

TOPICS

[0682] Taylor 渦流の温故知新

二重円筒間に流体を満たし、内円筒を回転させると臨界 Reynolds 数以上では Taylor 渦流が形成される。1923 年に G. I. Taylor¹⁾ が初めてその存在を報告して以降、100 年以上が経った今なお活発に研究が進められている。G. I. Taylor は他にも Taylor bubble や Taylor diffusion など、多くの流体物理現象の理論を築き上げたことで知られる。G. I. Taylor の人柄や研究に対するポリシーについては、彼の弟子である G. K. Batchelor が *J. Fluid Mech.* に寄稿した記事²⁾ から窺い知ることができる。なお、G. K. Batchelor 自身も Batchelor scale など流体分野で優れた功績を残しており、師弟ともに偉人である。

1923 年に出版された G. I. Taylor の原著論文では、安定性解析と Taylor 渦流が発生するメカニズムや条件など、極めて詳細かつ理論的に示されている。この流れ系の特徴は、層流状態から乱流状態への遷移過程において層流 Taylor 渦流、波動 Taylor 渦流、弱い乱流 Taylor 渦流、乱流 Taylor 渦流へとカスケード型遷移を示すことにあり、乱流の発生メカニズムに興味のある物理学者や応用数学者が精力的に研究を行ってきた。これらは主に理学分野の研究者が中心であったが、1975 年に片岡ら³⁾ が本流れ系を化学プロセスに適用する研究を発表して以降、化学工学の観点からの Taylor 渦流研究が加速的に進展した。Taylor 渦流は図 1 のように互いに逆方向に回転する渦セル対を一つのペアとして、渦セル対間の物質移動は（理想的には）ないものと考えることができる。そのため、各渦セル対が良く混合された回分式反応器とみなせる。さらに、比較的小さな軸流を与えると渦セルが形状を保ったまま押し出されることから、連続操作が可能である。流動状態にも依存するものの、理想的な Plug flow とほぼ同等の滞留時間分布を示すため³⁾、均一なプロセッシングに適しており、様々な化学プロセスへの適用が検討されてきた。

近年（2010 年代以降）の化学工学に関連した研究は主に 2 つの方向に大別される。1 つ目は化学プロセスで頻繁に扱う非 Newton 流体や混相流を対象とした研究である。特に非 Newton 流体に関する研究は活発で、例えば、高分子流体では Taylor 渦セルは軸方向に伸張した形になり、渦セル内の混合性能が低下することが報告されている⁴⁾。あるいは、粘弾性流体系では elasto-inertial turbulence によって安定した Taylor 渦流が形成されないことが知られているが、

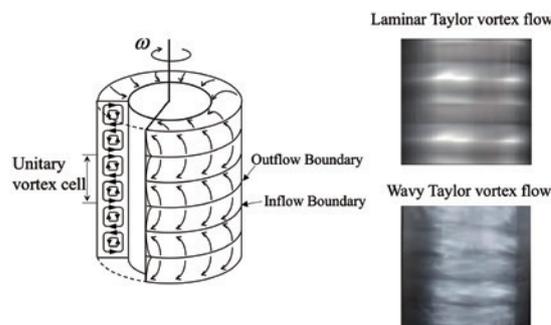


図 1 Taylor 渦流

Lacassagne⁵⁾ によると shear-thinning 性が強い場合は弾性の効果が見かけ上は現れず、Newton 流体系と同じような流動遷移特性を示す。つまり、shear-thinning 性は弾性効果を抑制する可能性が指摘されており、今後の進展が期待される。

もう 1 つの方向は、反応系、特に粒子生成への適用研究である。粒子生成ではプロセッシング中の剪断力が支配的なパラメータの一つであり、Taylor 渦流系では剪断速度分布が比較的狭く、均一なサイズの粒子生成（ここでは粒子の合成だけでなく晶析も含む広義の意）に適している。近年はリチウムイオン電池の陰極材料創生⁶⁾ や反応晶析⁷⁾ への適用例が報告されている。また、より剪断速度分布を狭くするための内円筒形状の改良も行われており、形状を僅かに変えることで、より均一なサイズの粒子生成が可能となる⁸⁾。

2023 年には Taylor 渦流の源流ともいふべき論文の出版から 100 年経ったことを記念して、*Phil. Trans. R. Soc. A* にて特集号が組まれた。Taylor 渦流を主テーマとする International Couette-Taylor Workshop (ICTW) も 1979 年に初めて開催されて以降、今も 2 年ごとに開催されている。100 年以上続く研究の歴史を辿ることで、測定機器や解析精度が飛躍的に向上した現代だからこそ解き明かせる様々な流体物理問題、そして、物質生産に資する工学研究のアイデアも見えてくるだろう。

参考文献

- 1) Taylor, G. I. : *Phil. Trans. R. Soc. A*, **223**, 289-343 (1923)
- 2) Batchelor, G. K. : *J. Fluid Mech.*, **173**, 1-14 (1986)
- 3) Kataoka, K. *et al.* : *J. Chem. Eng. Japan*, **8**(6), 472-476 (1975)
- 4) Cagney, N. and Balabani, S. : *Chem. Eng. Technol.*, **42**(8), 1680-1690 (2019)
- 5) Lacassagne, T. *et al.* : *J. Fluid Mech.*, **915**, A91 (2021)
- 6) Lim, J. G. *et al.* : *J. Ind. Eng. Chem.*, **99**, 388-395 (2021)
- 7) Hosoya, M. *et al.* : *Org. Process Res. Dev.*, **28**(5), 1752-1763 (2024)
- 8) Liu, L. *et al.* : *Adv. Powder Tech.*, **31**(3), 1088-1099 (2020)

(大阪公立大学 大学院工学研究科 増田勇人)