

7.6 乱流遷移

2019年の乱流遷移研究の話題としては、5年に1度開催されている国際理論・応用力学連合の乱流遷移に関する国際会議（IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition）が英国・ロンドンで9月2～6日に行われたことがあげられよう（1）。本会議では、プレナリー講演6件、基調講演3件、口頭発表68件、ポスター発表74件の発表が行われた。そのセッションでは、線形安定性、受容性、力学系、高速流、制御、実験、一般と並んで、ステップや粗さなどの表面性状に関するテーマが取り上げられていることが注目される。

表面性状が乱流遷移に影響を与えることは、遷移研究の初期から認識されていたが、研究にかなりの進展が見られる近年でもその重要性は変わらず、2019年も粗さ、吸込、凹面、横断流などに関する研究が発表されている。もちろんこれらの中の一要因のみによる遷移という単純なケースではなく、複数の要因が複合したものが増えている。論文を *Journal of Fluid Mechanics* から引用してみると、高速流中の菱形粗さ列の縦渦対の役割を明らかにした直接計算（2）、高速流中の凹面上のゲルトラー渦を吸込と吹出の組み合わせで励起させた流れの直接計算（3）、分布粗さが固有モードとの共鳴相互作用によって横断流不安定性に影響する解析（4）、強い吸込が誘起する境界層内の不安定性の解析（5）などがある。

高速流における遷移の研究は前段落中でも引用したが、それ以外にも高速流、圧縮性流れについての研究は多い。気体内粒子による高速境界層の受容性（6）、音波が滑面及び波状面上境界層の受容性（7）を一例としてあげるが、それ以外にも多数の研究がある。

一方で境界層を初めとする壁面せん断流の不安定性、遷移は古典的なテーマであるが、相変わらず活発に研究されており、平面ポアズイユ流における T-S 型遷移とバイパス遷移の出現条件の直接計算（8）、散乱された音波の受容性問題（9）、平板境界層における乱流斑点の直接計算（10）などが見られる。

壁面せん断流の中でも境界層と並んで重要な円管内流れは、乱流パフやスラグのような孤立乱流塊の発生、成長過程が、近年かなり詳しく調べられている流れ場であるが、ここでは曲がり管内の孤立乱流塊界面の乱れエネルギーを直管流と比較したもの（11）（12）や、周方向対称進行波の進化（13）、速度分布形状を質量力によって（14）、また壁面振動によって（15）変化させることによる円管内乱流の再層流化の研究が行われた。

自由せん断流においては、剥離泡内の遷移と主流乱れの関係の直接計算（16）、ノズル出口境界層分布と噴流不安定性の関係に対する LES 計算（17）が行われた。

乱れの開始における周期軌道の問題は、日本の研究者が大きな貢献をしてきたが、これ關しても、平衡解近傍に力学的に接続する軌道の計算に変分法を取り入れたもの（18）や、ミニマル平面ジェット流におけるさらなる進展（19）が見られた。

線形安定性に比較して、いまだ研究途上と言える非線形安定解析に関しては、冒頭にあげた国際会議でも多数発表がなされているが、*Annual Review of Fluid Mechanics* に、線形解析から始まり各種非線形安定解析にまで及ぶ詳しい解説が出された（20）。今後、非線形安定解析のさらなる発展が期待される。

〔一宮昌司 徳島大学〕

参考文献

- (1) IUTAM transition 2019
<https://www.iutamtransition2019.org/> （参照日 2020年4月5日）
- (2) Shrestha, P., and Candler, G. V., Direct numerical simulation of high-speed transition due to roughness elements, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.868 (2019), pp. 762–788.
- (3) Chen, X., Huang, G. L. and Lee, C. B., Hypersonic boundary layer transition on a concave wall: stationary Görtler vortices, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.865 (2019), pp. 1–40.
- (4) He, J., Butler, A. and Wu, X., Effects of distributed roughness on crossflow instability through generalized resonance mechanisms, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.858 (2019), pp. 787–831.
- (5) Brynjell-Rahkola, M., Hanifi, A. and Henningson, D. S., On the stability of a Blasius boundary layer subject to localised suction, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.871 (2019), pp. 717–741.
- (6) Chuvakhov, P. V., Fedorov, A. V. and Obraz, A. O., Numerical modelling of supersonic boundary-layer receptivity to solid particulates, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.859 (2019), pp. 949–971.
- (7) Hernández, C. G. and Wu, X., Receptivity of supersonic boundary layers over smooth and wavy surfaces to impinging slow acoustic waves, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.872 (2019), pp. 849–888.
- (8) Zammert, S. and Eckhardt, B., Transition to turbulence when the Tollmien-Schlichting and bypass routes

- coexist, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.880 (2019), R2.
- (9) Raposo, H., Mughal, S. and Ashworth, R., An adjoint compressible linearised Navier-Stokes approach to model generation of Tollmien-Schlichting waves by sound, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.877 (2019), pp. 105–129.
 - (10) Marxen, O. and Zaki, T. A., Turbulence in intermittent transitional boundary layers and in turbulence spots, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.860 (2019), pp. 350–383.
 - (11) Rinaldi, E., Canton, J. and Schlatter, P., The vanishing of strong turbulent fronts in bent pipes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.866 (2019), pp. 487–502.
 - (12) Barkley, D., Taming turbulent fronts by bending pipes, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.872 (2019), pp. 1–4.
 - (13) Ozcaikir, O., Hall, P. and Tanveer, S., Nonlinear exact coherent structures in pipe flow and their instabilities, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.868 (2019), pp. 341–368.
 - (14) Marensi, E., Willis, A. P. and Kerswell, R. R., Stabilisation and drag reduction of pipe flows by flattening the base profile, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.863 (2019), pp. 850–875.
 - (15) Scarselli, D., Kühnen, J. and Hof, B., Relaminarising pipe flow by wall movement, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.867 (2019), pp. 934–948.
 - (16) Hosseinverdi, S. and Fasel, H. F., Numerical investigation of laminar-turbulent transition in laminar separation bubbles: the effect of free-stream turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.858 (2019), pp. 714–759.
 - (17) Bogey, C. and Sabatini, R., Effects of nozzle-exit boundary-layer profile on the initial shear-layer instability, flow field and noise of subsonic jets, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.876 (2019), pp. 288–325.
 - (18) Farano, M., Cherubini, S., Robinet, J.-C., De Palma, P. and Schneider, T. M., Computing heteroclinic orbits using adjoint-based methods, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.858 (2019), R3.
 - (19) Lustro, J. R. T., Kawahara, G., van Veen, L., Shimizu, M. and Kokubu, H., The onset of transient turbulence in minimal plane Couette flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.862 (2019), R2.
 - (20) Wu, X., Nonlinear theories for shear flow instabilities: Physical insights and practical implications, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.51 (2019), pp. 451–485.