

攪拌槽工学V

[スケールアップ編]

9. スケールアップ

9. 1 基本的な考え方

小型の円筒攪拌槽で最適な成果が得られたとする。たとえば、混合完了までの所要時間を短縮できた、析出した固体粒子の寸法を揃えることができたなど。これを大型の攪拌槽にスケールアップする際、小型槽で得られる現象や成果を大型槽でも実現したいと思うであろう。そうすると、大型槽は小型槽と相似の装置形状を選定するであろうし、小型槽での操作条件を参考に適切な攪拌条件を採用するであろう。しかし、「相似の装置形状」や「適切な攪拌条件」だけでは、具体的にいくりにすればよいのかの数字の部分分からない。そこで、この数字の部分を工学の視点で考えてみる。

はじめに、大型槽の装置形状について考える。たとえば、小型槽を10倍にスケールアップするとして、小型槽のどの部分の寸法を10倍するかは複数考えられる。ここでは、槽径 D をスケールアップの基準に取り、それを10倍する。すなわち、大型槽の槽径は $10D$ と決まる。 D の値は、小型槽の槽径を測れば求まる。次に、大型槽の液深(えきしん)はいくりにすればよいだろうか。小型槽の液深 H の10倍となるであろうことは、想像がつく。答えは $10H$ でよいが、なぜそうなるのかの工学的根拠を与える必要がある。ところでいま、小型槽と相似の装置形状を大型槽で実現することを考えているが、具体的にどのようなことをすれば、それを実現したことになるだろうか。それは、**装置の寸法比を一定に保ってスケールアップすること**である。なぜ寸法比を一定に保つと相似の形状が保たれるのか。その直感的なイメージについて、たとえばテレビ画面の大きさは、何インチ〜とか何型〜で定義されるが、画面の縦と横の寸法比は、インチ数に関わらずほぼすべて同じになっている。それでいて、画面の形状は、インチ数が変わってもみな同じ長方形を保っている。正方形に近づくことはない。話を攪拌槽に戻す。どことどこの寸法の比を取るかは複数考えられるが、ここでは、すでに分かっている槽径 D と現在検討中の液深 H の寸法比 H/D をスケールアップの基準に取る。なぜ D が分母なのかは、 D がおおもとのスケールアップ基準($D \rightarrow 10D$)になっているからと考えてよい。このことから、小型槽の寸法比 H/D 一定の条件下で大型槽の槽径を $10D$ にとると、大型槽の液深は $10H$ と決まる。工学的根拠は、「小型槽の相似形状を大型槽で実現するには、装置の寸法比を一定に取る必要があるから」である。

次に、大型槽の攪拌条件について考える。翼径は、上と同じ考え方で決める。すなわち、寸法比 d/D をスケールアップの基準にとると、大型槽の翼径は $10d$ に決まる。攪拌速度については、また別の考え方になる。10倍にスケールアップすると、攪拌速度も10倍必要と思うかもしれないが、逆である。スケールアップすると、翼径が大きくなるので、ひとかきするだけでかなりの量の液が動く。したがって、**大型槽の攪拌速度は、小型槽よりも小さくて済む**。なお、攪拌速度をあえて一定にしてスケールアップする場合もある。攪拌速度 n [1/s]と翼径 d [m]を乗じた nd は、速度の単位[m/s]であり、攪拌翼の先端速度を表している(正確には、 πnd)。これをスケールアップの基準に取る。すなわち、翼先端速度 nd 一定の条件下で大型槽の槽径を $10D$ にとると、大型槽の攪拌速度は $(1/10)n$ と決まる。工学的根拠は、「小型槽の

攪拌条件を大型槽で実現するには、翼先端速度を一定に取る必要があるから」となる。翼先端速度のほか、液体積あたりの攪拌所要動力も基準となる。

最後に、大型槽の装置容積あたり伝熱面積[m²/m³]について考える。工業反応装置における伝熱の重要性は、加熱よりも除熱にある。たとえば、重合反応の場合、反応が進むにつれ粘度が増大し、熱が槽内でこもりやすくなるので、除熱速度 Q を大きく取る必要がある。そうするには、総括伝熱速度の式 $Q=UA\Delta T$ から分かるように、伝熱面積 A をなるべく大きく取ることが肝要となる。いまスケールアップするのだから、伝熱面積も必然的に大きくなり、とくに差支えがないように思われるかもしれない。たしかに 伝熱面積自体は大きくなるが、装置容積あたりでは減少する。たとえば、槽径 D の小型槽の伝熱面積は、 D^2 に比例する。一方、10 倍にスケールアップした大型槽の伝熱面積は、 $(10D)^2=100D^2$ に比例する。 $10D^2$ ではない。装置容積も同様にして、小型槽では D^3 に、大型槽では $(10D)^3=1000D^3$ にそれぞれ比例する。あくまで「比例する」とした理由は、様々な装置形状が考えられるからである。たとえ容器自体が単純な円筒形であっても、邪魔板やコイルなど付属品が挿入されると、正確には円筒形でなくなる。以上を踏まえ、単位装置容積あたりの伝熱面積は、小型槽では $D^2/D^3=1/D$ に、大型槽では $100D^2/1000D^3=(1/10)(1/D)$ に比例する。いま、装置由来の形状係数、すなわち比例定数の部分と同じであるとして、大型槽の装置容積あたり伝熱面積は、小型槽の 10 分の 1 に減少する。以上のことから、反応や晶析など、伝熱操作が重要となる工程では、いかに伝熱面積を稼ぐかが課題となる。

