

## 潤滑油における攪拌混合の役割と機能：乱流攪拌操作による混合状態の制御

Role and Function of Mixing in Lubricants: Control of Mixing State Using Turbulent Flow

出光興産（正）\*平野 幸喜, 千葉工大（非）仁志 和彦

Koki Hirano<sup>\*1</sup>, Kazuhiko Nishi<sup>2</sup>

1. Idemitsu Kosan Co., Ltd., 2. Chiba Institute of Technology

### 1.はじめに

潤滑油は基本的に液体であり基油と種々の添加剤との混合系なので、液体混合という語句は容易に想起されよう。そして、その操作には一般的に回転翼式の攪拌装置が用いられる<sup>1)</sup>。本学会誌トライボロジストを検索したところ、「攪拌」で116件、「攪拌」で26件の合計142件がヒットした(2025年1月7日現在)。だが、タイトルから判断する限り潤滑油の液体混合操作に関するものは無かった(多数は攪拌抵抗関連)。トライボロジー研究において攪拌混合に関わる研究や技術は、学会レベルの前面には出ていないようだ。一方、攪拌工学からみると、潤滑油は魅力的な研究対象であり、潤滑油業界はラボから製造に至るスケールの攪拌装置のユーザーでもある。そこで、潤滑油における攪拌混合の役割と機能について、あらためて検討してみた。なお、攪拌混合の目的はFig.1に示すように、せん断作用を必要とする分散(dispersion)と循環作用を必要とする分配(distribution)の二つだが、攪拌中の流れにおける物質収支やエネルギー収支の点から両者は相反する。したがって、両者のバランスに考慮して攪拌装置や操作条件を決める必要がある。また、分子レベルの分散を溶解と解釈しておく。

本研究では、混合状態の指標として基油中に分散した消泡剤の液滴径に着目し、乱流攪拌操作との対応を調べた。

### 2. 実験

**2.1 試料：**基油とシリコン系消泡剤(分子量などデザインの異なる4タイプ)の二成分からなる単純な系とした。

**2.2 評価・測定：**実験用に設計した傾斜パドル翼<sup>2)</sup>を用いて、偏心攪拌によりサンプルを得た。また、動的光散乱(Dynamic Light Scattering, DLS)方式の粒度測定装置を用いて、消泡剤液滴径を測定した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 乱流攪拌における攪拌レイノルズ数と動力数

乱流攪拌の目安となる攪拌レイノルズ数  $Re$  は、攪拌翼の回転径  $d$ ・回転速度  $n$ ・液体の動粘度  $\nu$  を用いて

$$Re = \frac{nd \cdot d}{\nu} = \frac{nd^2}{\nu}$$

で表される。代表速さを攪拌翼先端速度( $\propto nd$ )、代表長さを攪拌翼回転径  $d$  としている。 $Re > 1,000$  が乱流攪拌とされる。

一方、攪拌で生じた流れを維持するために投入するエネルギー(液体の単位体積あたり)が攪拌所要動力  $P_V$  であり、液密度  $\rho$ ・液体積  $V$  を用いて

$$P_V = N_p \frac{\rho n^3 d^5}{V}$$

で表される。比例定数  $N_p$  は動力数(power number)と呼ばれ、 $Re$  に対して指数的に変化する。さらに攪拌翼・攪拌槽ほか種々の条件に依存する。本研究では、アカデミアから提案された相関式<sup>3)</sup>を用いて計算した。例をFig.2に示す。

#### 3.2 攪拌所要動力と液滴径との関係(乱流攪拌理論)

乱流場で発生する応力と変形に対する液滴の抵抗(ラプラス圧  $\Delta = 4\sigma/d_p$ ;  $\sigma$  は界面張力、ここで  $d_p$  は任意のひとつの液滴径)の力のバランス式に液滴分裂の臨界値を考慮すると、攪拌操作条件に対して残存する液滴の最大液滴径  $d_{p-max}$  が決まり、次のような関係が成り立つ<sup>4,5)</sup>。

$$\frac{d_{p-max}}{d} \propto \left( \frac{\rho n^2 d^3}{\sigma} \right)^{\frac{3}{5}}$$

