工業反応装置特論

講義時間：水曜/木曜6限
場所　　：8-1A
担当　　：山村

塗布製品の例

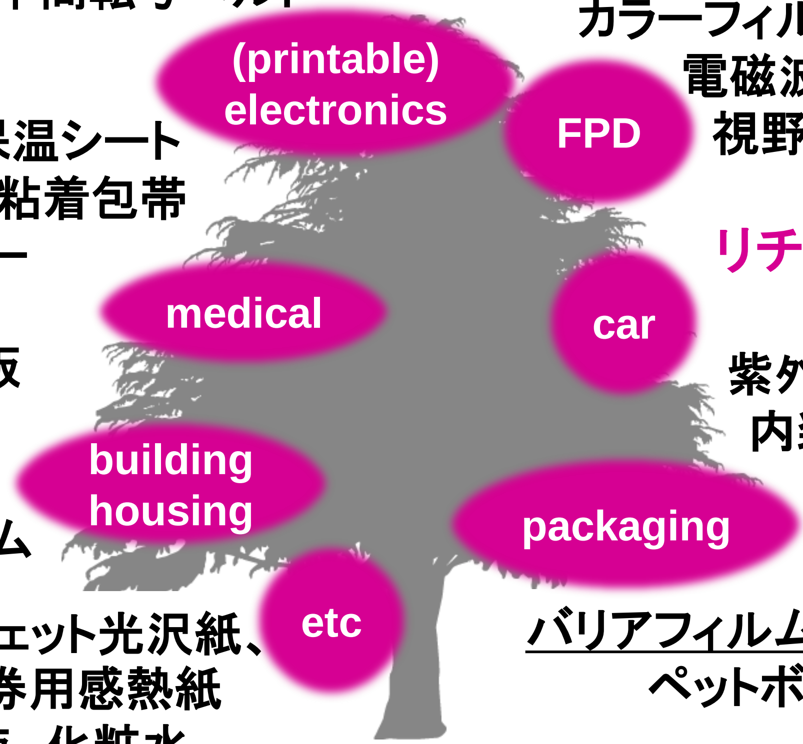
有機EL、太陽電池、有機トランジスタ
業務用磁気テープ、積層コンデンサ、
電子写真用感光ドラム・中間転写ベルト

偏光フィルム、拡散フィルム
カラーフィルタ、反射・帯電防止膜
電磁波シールドシート、
視野角調整フィルム

経皮吸収テープ、保温シート
培養シート、医療用粘着包帯
オムツカバー

リチウムイオン電池
燃料電池
紫外線カットフィルム
内装取付用テープ

住宅屋根用カラー鋼板
防カビ特殊壁紙
防火シート
ガラス飛散防止フィルム



インクジェット光沢紙、
乗車券用感熱紙
乳液、化粧水

バリアフィルム、耐熱性粘着テープ
ペットボトル・缶用印刷

（写真感光フィルム）（プラズマディスプレイ背面板）etc.