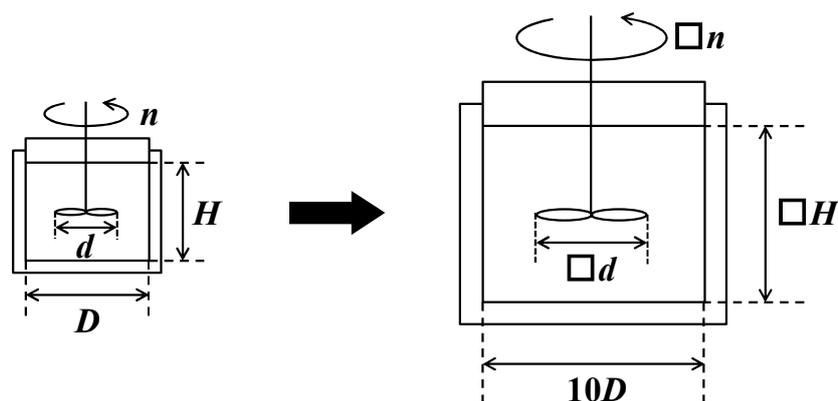


図 9.1.1 攪拌槽のスケールアップ

表 9.1.1 攪拌槽のスケールアップ

装置または操作条件	単位	小型槽	大型槽	根拠
槽径	[m]	D	$10D$	定義(10 倍にスケールアップ)
液深	[m]	H	$10H$	液深-槽径比 H/D 一定
攪拌翼径	[m]	d	$10d$	翼径-槽径比 d/D 一定
攪拌速度	[1/s]	n	$(1/10)n$	翼先端速度 nd 一定
伝熱面積	[m ²]	$\propto D^2$	$\propto 100D^2$	槽径の 2 乗
装置容積	[m ³]	$\propto D^3$	$\propto 1000D^3$	槽径の 3 乗
装置容積あたり伝熱面積	[m ² /m ³]	$\propto 1/D$	$\propto (1/10)(1/D)$	(伝熱面積)/(装置容積)

9. 2 スケールアップの基準

装置寸法比一定の基準①を満たすことが原則となる。その上で、他のスケールアップ基準②～⑦から一つを採用する。下記以外にも基準は存在する。条件次第では、複数の基準を採用できることもある。以下、添え字 1 を小型槽、2 を大型槽とする。

①装置寸法比一定(幾何学的相似) 装置形状を相似にする考え方である。最優先で採用する。

$$d_2/d_1=b_2/b_1=D_2/D_1=H_2/H_1=\dots=\alpha \quad \dots(9.2.1)$$

ただし、 α はスケールアップの倍数(スケールアップファクター)であり、何倍にスケールアップしたいかで任意に設定することができる。

②レイノルズ数一定(力学的相似) 流動状態を相似にする考え方であるが、スケールアップすると液体積あたりの攪拌所要動力 P/V が大幅に低下するため、液に十分なエネルギーを与えることが難しくなる。スケールアップの基準としては、あまり用いられない。

$$Re_1 = Re_2 \quad \dots(9.2.2) \quad [1=小型槽、2=大型槽]$$

$$\frac{\rho_1 n_1 d_1^2}{\mu_1} = \frac{\rho_2 n_2 d_2^2}{\mu_2} \quad \dots(9.2.3)$$

$$n_1 d_1^2 = n_2 d_2^2 \quad [\rho_1=\rho_2, \mu_1=\mu_2] \quad \dots(9.2.4)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2} \quad \dots(9.2.5)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(6-5)} = \frac{d_1}{d_2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \dots(9.2.6)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \frac{d_1}{d_2}} \quad \dots(9.2.7)$$