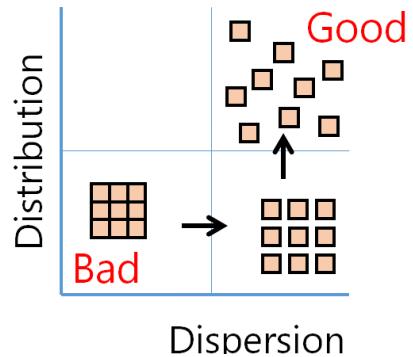


Fig.1 Image for dispersion and distribution in mixing

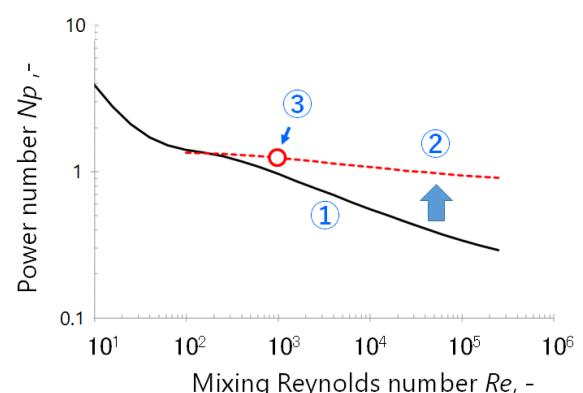


Fig. 2 Application example for the power number diagram in mixing operation

- ① without baffle plate and eccentricity
- ② Increasing  $N_p$  with baffle plate or eccentricity
- ③ An adopted condition of mixing operation

これに、液体積と攪拌翼寸法の幾何学的相似 $V \propto d^3$ として得られる  $P_V \propto n^3 d^2$  の関係を用いて整理すると、

$$d_{p-max} \propto P_V^{-\frac{2}{5}}$$

また、経験的に平均液滴径 $d_p$ と、 $d_{p-max} \approx 1.6d_p$  の関係があることが多くの液滴分散系で知られている<sup>5)</sup>。

これらの関係から、分散液滴径は攪拌所要動力 $P_V$ のマイナス 2/5 乗（マイナス 0.4 乗）と相関することになる。

### 3.3 実験的検証

任意の乱流攪拌操作で安定的に分散させた消泡剤の液滴径を測定した一例を Fig.3 に示す（相対表示）。攪拌時間に対して液滴径が減少し、かつ安定化したところのデータである。対数表示に対してほぼ正規分布となっているのは、分散の過程や結果に物理法則の関与を示唆している。液滴径は図中の矢印で示した通りで、平均液滴径 $d_p$ はほぼピーク位置とみてよく、最大液滴径 $d_{p-max}$ は大粒径側の裾の位置となる。

消泡剤 4 種類(A-D)について、濃度や攪拌所条件を変え、攪拌時間に対して液滴径が安定したときの平均液滴径 $d_p$ と最大液滴径 $d_{p-max}$ の関係を Fig.4 に示す（径は相対表示）。図中に傾き 1.6 の補助線（点線）を書き入れているが、いずれの試料においても多くの分散液滴同様に  $d_{p-max} \approx 1.6d_p$  の関係があることがわかった。

ところで潤滑油に限ったことではないだろうが、分散液滴径を扱う場合、通常は平均液滴径 $d_p$ を用いて議論する。そこで乱流攪拌理論と経験則の関係を合わせると、

$$d_p \propto d_{p-max} \propto P_V^{-\frac{2}{5}}$$

となり、こちらの表現の方が感覚的に受け入れやすいだろう。

この関係が成り立つかを確認するため、消泡剤を固定し、攪拌槽容器と攪拌翼のサイズの組合せ 2 水準（2L 容器×翼径 75 mm, 5L 容器×翼径 100mm）について、回転速度 3 水準として攪拌実験した際の攪拌所要動力 $P_V$ と平均液滴径 $d_p$ との関係を示したのが Fig.5 である。

図中に傾きマイナス 2/5 の補助線（点線）を書き入れているが、2 系列ともこの傾きに沿った挙動をしており、液滴径が攪拌所要動力にきちんと運動していた。つまり、攪拌操作によって混合状態が制御できていることが確認された。