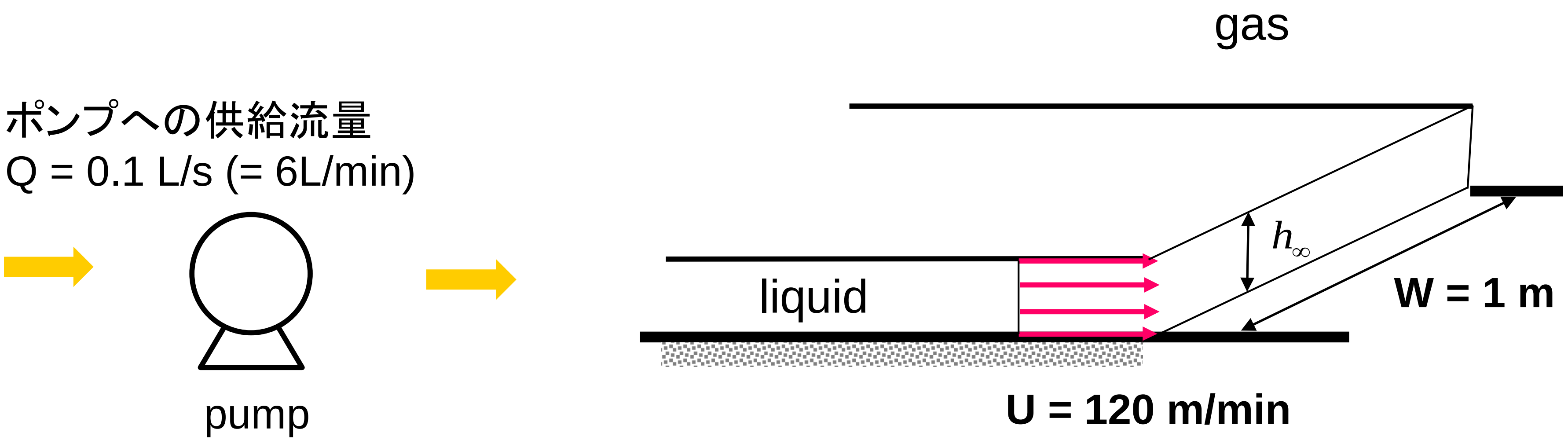
本講義のMISSION

COATING = 界面を作る技術　　であることを理解する

- □ **潤滑理論の基礎式を導出できる**
- □ **ブレード塗布時の速度・圧力分布を算出できる**
- □ **毛管力を考慮したFilm Profile Equation(FPE)を導出できる**
- □ **1D-FPEの線形安定性解析から，安定操作条件を導出できる**
- □ **スロットダイ塗布のコーティングウィンドウを決定できる**
- □ **粘弾性流体に対するMaxellモデルを導出できる**
- □ **動的粘弾性測定より貯蔵・損失弾性率を算出できる**
- □ **溶媒混合物からの特定溶媒の選択的乾燥挙動を算出できる**
- □ **高分子混合物に対するCahn-Hilliard Equation (CHE)を導出できる**
- □ **CHEの線形安定性解析から構造形成条件を決定できる**
- □ **摩擦理論より多成分系の拡散係数を推算できる**

・次週開始時にレポート提出
　納期に遅れたレポートは成績に反映しない
・講義資料を公開　www.che.kyutech.ac.jp/chem22
・必要に応じて期末試験を行う

塗布厚み

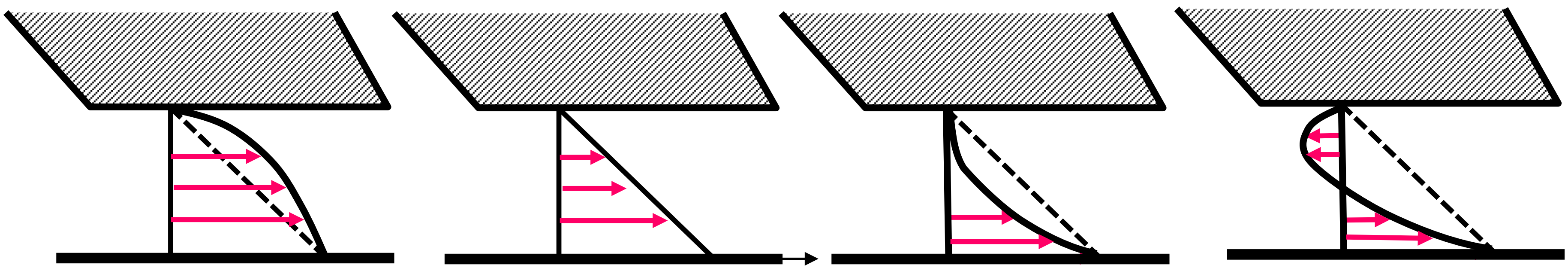


Q. 塗布厚みは何ミクロンか？

a. 5 μm
b. 50 μm
c. 500 μm

潤滑理論の基本的な考え方

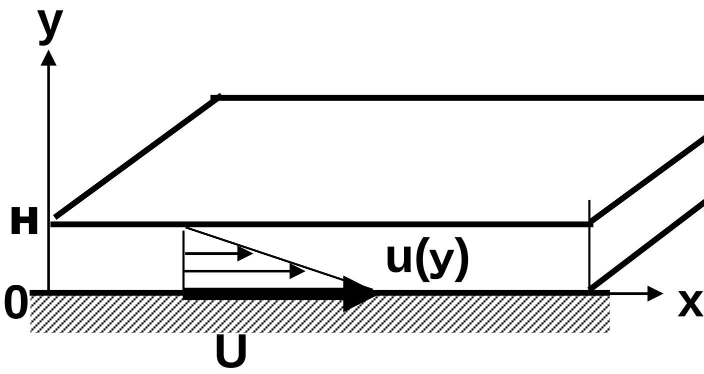
- ◆ 一定速度で右方向へ移動する平板と静止ブレードとの間の層流を考える
- ◆ 流れ場には流れ方向に一定の圧力勾配dp/dxがある



