

攪拌による剪断の強さ



岡本 幸道 化工機技術部
担当次長
工学博士

まえがき

攪拌プロセスの設計において、剪断速度や剪断応力を直接扱う機会に出会うことは比較的少ない。しかし、機会が少ない割には、攪拌による剪断の扱いに関して、曖昧さ、混乱、誤解を経験される方が多いと見受けられる。

攪拌プロセスで剪断を扱う例としては、次の操作がある。

- 1) ラテックス、微生物、担持触媒、板状結晶の攪拌
- 2) 非ニュートン流体の攪拌
- 3) 壁面の掻き取り

上記の1項では、乱流攪拌を扱う場合が多く、2項3項では層流攪拌を扱うことが多い。乱流と層流とでは、扱いが異なるため混乱や誤解が生じ易い。

次に層流攪拌及び乱流攪拌時の剪断速度について諸説を紹介する。

1. 層流時の剪断速度

非ニュートン流体の攪拌動力を推定するには、攪拌時の剪断速度を知り、その剪断速度に対応する見掛け粘度を求めて攪拌動力を計算する。Metzner¹⁾や永田²⁾は、攪拌時の平均剪断速度 $\dot{\gamma}_{ave}$ が翼回転数 n に比例するとし、その比例定数 C_M を次の様に報告した。

$$\dot{\gamma}_{ave} = C_M n \quad (1)$$

リボン	$C_M = 30$
アンカー	$C_M = 25$
パドル、タービン	$C_M = 10 \sim 13$

リボン、アンカーについては、槽径の95%の翼が用いられた。擬塑性流体であれば、見掛け粘度 μ_a は次式で与えられ、

$$\mu_a = m \dot{\gamma}^{\alpha-1} \quad (0 < \alpha \leq 1) \quad (2)$$

この見掛け粘度から攪拌動力が正しく推算されるという。永田によれば、擬塑性流体だけでなく、ビンガム流体にも同様の考え方を適用できるという。

しかしながら、この方法が必ずしも正しいと断言できないことは、次の簡単な解析によって示唆される。

無限容器中で回転する半径 R 長さ L の円筒を想定する。具体的には回転粘度計である。擬塑性流体の剪断速度と応力 τ との関係

$$\tau = m \dot{\gamma}^{\alpha} \quad (0 < \alpha \leq 1) \quad (3)$$

m, α : 物性定数

を流体の運動方程式に代入して、流速分布と円筒表面での剪断速度を求めると次式を得、

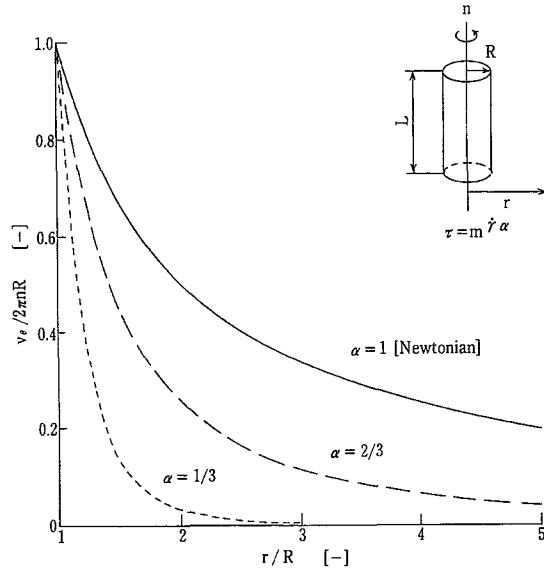
$$v_{\theta} = 2\pi n R (R/r)^{2/\alpha-1} \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_R = 4\pi n / \alpha \quad (5)$$

回転粘度計のトルク T として次式を得る。

$$T = 2\pi R^2 L m (4\pi n / \alpha)^{\alpha} \quad (6)$$

第1図に α をパラメータとする流速分布の例を示す。式(5)によれば、確かに剪断速度は回転数に比例するが、その比例定数は流体に依存しない定数ではなく、擬塑性の度合い α に依存する。このこと