### 4. おわりに

消泡剤の分散液滴径を例に、きちんとした思想と手順に則った乱流攪拌操作によって混合状態が制御される（きちんと混ぜればきちんと混ざる）ことを示した。あまりに基本的だが、潤滑油の研究と製造の双方に関わる重要な事項でもある。攪拌工学の視点からの取り組みで解決できる課題も多いのではないか。

なお、液滴に限れば、経時変化による液滴の合一による肥大化を経て沈でんが生じる場合がある。安定化を含めた検討もまた必要で、処方設計と攪拌工学のいっそうの連携が望まれる。

本稿では液滴径や攪拌所要動力を相対表示としたが、論旨を損なうものではないことをご理解いただきたい。

### 文献

- 1) 平野・阿部：潤滑油における攪拌混合の役割と機能、出光トライボレビュー、42, 57 (2023)
- 2) 金山・仁志：CFD を用いた 2 枚傾斜パドル翼偏心攪拌の流動、動力特性の検討、化学工学会 第 86 年会 講演発表要旨集、PE320 (2021 年 3 月)
- 3) 平岡・亀井・加藤・多田・全・山口：傾斜パドル翼の攪拌所要動力の相関、化学工学論文集、23 (6), 969 (1997)
- 4) R. Shinnar, J. M. Church: Statistical theories of turbulence in predicting particle size in agitated dispersions, Ind. Eng. Chem., 52, 253 (1960)
- 5) 栗山・小野・原田・今野：乱流攪拌槽における最大安定液滴径、化学工学論文集、21, 508 (1995)

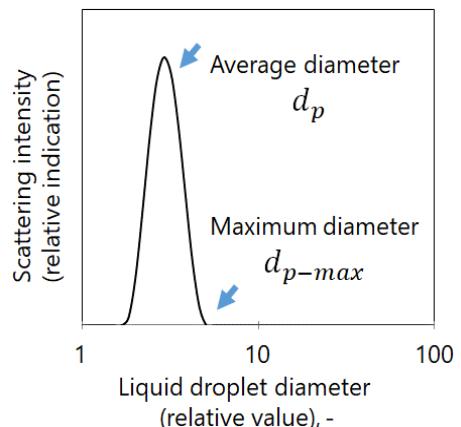


Fig. 3 Measurement of diameter of the

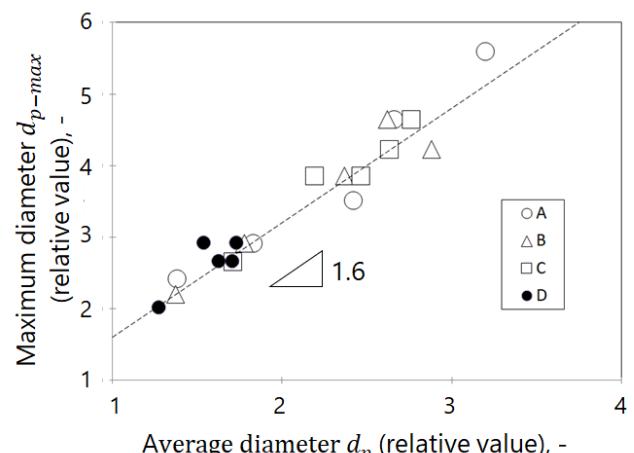


Fig. 4 Relationship between the average and maximum diameters of the droplet of anti-foaming agents obtained under controlled turbulent flow mixing

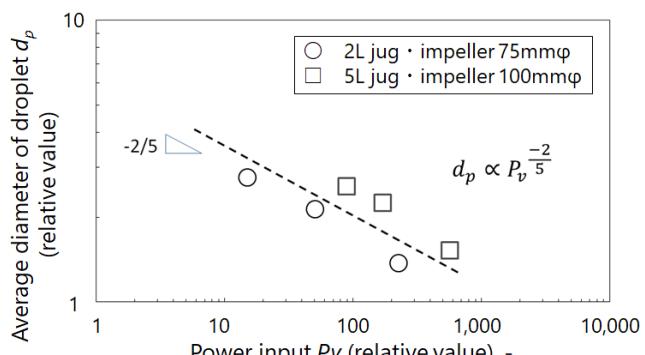


Fig. 5 Relationship between the power input in turbulent mixing and diameter of dispersed liquid droplets of an anti-foaming agent