(a) dp/dx<0　(b) dp/dx=0（クエット流れ）　x　(c) dp/dx>0　(d) dp/dx>0

Q. 圧力勾配を増減させた場合の
速度分布を予想して描け

圧力分布がない場合：Couette flow



Q. 速度分布が直線の流れをクエット（Couette）流という。厚みHのクエット流の単位幅当りの流量qが次式で表されることを示せ。

$$q = \frac{1}{2} HU$$

速度分布は

$$u(y) = U(1 - \frac{y}{H})$$

$y = 0$からHまで積分すると

単位長さ当たりの流量qは

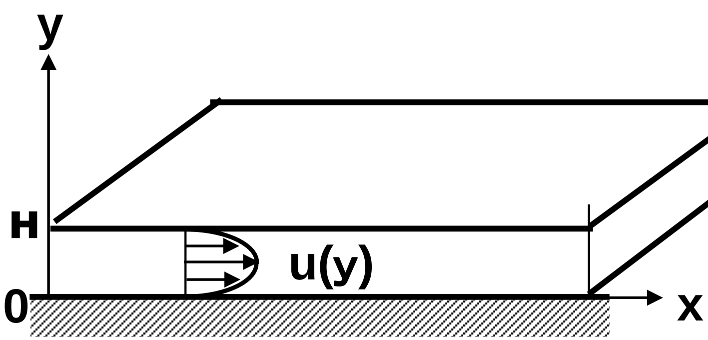
$$q \equiv \int_0^H u(y) dy$$

$$= U \int_0^H \left(1 - \frac{y}{H}\right) dy$$

$$= U \left[y - \frac{y^2}{2H} \right]_0^H$$

$$= \frac{1}{2} HU$$

圧力分布のみがある場合：Poiseuille flow



Q. 流れ方向に一定の圧力勾配dp/dx (<0)があるNewton流体の層流では、速度分布は次の2次曲線で表される。

$$u(y) = \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}(y^2 - Hy)$$

この厚みHのポアズイユ流の単位幅当りの流量qが次式で表されることを示せ。

$$q = \frac{H^3}{12\mu}(-\frac{dp}{dx})$$

速度分布を$y=0$からHまで積分すると、単位長さ当たりの流量qは

$$q \equiv \int_0^H u(y)dy$$

$$= \int_0^H \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}(y^2 - Hy)dy$$

$$= \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}\left[\frac{y^3}{3} - \frac{Hy^2}{2}\right]_0^H$$

$$= \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}\left(-\frac{H^3}{6}\right)$$

$$\therefore q = \frac{H^3}{12\mu}(-\frac{dp}{dx}) > 0$$

一般的な場合

流量は2つの流れの線形和で表される

$$q = \underbrace{-\frac{1}{12\mu}\frac{dp}{dx}H^3}_{\text{圧力勾配による ポアズイユ流れ}} \underbrace{+\frac{1}{2}HU}_{\text{基板走行による クエット流れ}} \quad (1)$$

