スケールアップ

１．基本的な考え方

小型の円筒撹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。これを大型の撹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撹拌条件を採用するであろう。しかし、「相似の装置形状」や「適切な撹拌条件」だけでは、具体的にいくらにすればよいのかの数字の部分が分からない。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)はいくら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。話を撹拌槽に戻す。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 $10D$ に取ると、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、大型槽の撹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取ると、大型槽の翼径は $10d$ に決まる。撹拌速度については、また別の考え方になる。10 倍にスケールアップすると、撹拌速度も 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、大型槽の撹拌速度は、小型槽よりも小さくて済む。なお、撹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。撹拌速度 n [1/s]と翼径 d [m]を乗じた nd は、速度の単位[m/s]であり、撹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 $10D$ に取ると、大型槽の撹拌速度は$(1/10)n$ と決まる。工学的根拠は、「小型槽の撹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、液体積あたりの撹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[m^2/m^3]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 $Q=UA\Delta T$ からも分かるように、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<u>**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。**</u>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が同じであるとして、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。

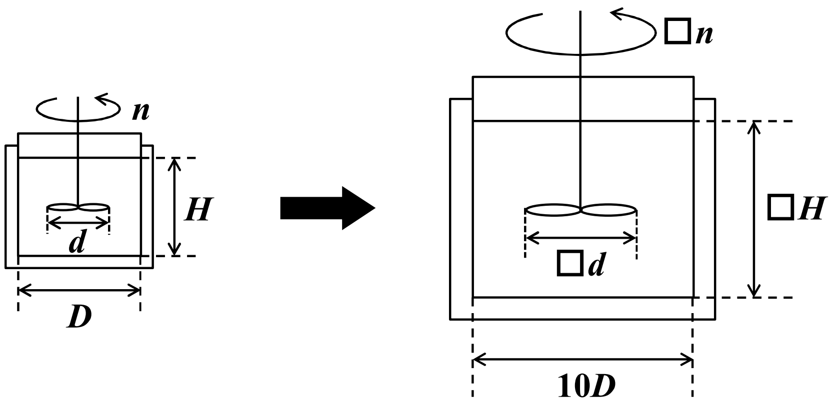

図 1.1 撹拌槽のスケールアップ

表 1.1 撹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
撹拌翼径	[m]	d	$10d$	翼径－槽径比 d/D 一定
撹拌速度	[1/s]	n	$\underline{(1/10)}n$	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]	$\propto 1/D$	$\propto \underline{(1/10)}(1/D)$	(伝熱面積)/(装置容積)

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。

$d_2/d_1=b_2/b_1=D_2/D_1=H_2/H_1=\cdots=\alpha$　…(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撹拌所要動力 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。

$Re_1 = Re_2$　…(2.2)　[1＝小型槽、2＝大型槽]

$$\frac{\rho_1 n_1 d_1^{\,2}}{\mu_1} = \frac{\rho_2 n_2 d_2^{\,2}}{\mu_2} \quad \cdots(2.3)$$

$$n_1 d_1^{\,2} = n_2 d_2^{\,2} \quad [\rho_1=\rho_2,\ \mu_1=\mu_2] \quad \cdots(2.4)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2} \quad \cdots(2.5)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^{\,3} d_2^{\,5}}{\rho_1 n_1^{\,3} d_1^{\,5}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(6-5)} = \frac{d_1}{d_2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(2.6)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \frac{d_1}{d_2}} \quad \cdots(2.7)$$

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。

$Fr_1 = Fr_2$　…(2.8)

$$\frac{n_1^{\,2} d_1}{g} = \frac{n_2^{\,2} d_2}{g} \quad \cdots(2.9)$$

$$n_1^{\,2} d_1 = n_2^{\,2} d_2 \quad \cdots(2.10)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1/2}} \quad \cdots(2.11)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^{\,3} d_2^{\,5}}{\rho_1 n_1^{\,3} d_1^{\,5}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{1/2}\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\{(3/2)-5\}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-7/2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(2.12)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-7/2}} \quad \cdots(2.13)$$

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液体積あたり撹拌所要動力一定（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、撹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。

$$\left(\frac{P}{V}\right)_1 = \left(\frac{P}{V}\right)_2 \quad \cdots(2.14)$$

$$\frac{P_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1} = \frac{P_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2} \quad \cdots(2.15)$$

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。

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \left(\frac{H_2}{H_1}\right) = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3} \quad \cdots(2.16)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3}} \quad \cdots(2.17)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\rho_1^{1/3} d_1^{5/3} P_2^{1/3}}{\rho_2^{1/3} d_2^{5/3} P_1^{1/3}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{5/3} \left[\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3\right]^{1/3} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{5/3} \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\{(5/3)-1\}} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2/3} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(2.18)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2/3}} \quad \cdots(2.19)$$