③フルード数一定(力学的相似) 渦流の寸法や形状を相似にする考え方である。邪魔板を用いない場合に相当するが、実際的ではないため、スケールアップの基準としては、あまり用いられない。

$$Fr_1 = Fr_2 \quad \dots(9.2.8)$$

$$\frac{n_1^2 d_1}{g} = \frac{n_2^2 d_2}{g} \quad \dots(9.2.9)$$

$$n_1^2 d_1 = n_2^2 d_2 \quad \dots(9.2.10)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1/2}} \quad \dots(9.2.11)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1/2}\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\{(3/2)-5\}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-7/2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \dots(9.2.12)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-7/2}} \quad \cdots(9.2.13)$$

液の種類(ρ と μ)が変更されない限り、 Re と Fr の両方を基準に用いることはできない。

④液体積あたり攪拌所要動力一定(運動学的相似) スケールアップの一般的な基準としてよく用いられる。ただし、攪拌がもたらす吐出作用(循環させる)とせん断作用(分散させる)の比率に差が生じることが問題である。

$$\left(\frac{P}{V}\right)_1 = \left(\frac{P}{V}\right)_2 \quad \cdots(9.2.14)$$

$$\frac{P_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1} = \frac{P_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2} \quad \cdots(9.2.15)$$

動力比を取り、装置寸法比一定の条件($D_2/D_1=d_2/d_1$ および $H_2/H_1=d_2/d_1$)を用いる。

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right) = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3} \quad \cdots(9.2.16)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3}} \quad \cdots(9.2.17)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\rho_1^{1/3} d_1^{5/3} P_2^{1/3}}{\rho_2^{1/3} d_2^{5/3} P_1^{1/3}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{5/3} \left[\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3\right]^{1/3} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{5/3} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\{(5/3)-1\}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2/3} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(9.2.18)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2/3}} \quad \cdots(9.2.19)$$

⑤翼先端速度一定(運動学的相似) 液体積あたり攪拌所要動力 P/V 一定に次いでよく用いられる。とくに、気泡・液滴・微粒子の分散等、高いせん断力を要する場合に用いられる。

$$u_1 = u_2 \quad \cdots(9.2.20)$$

$$\pi n_1 d_1 = \pi n_2 d_2 \quad \cdots(9.2.21)$$

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 \quad \cdots(9.2.22)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2}} \quad \cdots(9.2.23)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^1\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(3-5)} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(9.2.24)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-2}} \quad \cdots(9.2.25)$$

⑥攪拌速度一定(運動学的相似) 混合時間をほぼ一定にすることができるが、スケールアップに伴い液体積あたりの攪拌所要動力 P/V が大幅に増大するため、かなり激しい攪拌が必要となる。経済面の問題

から、あまり用いられない。

$$n_1 = n_2 \quad \dots(9.2.26)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^0} \quad \dots(9.2.27)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^0\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(0-5)} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} \quad [\rho_1 = \rho_2] \quad \dots(9.2.28)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5}} \quad \dots(9.2.29)$$

⑦液体積あたり伝熱量一定(運動学的相似) ジャケット内の伝熱媒体側から攪拌液側へ与えられる液体積あたりの伝熱量 Q/V をスケールアップの基準にする。スケールアップすると、液体積あたりの攪拌所要動力 P/V が大幅に増大するため、現実的ではない。

$$\left(\frac{Q}{V}\right)_1 = \left(\frac{Q}{V}\right)_2 \quad \dots(9.2.30)$$

対流伝熱式 $Q=hA\Delta T$ を用いると、次式となる。

$$\frac{h_1 A_1 \Delta T_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1} = \frac{h_2 A_2 \Delta T_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2} \quad \dots(9.2.31)$$

ただし、 h は境膜伝熱係数[W/(m \cdot K)]、 A は伝熱面積[m 2]、 ΔT は温度差[K]。

境膜伝熱係数 h は、次の無次元式で表される。

$$\frac{hD}{k} = K \left(\frac{\rho n d^2}{\mu}\right)^\alpha \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^\beta \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^\gamma \quad \dots(9.2.32)$$

ただし、 C_p は比熱容量[J/(kg \cdot K)]、 k は流体の熱伝導度[W/(m \cdot K)]、 μ_w は槽壁温度における粘度[Pa \cdot s]。

上式をさらにその上の式の h_1 と h_2 に代入する。

$$\begin{aligned} & \frac{[K(k_1/D_1)(\rho_1 n_1 d_1^2/\mu_1)^\alpha (C_{p1} \mu_1/k_1)^\beta (\mu/\mu_w)^\gamma](\pi D_1 H_1) \Delta T_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1} \\ & = \frac{[K(k_2/D_2)(\rho_2 n_2 d_2^2/\mu_2)^\alpha (C_{p2} \mu_2/k_2)^\beta (\mu/\mu_w)^\gamma](\pi D_2 H_2) \Delta T_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2} \end{aligned} \quad \dots(9.2.33)$$