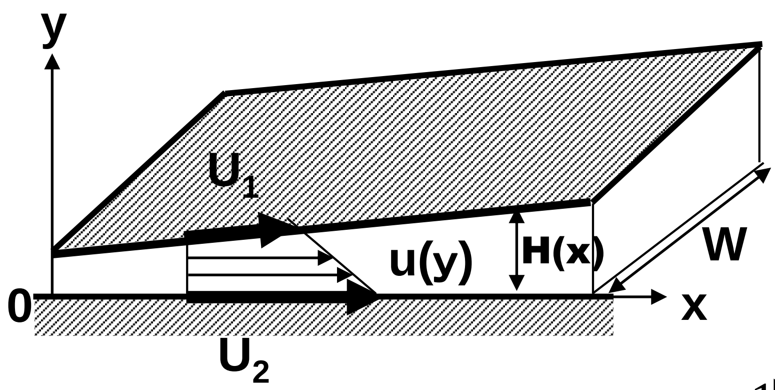
以下に証明を示す。必要な情報は

・運動量収支

・物質収支

・境界条件（壁面で流体は静止）

一般的な場合：潤滑理論（1）



運動方程式
（後述のシェルバランスより）

$$\mu \frac{d^2u}{dy^2} = \frac{dp}{dx}$$

- Newton流体を仮定
- 重力無視
- 詳しい導出は後頁

1回積分して

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{\mu}\frac{dp}{dx}y + C_1$$

もう1回積分して

$$u = \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}y^2 + C_1 y + C_2$$

境界条件$y = 0 : U = U_2$,　$y = H(x) : U = U_1$から

$$C_1 = \frac{U_1 - U_2}{H} - \frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}H$$

$$C_2 = U_2$$

一般的な場合：潤滑理論(2)

よって速度分布は

$$u=\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}y^2+\left(\frac{U_1-U_2}{H}-\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}H\right)y+U_2 \qquad (2)$$

$y=0$から$H(x)$まで積分すると

単位長さ当たりの流量qは

$$q\equiv\int_0^H u(y)dy$$

$$=\int_0^H\left[\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}y^2+\left(\frac{U_1-U_2}{H}-\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}H\right)y+U_2\right]dy$$

$$=\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}\left[\frac{y^3}{3}\right]_0^H+\left(\frac{U_1-U_2}{H}-\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}H\right)\left[\frac{y^2}{2}\right]_0^H+U_2H$$

$$=\frac{1}{6\mu}\frac{dp}{dx}H^3+\frac{1}{2}\left(\frac{U_1-U_2}{H}-\frac{1}{2\mu}\frac{dp}{dx}H\right)H^2+U_2H$$

一般的な場合：潤滑理論（３）

整理すると

$$q = -\frac{1}{12\mu}\frac{dp}{dx}H^3 + \frac{1}{2}(U_1 + U_2)H \quad (3)$$

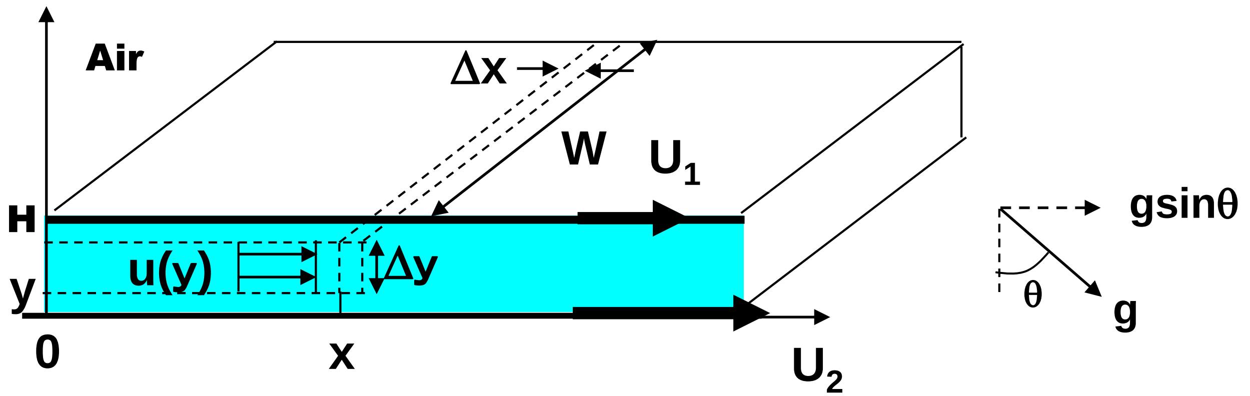
U_1=0（静止ブレード）, U_2=U（移動壁）とすれば
式(3)は式(1)に一致

式(3)を整理すると

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu(U_1 + U_2)}{H^2} - \frac{12\mu q}{H^3} \quad (4)$$