第1図 擬塑性流体の流速分布
Fig. 1 Velocity distribution in pseudoplastic fluid

は、式(1)の C_M が翼のみによって決まる定数でなく、 C_M を決める実験に用いた流体の特性によってその値が異なることを意味する。

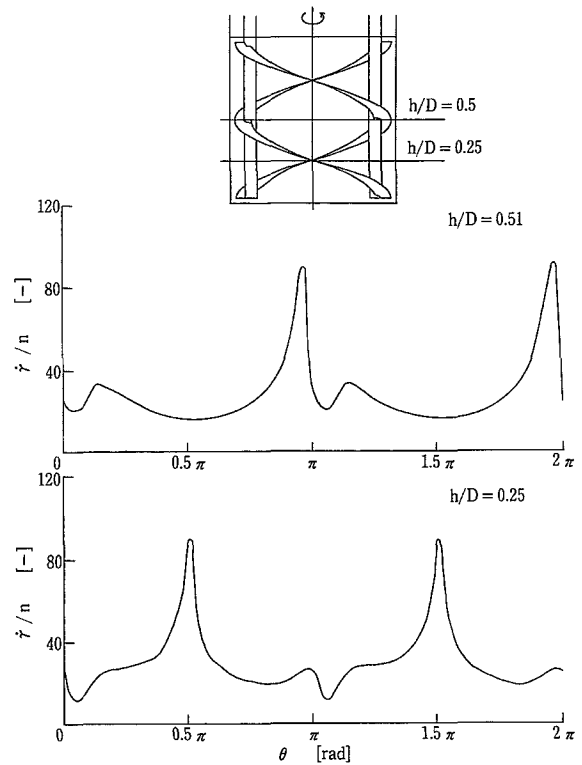
近年、流体数値解析技術の急速な発展に伴って、攪拌槽内の流速分布や剪断速度分布を比較的容易に知ることができるようになった。リボン翼を改良した当社のログボーン翼について、壁面での剪断速度の円周方向分布を求めた例³⁾を第2図に示す。流体は粘度10 Pa.sのニュートン流体である。ちなみに、この分布から C_M に相当する値を求めると約24になる。非ニュートン流体についても同様の解析を実施すれば、剪断速度分布が得られる。

第2図の剪断速度でのピーク値はリボン羽根の周速をクリアランスで割った値になる。この部分で剪断応力による掻き取り効果を期待するのであれば、スケールアップ時にクリアランスの絶対値を守る必要は無く、むしろ翼径とクリアランスの比率を守るべきである。

ところで、式(1)の平均は、攪拌槽内全体の平均を意味しない。大半のトルクが伝達される曲面上での平均値と考えるべきである。実際、第2図の平均剪断速度は、攪拌トルクが均等に容器壁面に伝わるとして求められた値とほぼ一致する。一方、槽平均の剪断速度は攪拌動力 P と液容量 V から次のように求められる。

$$\dot{\gamma}_{vol.ave} = (P/\mu V)^{1/2} \quad (7)$$

第2図の条件でこの値を求めると、壁面平均剪断



第2図 壁面での剪断速度分布
Fig. 2 Shear rate distribution on the wall³⁾

速度の約70%値になる。リボン翼では外周部で比較的剪断速度が大きく、軸側で剪断速度が小さいためである。

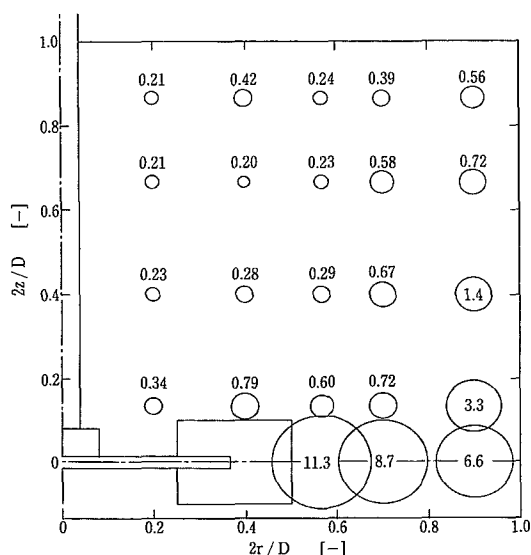
2. 乱流時の剪断速度とエネルギー消散分布

乱流に云えば、攪拌槽の乱流はその大きさが10 μ から1mまでの流体塊のランダム運動の重なりである。乱流理論では流体塊を乱流渦と呼ぶ。十分に発達した乱流であれば、大部分の運動エネルギーが微視的な乱流渦の運動によって消費され、その運動はあらゆる方向に等質で、かつ動力消散速度と流体粘度のみによって決まる普遍的な平衡状態にある。これが局所等方性理論である。この時、乱流渦の剪断速度は次式で求められる。

$$\dot{\gamma}_{turb} = (\epsilon/15\nu)^{1/2} \quad (8)$$

この式の物理的な意味は式(7)と同じである。 ϵ は流体単位質量あたりのエネルギー消散速度を、 ν は動粘度を表す。3方向の乱流速度成分が等方性の速度勾配を持つため、15という数値が分母に存在する。