スケールアップ前後で同じ流体を用いる場合は、流体の物性値(C_p, k, ρ, μ)が等しくなることから、上式は次式のようになる。

$$\frac{[(1/D_1)(n_1 d_1^2)^\alpha] \Delta T_1}{D_1} = \frac{[(1/D_2)(n_2 d_2^2)^\alpha] \Delta T_2}{D_2} \quad \dots(9.2.34)$$

スケールアップ前後で同じ温度差 ΔT とする場合は、次式のようになる。

$$\frac{(n_1 d_1^2)^\alpha}{D_1^2} = \frac{(n_2 d_2^2)^\alpha}{D_2^2} \quad \dots(9.2.35)$$

装置寸法比一定の条件($D_2/D_1=d_2/d_1$)を用いる。

$$\frac{(n_1 d_1^2)^\alpha}{d_1^2} = \frac{(n_2 d_2^2)^\alpha}{d_2^2} \quad \cdots(9.2.36)$$

$$n_1^\alpha d_1^{2\alpha-2} = n_2^\alpha d_2^{2\alpha-2} \quad \cdots(9.2.37)$$

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^\alpha = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2\alpha-2} \quad \cdots(9.2.38)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2-(2/\alpha)} \quad \cdots(9.2.39)$$

α の代表値として 2/3 を採用する。

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1}} \quad [\alpha=2/3] \quad \cdots(9.2.40)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1}\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^5 = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-8} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(9.2.41)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-8}} \quad \cdots(9.2.42)$$

9. 3 スケールアップ基準式の使い方

はじめに、スケールアップの倍数 α を決める。たとえば、小型槽の槽径 D_1 を 8 倍にスケールアップして ($\alpha=8$)、大型槽の槽径を D_2 にすることを考える。 D_1 と α は既知なので、装置寸法比一定の条件式 ($d_2/d_1=b_2/b_1=D_2/D_1=H_2/H_1=\dots=\alpha$) より、ただちに $D_2(=8D_1)$ が決まる。槽径 D のかわりに、翼径 d や翼幅 b を倍数の基準に取ってもよい。次に、どの基準を一定に保つのかを決める。たとえば、液体積あたり攪拌所要動力一定の条件を採用するものとする。スケールアップ前後で用いる流体の種類は同じであるとして、攪拌速度の比 (n_2/n_1) と翼径比 (d_1/d_2) の間には、 $(n_2/n_1)=(d_1/d_2)^{2/3}$ の関係式が成り立つ。このうち、 n_1 と d_1 については、自分の小型槽に関する情報なので、既知である。たとえば、 $n_1=300$ rpm、 $d_1=5$ cm であったとしよう。もう一つ、大型槽の n_2 または d_2 のいずれかが既知でなければならないが、いま $D_2=8D_1$ の関係式があるので、装置寸法比一定の条件より $d_2=8d_1$ となって、 d_2 は消去できる。 $(n_2/n_1)=(d_1/d_2)^{2/3}$ の関係式は、 $(n_2/n_1)=(1/8)^{2/3} \rightarrow (n_2/n_1)=(2^{-3})^{2/3} \rightarrow (n_2/n_1)=1/4 \rightarrow n_2=(1/4)n_1=(1/4)(300)=75$ rpm となり、スケールアップ後の攪拌速度 n_2 は、もとの 1/4 倍の 75 rpm に設定すればよいことが分かる。とくに回分式装置の場合、ある製品の生産終了後、別製品の生産で同じ装置を使い回すことがよくある。この場合、翼径や翼の種類は、余程の事情が無い限り変更できない。変更できるのは、原則として攪拌速度のみである。したがって、スケールアップ時に n_2 を如何ほどに設定すればよいのかが、往々にして知りたい情報となる。動力比 (P_2/P_1) も同様の考え方で用いる。たとえば今、既存の攪拌装置で、所要動力をもとの 8 倍にしたいとする。翼径は変更できないから、攪拌速度をいくらに変更すればよいか、ということになる。この場合は、動力数 $N_p(=P/\rho n^3 d^5)$ 一定の下で検討すればよい。すなわち、 $P_1/\rho n_1^3 d_1^5=P_2/\rho n_2^3 d_2^5$ におい

て、 $P_2=8P_1$ かつ $d_2=d_1$ とおけば、 $n_2=8^{1/3}n_1$ となる。変更前の攪拌速度 $n_1=100$ rpmであれば、 $n_2=(2^3)^{1/3}(100)=200$ rpmに変更すればよい。

9. 4 スケールアップの条件とスケール比の影響

各スケールアップ基準における、攪拌速度 n あるいは攪拌動力 P と攪拌翼径 d の間には、それぞれ次のスケールアップ条件式が成り立つ。

$$\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^\beta \quad [nd^\beta = const] \quad \dots(9.4.1)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^\gamma \quad [Pd^\gamma = const] \quad \dots(9.4.2)$$

