cos [2\pi f_{rs}t + P(t)]$$
- と表現したときの振幅変調 $A(t)$ および位相変調 $P(t)$ を調べると、 $-A(t)$ と $P(t)$ の波形はいずれも低周波成分の波形と相似な形を持つ。側帯波はこのように低周波成分と密接に関係している。
- (4) 波動の三次元発達 (peak-valley 発達) が進行すると基本波の高調波成分が現れるが、基本波の場合と同様それらの周りに側帯波が成長する。このように残留乱れの低周波成分は高周波数域に運ばれる。高剪断層位置でそれがとくに顕著であり、側帯波が斜行波的であることを示唆している。
- (5) 高周波二次不安定の段階になると、このように高周波域に運ばれた連続スペクトルは、この高周波不安定によって激しく増幅され、むしろ規則成分よりも振幅を増す。すなわち、高周波域の連続スペクトルを合成すると規則成分が増幅される位相帯で全く同様に増幅さ

れていることが知れる。

- (6) 興味深いことに、peak 領域で平均速度分布が壁乱流の対数型に近づく段階では、規則成分のスペクトル分布が乱流型の連続スペクトルの分布形に近づく。

以上のように、不規則化は、斜行波対が成長する二次不安定の段階で低周波域の残留乱れが T-S 波動や斜行波対あるいはこれらの高調波と非線形干渉することにより高周波域に運ばれ、次に、それらが高周波二次不安定の段階で一気に増幅するという二つのプロセスによって進行する。このことは、層流制御の立場から見ると、二次不安定の進行を抑制することが決定的に重要であることを示していると言える。

参考文献

- 1) Tatsumi, T. (1984) Turbulence and Chaotic Phenomena in Fluids, North-Holland.
- 2) Sato, H. and Saito, H. (1975) J. Fluid Mech. 67, 539-559.
- 3) 西岡, 浅井, 鈴木 (1988) ながれ 7, 336-351.