攪拌レイノルズ数が10⁴を越える条件であれば、投入した攪拌動力の90%以上が乱流渦によって消費される。したがって、 ϵ の槽内平均値は次の様に



第3図 邪魔板の無い攪拌槽でのエネルギー消散速度分布

Fig. 3 Local dissipation rate, $\varepsilon(P/\rho V)^{-1}$ [-], in an unbaffled mixing vessel ($D=0.60\text{m}$, $N=80\text{rpm}$, $Re=120\,000$)⁴⁾

近似できる。

$$\varepsilon_{ave} = P/\rho V \quad (9)$$

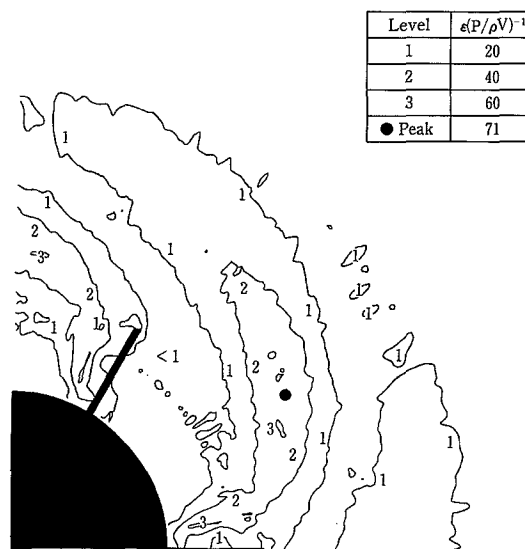
ε の槽内分布の測定報告例は比較的少ない。第3, 4図にディスクタービン翼での測定結果^{4,5)}を示す。第3図によれば、投入した動力の70%程が攪拌翼の周辺で消費され残り30%程が槽内全体に伝えられる。第3図の条件では攪拌動力は 0.027 kW/m^3 であり、剪断速度を求めると、翼周辺で約 140 s^{-1} 、翼から離れた部分で約 20 s^{-1} となる。現実の反応器ではこの数十倍の動力を与える。その時、剪断速度はこの数値の3~7倍の数値となる。

第4図は翼周辺のエネルギー消散速度分布を詳しく測定した例である。ピーク値が槽内平均値の71倍になるという。測定条件での攪拌動力 0.065 kW/m^3 から剪断速度のピーク値を求めると 550 s^{-1} になる。

ところで、上記の剪断速度が直接作用する現象は微視的な現象に限られる。その代表的な大きさはKolmogoroffスケール η によって表される。

$$\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4} \quad (10)$$

上記の例では $20\sim 100\mu$ となる。これよりも大きな規模の現象に作用する剪断力を単純に上記のエネルギー消散速度から推定することは、必ずしも正しくない。仮にそれが正しいとすれば、攪拌槽のスケールアップは単に単位容積あたりの攪拌動力を一定にすればよいとの結論に至る。しかし、現実異なる。



第4図 タービン翼周囲でのエネルギー消散速度分布

Fig. 4 Energy dissipation rate contour around a Rushton turbine, $d=0.101\text{ m}$, $D=0.305\text{ m}$, 180 rpm ⁵⁾

液滴分散、ラテックス、担持触媒、晶析等の攪拌で動力基準のスケールアップを実施すれば、剪断力が増加するとしか解釈しようのない結果を得る。スケール η より大きな規模の現象では、装置の大小が間接的に影響するような乱流渦の運動を考慮する必要があるという気がする。この点について、学会の評価はまだ定まっていない。

むすび

本稿では層流攪拌及び乱流攪拌での剪断速度の考え方について簡単に諸説を紹介した。

当社は、近年、低剪断での攪拌に有利な攪拌翼フルゾーンや、リボン翼の混合を飛躍的に高めたログボーン翼の販売を通じて、各種攪拌プロセスの改善に努めている。これらの翼について、その流動特性や混合特性を把握し既に公開してきたが、剪断特性についてはまだ十分に把握し切れていない点がある。目下、電算機シミュレーションを用いてフルゾーンの剪断速度分布を解析中である。機会を見て紹介したいと考えている。

[参考文献]

- 1) Metzner, A.B., et.al. : A.I. Ch.E.J., Vol.7, (1961), p.3
- 2) Nagata, S.: Mixing, (1975), Kodansha, p.76
- 3) 高田一貴 : 社内資料, (1993)
- 4) 岡本幸道ほか : 化学工学論文集, Vol. 5, No.4, (1979), p.410
- 5) Stoots, C.M. and R.V.Calabrese : OHP Handout at an invited lecture in BHRA in U.K., (1988)