ただし、スケールアップの前後で装置寸法比一定の条件を満たしていること、流体の種類は同じであるものとする。

液体積当たりの動力比 $(P/V)_2/(P/V)_1$ に対するスケール比 V_2/V_1 の影響は、次式のように導かれる。

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^\gamma \quad \dots(9.4.3)$$

$$\frac{P_2/V_2}{P_1/V_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^\gamma \frac{V_1}{V_2} \quad \dots(9.4.4)$$

$$\frac{(P/V)_2}{(P/V)_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma/3} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1} \quad \dots(9.4.5)$$

$$\boxed{\frac{(P/V)_2}{(P/V)_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1-(\gamma/3)}} \quad \dots(9.4.6)$$

表 9. 4. 1 スケールアップ条件式の定数項

基準	Q/V	n	Fr	P/V	u	Re
β	-1	0	1/2	2/3	1	2
γ	-8	-5	-7/2	-3	-2	1

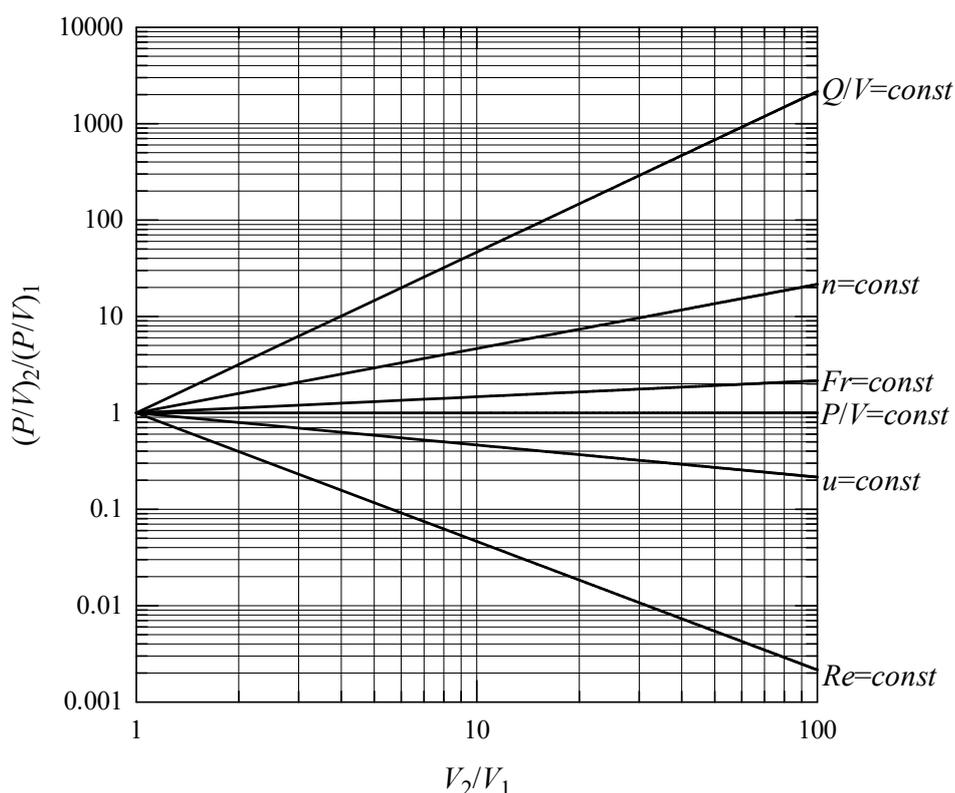


図 9.4.1 スケール比の影響

上の関係式を図に整理する。スケール比 V_2/V_1 に対する動力比 $(P/V)_2/(P/V)_1$ の変動が小さいのは、液体積あたり動力 P/V や翼先端速度 u であり、これらがスケールアップ基準の候補になりやすい。フルード数 Fr も比較の変動が小さいが、邪魔板無しの条件における旋回渦流の相似条件であることから、実際的でないためあまり用いられない。 P/V を除くいずれの基準においても、スケール比 V_2/V_1 の増大に伴い、 $(P/V)_2/(P/V)_1=1$ からのずれが大きくなる。このことは、スケールアップの倍数が大きくなるほどスケールアップの難度が高くなることを意味している。反対に、数倍程度以内のスケールアップであれば、いずれの基準も 1 からのずれが小さく、比較的实现しやすいと言える。