⑤翼先端速度一定（運動学的相似）　液体積あたり撹拌所要動力 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。

$$u_1 = u_2 \quad \cdots(2.20)$$

$$\pi n_1 d_1 = \pi n_2 d_2 \quad \cdots(2.21)$$

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 \quad \cdots(2.22)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \frac{d_1}{d_2}} \quad \cdots(2.23)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5 = \left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^1\right]^3 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(3-5)} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-2} \quad [\rho_1=\rho_2] \quad \cdots(2.24)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-2}} \quad \cdots(2.25)$$

⑥撹拌速度一定（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撹拌所要動力 P/V が大幅に増大するため、かなり激しい撹拌が必要となる。経済面の問題から、あまり用いられない。

$$n_1 = n_2 \quad \cdots(2.26)$$

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^0} \quad \cdots(2.27)$$

$$\frac{P_2}{P_1}=\frac{\rho_2 n_2^{\ 3} d_2^{\ 5}}{\rho_1 n_1^{\ 3} d_1^{\ 5}}=\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5=\left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^0\right]^3\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{(0-5)}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5}\quad[\rho_1=\rho_2]\quad\cdots(2.28)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5}}\quad\cdots(2.29)$$

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撹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、液体積あたりの撹拌所要動力 P/V が大幅に増大するため、現実的ではない。

$$\left(\frac{Q}{V}\right)_1=\left(\frac{Q}{V}\right)_2\quad\cdots(2.30)$$

対流伝熱式 $Q=hA\Delta T$ を用いると、次式となる。

$$\frac{h_1 A_1 \Delta T_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1}=\frac{h_2 A_2 \Delta T_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2}\quad\cdots(2.31)$$

ただし、h は境膜伝熱係数[W/(m･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。

$$\frac{hD}{k}=K\left(\frac{\rho n d^2}{\mu}\right)^\alpha\left(\frac{C_\mathrm{p}\mu}{k}\right)^\beta\left(\frac{\mu}{\mu_\mathrm{w}}\right)^\gamma\quad\cdots(2.32)$$

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

上式をさらにその上の式の h_1 と h_2 に代入する。

$$\begin{aligned}&\frac{[K(k_1/D_1)(\rho_1 n_1 d_1^{\ 2}/\mu_1)^\alpha(C_{\mathrm{p}1}\mu_1/k_1)^\beta(\mu/\mu_\mathrm{w})^\gamma](\pi D_1 H_1)\Delta T_1}{(\pi/4)D_1^2 H_1}\\&=\frac{[K(k_2/D_2)(\rho_2 n_2 d_2^{\ 2}/\mu_2)^\alpha(C_{\mathrm{p}2}\mu_2/k_2)^\beta(\mu/\mu_\mathrm{w})^\gamma](\pi D_2 H_2)\Delta T_2}{(\pi/4)D_2^2 H_2}\end{aligned}\quad\cdots(2.33)$$

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($C_\mathrm{p}, k, \rho, \mu$)が等しくなることから、上式は次式のようになる。

$$\frac{[(1/D_1)(n_1 d_1^{\ 2})^\alpha]\Delta T_1}{D_1}=\frac{[(1/D_2)(n_2 d_2^{\ 2})^\alpha]\Delta T_2}{D_2}\quad\cdots(2.34)$$

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。

$$\frac{(n_1 d_1^{\ 2})^\alpha}{D_1^{\ 2}}=\frac{(n_2 d_2^{\ 2})^\alpha}{D_2^{\ 2}}\quad\cdots(2.35)$$

装置寸法比一定の条件($D_2/D_1=d_2/d_1$)を用いる。

$$\frac{(n_1 d_1^{\ 2})^\alpha}{d_1^{\ 2}}=\frac{(n_2 d_2^{\ 2})^\alpha}{d_2^{\ 2}}\quad\cdots(2.36)$$

$$n_1^{\ \alpha} d_1^{\ 2\alpha-2}=n_2^{\ \alpha} d_2^{\ 2\alpha-2}\quad\cdots(2.37)$$

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^\alpha=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2\alpha-2}\quad\cdots(2.38)$$

$$\frac{n_2}{n_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2-(2/\alpha)} \qquad \cdots(2.39)$$

α の代表値として 2/3 を採用する。

$$\boxed{\frac{n_2}{n_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1}} \quad [\alpha=2/3] \qquad \cdots(2.40)$$

$$\frac{P_2}{P_1}=\frac{\rho_2 n_2^3 d_2^5}{\rho_1 n_1^3 d_1^5}=\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3\left(\frac{d_2}{d_1}\right)^5=\left[\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-1}\right]^3\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-5}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-3-5}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-8} \quad [\rho_1=\rho_2] \qquad \cdots(2.41)$$

$$\boxed{\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-8}} \qquad \cdots(2.42)$$