参考文献

1. 大野光之; 円筒容器内の液容量と接液面積, 化学装置 **32**(10), 55-67(1990)
2. J.R. Couper, W.R. Penny, J.R. Fair; Chemical Process Equipment: Selection and Design 3rd Ed., Butterworth-Heinemann(2012), Chapter 10 Mixing and Agitation
3. 大野光之; 初歩から学ぶ化学装置設計, 工業調査会(2009), 9章 攪拌装置
4. 大原良友; トコトンやさしい圧力容器の本, 日刊工業新聞社(2015), 4章 圧力容器の設計
5. 紙屋 保; 化学装置構造設計法, 工学図書(1965), 3章 圧力容器
6. 小林 英男; 圧力容器の構造と設計, 日本規格協会(2011), 10.1章 圧力容器の胴及び鏡板
7. 日本規格協会; JIS ハンドブック 17 圧力容器・ボイラ, 日本規格協会(2016), B8265
8. G. Towler, R. Sinnott; Chemical Engineering Design 2nd Ed., Butterworth-Heinemann (2012), Chapter 14 Design of pressure vessels
9. E.F. Megyesy, P. Buthod; Pressure Vessel Handbook 14th Ed., PV Publishing(2008), PART1 1. Vessels under internal pressure

10. 有光 隆; これならわかる図解でやさしい入門材料力学(第2版), 技術評論社(2020)
11. 山本一夫, 西野宏; 攪拌技術, 佐竹化学機械工業(1992), 7章 攪拌機の構造設計
12. 化学工業社編; 化学装置の構造設計 別冊化学工業 17-6, 化学工業社(1973), pp.109-127
13. 大山義年; 化学工学II, 岩波(1963), pp.186-190
14. 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂四版, 丸善(1978), 18章攪拌および混合
15. W.L.McCabe, J.C. Smith, P. Harriott; Unit Operations of Chemical Engineering 7th Ed.McGraw-Hill(2004), Chapter 9 Agitation and Mixing of Liquids (Table 9.2)
16. 永田進治, 山本一夫, 横山藤平, 志賀周次郎; 化学工学, **21**, 708-715(1957)
17. S. Nagata; Mixing, John Wiley & Sons Inc. (1975), Chapter 1 Power consumption of mixing impellers
18. 山本一夫; 攪拌装置(化学装置設計・操作シリーズ), 化学工業社(1984), 3章攪拌所要動力と攪拌槽の伝熱
19. 亀井 登, 平岡節郎, 加藤禎人, 多田 豊, 仕田裕貴, 李 泳世, 山口隆生, 高 承台; 化学工学論文集, **21**, 41-48(1995)
20. 化学工学会監修; 最新ミキシング技術の基礎と応用(化学工学の進歩 42), 三恵社(2008), 1.基礎編
21. 化学工学会編; 化学工学便覧 改訂七版, 丸善(2011), I-6 攪拌・混合
22. 加藤禎人; 攪拌槽の操作・設計のための計算法と実験法 改訂増補版, 情報機構(2015), 5章動力特性
23. Y. Kato, Y. Tada, Y. Takeda, Y. Hirai and Y. Nagatsu; *J. Chem. Eng. Japan*, **46**, 6-9 (2009)
24. J.F.Richardson, J.M. Coulson, J.R. Backhurst, J.H. Harker; Coulson & Richardson's Chemical Engineering Vol.2, 5th Ed., Butter-worth Heinemann(2002), Chapter 7 Liquid mixing (Table 7.2)
25. 山本一夫, 西野宏; 攪拌技術, 佐竹化学機械工業(1992), 6章攪拌機の選定手法
26. 寺尾昭二; 攪拌技術の基礎と実際(月刊・化学装置 2008年4月号), 工業調査会(2008), pp.17-59
27. D.Q. Kern; Process heat transfer, McGraw-Hill(1950), Chapter 18 Batch and unsteady-state processes
28. 尾花英朗; 熱交換器設計ハンドブック, 工学図書(1974), 6章 非定常プロセス
29. J.F.Richardson, J.M. Coulson, J.R. Backhurst, J.H. Harker; Coulson & Richardson's Chemical Engineering Vol.2, 5th Ed., Butter-worth Heinemann(2002), Chapter 9.8 Heat transfer in reaction vessels
30. W.R. Penney (G.F. Hewitt Eds.); Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Publishing(1983), Chapter 3.14 Agitated vessels
31. N.P. Chopey; Handbook of Chemical Engineering Calculations 3rd Ed., McGraw-Hill Inc.(2003), Section 7.16 Heat transfer in agitated vessels
32. A.K. Coker; Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Volume 3 (4th Ed.), Gulf Professional Publishing (2015), Chapter 15 (Table 15-98)
33. S. Nagata; Mixing, John Wiley & Sons Inc. (1975), Chapter 2 Heat transfer in agitated vessels
34. 藤田重文, 田原浩一, 吉田五一編; 化学装置・機械ハンドブック, 朝倉書店(1967), 9章 攪拌装置
35. 化学工学会編; 実用化学装置設計ガイド, 工業調査会(1991), 11.攪拌装置
36. D. Jeschke; *Z. Ver. Deut. Ing.* **69** (1925) 1526
37. 尾花英朗; 熱交換器設計ハンドブック, 工学図書(1974), 24章 タク・ジャケット式熱交換器の設計法
38. E.N. Sieder and G.E. Tate; *Ind. Eng. Chem.*, **28**, 1429-1436(1936)
39. H. Hausen; Verfahrenstechnik, Beih. *Z. Ver. Deut. Ing.* 4 (1943) p.91
40. G. Towler, R. Sinnott; Chemical Engineering Design 2nd Ed., Butterworth-Heinemann (2012), Chapter 19 Heat-transfer equipment
41. 尾花英朗; 熱交換器設計ハンドブック, 工学図書(1974), 8章 凝縮伝熱
42. D.R. Moss, M.M. Basic; Pressure Vessel Design Manual 4th Ed., Butterworth-Heinemann (2013), Procedure 5-6 Design pipe coils for heat transfer
43. K. Van't Riet; *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **18**, 357-364(1979)
44. 海野 肇, 中西一弘, 白神直弘, 丹治保典; 新版 生物化学工学, 講談社サイエンティフィック(2004), 5.5章 通気操作
45. P.H. Calderbank; *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **36**, 443-463(1958)
46. A.W. Nienow, D.J. Wisdom and J.C. Middleton; *Proc. 2nd Eur. Conf. Mixing*, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, pp.F1-1 to 16 and X54 (1978)
47. A.W. Nienow, M.C.G. Warmoeskerken, J.M. Smith and M. Konno; *Proc. 5th Eur. Mixing Conf.*, BHRA, Cranfield, pp.143-154 (1989)
48. M.E. Sensel, K.J. Myers and J.B. Fasano; *AIChE Symposium Series*, No.293, **89**, 76-84(1993)
49. 高橋幸司; 液体混合の最適設計と操作; テクノシステム(2012), 3章気液混合
50. 永田進治, 山口 巖, 西川正史, 和田謙一; 化学工学, **31**, 1016-1019(1967)
51. 平田光穂, 城塚 正; 抽出工学, 日刊工業新聞社(1964), pp.147-158

52. 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂五版, 丸善(1988), 11 章抽出
53. 吉田文武, 森 芳郎編; 詳論 化学工学Ⅱ「単位操作Ⅱ」, 朝倉書店(1967), 18・17 章液体抽出速度
54. R.E. Treybal; Liquid Extraction 2nd Ed., McGraw Hill Inc. (1963), pp.413-414
55. P.H. Calderbank, M.B. Moo-Young; *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 39-54(1961)
56. J.J. Barker and R.E. Treybal; *AIChE J.*, **6**, 289-295(1960)
57. C.R. Wilke and P. Chang; *AIChE J.*, **1**, 264-270 (1955)
58. T.K. Sherwood and R.L. Pigford; Absorption and Extraction, McGraw-Hill, New York (1952)
59. 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂四版, 丸善(1978), 1.2 章 状態定数(表 1.10)
60. A.H.P. Skelland and G.G. Ramsay; *Ind. Eng. Chem. Res.*, **26**, 77-81(1987)
61. 永田進治ら; 化学工学と化学機械(化学機械協会年報, 8 巻), p.43 (1950)
62. J.D. Seader, E.J. Henley, D.K. Roper; Separation Process Principles (3rd Ed.), Wiley (2010), Chapter 8.5.1 Mixer-Settler Units
63. 久保田徳昭, 松岡正邦; 改訂 分かり易い晶析操作, 分離技術会(2009)
64. J.W. Mullin; Crystallization 4th Ed., Butterworth-Heinemann(2001), Chapter 6.1.4 Diffusion-reaction theories(pp.225-231)
65. A. Lewis, M. Seckler, H. Kramer, G. Rosmalen; Industrial Crystallization: Fundamentals and Applications (2015), p.119
66. A.N. Kolmogorov; The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*(1941), 301-305
67. D.M. Levins and J.R. Glastonbury; *Trans. Inst. Chem. Engrs*, **50**, 132-146(1972)
68. 石井 勉, 藤田重文; 化学工学, **29**, 316-321(1965)
69. 谷本 明, 小林 宏二, 藤田 重文; 化学工学, **27**, 424-428 (1965)
70. 城塚 正, 豊倉 賢, 後藤 典弘; 化学工学, **29**, 122-125 (1965)
71. T. N. Zwietering; *Chem. Eng. Sci.*, **8**, 244-253 (1958)
72. J.R. Couper, W.R. Penny, J.R. Fair; Chemical Process Equipment: Selection and Design 3rd Ed., Butterworth-Heinemann(2012), Chapter 10 Mixing and Agitation
73. R.H. Perry, D.W. Green; Perry's Chemical Engineers' Handbook 7th Ed.(1997), Section 2(Table2-120)