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することを考える(α=8)。D_1 と α は既知なので、装置寸法比一定の条件式($d_2/d_1=b_2/b_1=D_2/D_1=H_2/H_1=\cdots=\alpha$)より、大型槽の槽径 D_2 は $8D_1$ と決まる($D_2=8D_1$)。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、液体積あたり撹拌所要動力一定の条件(P/V 一定)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、撹拌速度の比(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撹拌速度 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、原則として撹拌速度のみである。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、既存の撹拌装置で、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、撹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。変更前の撹拌速度 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。

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、撹拌速度 n あるいは撹拌動力 P と撹拌翼径 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。

$$\frac{n_2}{n_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\beta}\quad\left[nd^{\beta}=const\right]\quad\cdots(4.1)$$

$$\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\gamma}\quad\left[Pd^{\gamma}=const\right]\quad\cdots(4.2)$$

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。

$$\frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\gamma}\quad\cdots(4.3)$$

$$\frac{P_2/V_2}{P_1/V_1}=\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\gamma}\frac{V_1}{V_2}\quad\cdots(4.4)$$

$$\frac{(P/V)_2}{(P/V)_1}=\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma/3}\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1}\quad\cdots(4.5)$$

$$\boxed{\frac{(P/V)_2}{(P/V)_1}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-1-(\gamma/3)}}\quad\cdots(4.6)$$

表 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

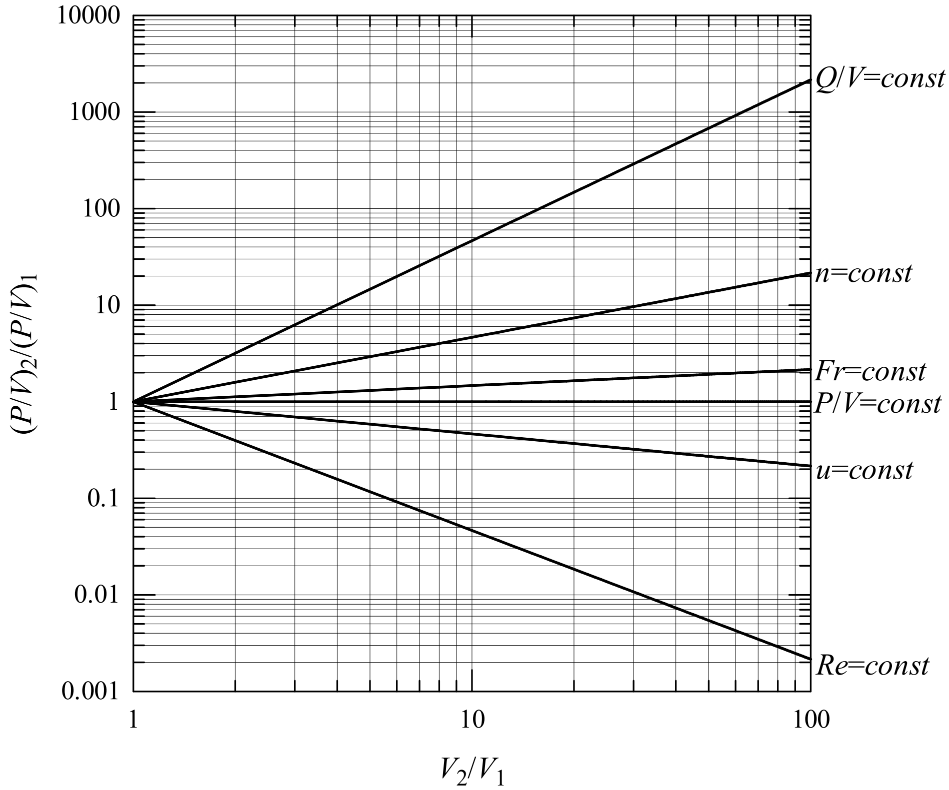

図 4.1　スケール比の影響

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 も比較的変動が小さいが、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、比較的実現しやすいと言える。

問　題

(1) 翼回転数一定の条件で撹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) 小型試験機の撹拌翼径を液量あたりの撹拌所要動力(P/V)一定の条件で 8 倍にスケールアップするとき、実機の撹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})で撹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 ρ=1000 kg/m^3 と粘度 μ=0.001 Pa・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) 前問において、液量あたりの撹拌所要動力$(P/V)_1$ を一定としてスケールアップした場合の実機の①撹拌所要動力 P_2 [kW]、②撹拌回転数 n_2 [rpm]、③翼先端速度 u_2 [m/s]をそれぞれ求めよ。試験機の撹拌所要動力 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,②76 rpm,③3.96 m/s