問 題

- (1)翼回転数一定の条件で攪拌所要動力を半分に減らしたい。現在使用中の翼径が 600 mm であるとき、翼径を何 mm に変更すればよいか。整数値で答えよ。動力数と液密度は一定であるものとする。
- (2)小型試験機の攪拌翼径を液量あたりの攪拌所要動力(P/V)一定の条件で 8 倍にスケールアップするとき、実機の攪拌回転数は小型試験機の何倍になるか。小数第 2 位まで答えよ。レイノルズ数は十分に大きく、完全邪魔板条件が成り立つものとする。
- (3)槽径 $D_1=1250$ mm の円筒容器に液深 $H_1=1300$ mm まで水を仕込み、翼径 $d_1=500$ mm、翼幅 $b_1=80$ mm の 2 枚羽根パドル翼を用いて回転数 $n_1=120$ rpm (120 min^{-1})で攪拌を行う試験機がある。この試験機を槽径 $D_2=2500$ mm の実機にスケールアップする。ただし、水の密度 $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ と粘度 $\mu=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ は一定とし、完全邪魔板条件を仮定する。実機の①翼径 d_2 [mm]、②翼幅 b_2 [mm]、③液深 H_2 [mm]、④液量 V_2 [m^3]をそれぞれ求めよ。
- (4)(3)において、液量あたりの攪拌所要動力(P/V)₁ を一定としてスケールアップした場合の実機の①攪拌所要動力 P_2 [kW]、②攪拌回転数 n_2 [rpm]、③翼先端速度 u_2 [m/s]をそれぞれ求めよ。試験機の攪拌所要動力 P_1 は、0.434 kW とする。

答(1)522 mm,(2)0.25 倍,(3)①1000 mm,②160 mm,③2600 mm,④12.8 m^3 ,(4)①3.47 kW,②75.6 rpm,③3.96 m/s

解 答

$$(1) P_2 = (1/2)P_1, n_2 = n_1, d_1 = 600 \text{ mm}$$

$$P_2/P_1 = N_p \rho n_1^3 d_1^5 / N_p \rho n_2^3 d_2^5 = n_2^3 d_2^5 / n_1^3 d_1^5 = n_1^3 d_2^5 / n_1^3 (600)^5$$

$$(1/2)P_1/P_1 = d_2^5/600^5$$

$$d_2 = (600)(1/2)^{1/5} = \boxed{522 \text{ mm}}$$

$$(2) d_2 = 8d_1$$

$$n_2/n_1 = (d_1/d_2)^{2/3} = (d_1/8d_1)^{2/3} = (2^{-3})^{2/3} = 2^{-2} = \boxed{0.25 \text{ 倍}}$$

$$(3) d_2/d_1 = D_2/D_1, b_2/b_1 = D_2/D_1, H_2/H_1 = D_2/D_1$$

$$\textcircled{1} d_2 = d_1(D_2/D_1) = (500)(2500/1250) = \boxed{1000 \text{ mm}}$$

$$\textcircled{2} b_2 = b_1(D_2/D_1) = (80)(2500/1250) = \boxed{160 \text{ mm}}$$

$$\textcircled{3} H_2 = H_1(D_2/D_1) = (1300)(2500/1250) = \boxed{2600 \text{ mm}}$$

$$\textcircled{4} V_2 = \pi(D_2/2)^2 H_2 = \pi(2.500/2)^2 (2.600) = 12.76 \approx \boxed{12.8 \text{ m}^3}$$

$$(4) \textcircled{1} P_2 = P_1(d_2/d_1)^3 = (434)(1000/500)^3 = 3472 \approx \boxed{3.47 \text{ kW}}$$

$$\textcircled{2} (d_2/d_1)^3 = (n_2^3 d_2^5) / (n_1^3 d_1^5)$$

$$(n_2/n_1)^3 = (d_1/d_2)^2$$

$$n_2 = n_1(d_1/d_2)^{2/3} = (120)(500/1000)^{2/3} = 75.59 \approx \boxed{75.6 \text{ rpm}}$$

$$\textcircled{3} u_2 = \pi n_2 d_2 = \pi(75.6/60)(1.000) = 3.958 \approx \boxed{3.96 \text{ m/s}}$$

令和 2 年 1 月 9 日作成

令和 2 年 1 月 10 日改訂

令和 2 年 1 月 29 日改訂

令和 2 年 2 月 6 日改訂

令和 3 年 1 月 27 日改訂

令和 3 年 1 月 28 日改訂

令和 3 年 2 月 25 日改訂