式(4)を式(2)に代入すれば、与えられた（単位幅あたりの）流量qにおける速度分布が算出できる

基礎式の導出(1)



yにおけるシェル面積は$W\Delta x$なので

単位時間にyからシェル内へ流入するx方向の運動量は$(\tau_{yx}W\Delta x)\big|_y$

同様に$y+\Delta y$からシェル外へ流出するx方向の運動量は$(\tau_{yx}W\Delta x)\big|_{y+\Delta y}$

xにおけるシェル面積は$W\Delta y$なので

xにおいてシェルへ作用する圧力は$(W\Delta yp)\big|_x$

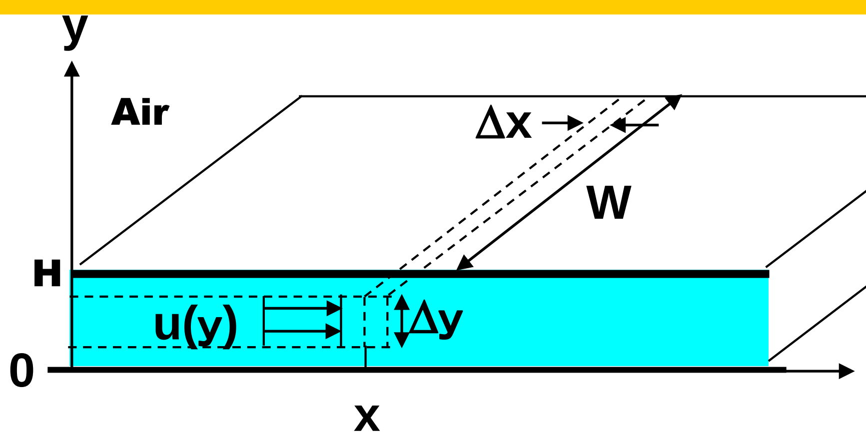
$x+\Delta x$においてシェルへ作用する圧力は$(W\Delta yp)\big|_{x+\Delta x}$

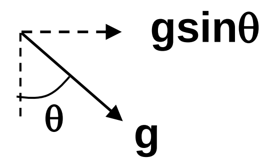
シェル体積は$W\Delta x\Delta y$なのでシェルに作用する重力は$(W\Delta x\Delta y)\rho g\sin\theta$

従って定常状態を仮定すると運動量収支から

$$0=(W\Delta yp)\big|_x-(W\Delta yp)\big|_{x+\Delta x}+(\tau_{yx}W\Delta x)\big|_y\Delta-(\tau_{yx}W\Delta x)\big|_{y\Delta y}+(W\Delta x\Delta y)\rho g\sin\theta$$

基礎式の導出(2)





シェル体積$W\Delta x \Delta y$で除すと

$$0 = -\frac{p\big|_{x+\Delta x} - p\big|_{x}}{\Delta x} - \frac{\tau_{yx}\big|_{y+\Delta y} - \tau_{yx}\big|_{y+\Delta y}}{\Delta y} + \rho g \sin\theta$$

$\Delta x \to 0, \quad \Delta y \to 0$では

$$0 = -\frac{dp}{dx} - \frac{d\tau_{yx}}{dy} + \rho g \sin\theta$$

ニュートン流体ならば$\tau_{yx} = -\mu \dfrac{du}{dy}$であるから

$$0 = -\frac{dp}{dx} + \frac{d}{dy}\left(\mu \frac{du}{dy}\right) + \rho g \sin\theta$$

ニュートン流体ならばμは一定なので

$$0 = -\frac{dp}{dx} + \mu \frac{d^2 u}{dy^2} + \rho g \sin\theta \quad (6)$$

重力が厚み方向に作用する場合は

$\theta = 0$なので

$$0 = -\frac{dp}{dx} + \mu \frac{d^2 u}{dy^2}$$

Report 1 film thickness in blade coating 氏名

x方向に一定の速さUで走行する基材と、基材から一定の間隙Hだけ離れた位置に静止した剛体ブレードとの間に挟まれたNewton流体の内部には、基材面に対して垂直なy方向の速度分布u(y)が生じる。x方向に一定の圧力勾配dp/dxが存在する場合について以下の問いに答えよ。ただしμは液体粘度，qは単位幅当りの流量であり、境界条件はy=0でu=U, y=Hでu=0である。

[問1] 速度分布が次式で表わされることを示せ。

$$u = 3\left(U - \frac{2q}{H}\right)\left(\frac{y}{H}\right)^2 - 4\left(U - \frac{3q}{2H}\right)\frac{y}{H} + U \quad (1)$$

[問2] 速度分布が直線となるのは流量qが次式を満たす場合であることを示せ。

$$q = \frac{HU}{2} \quad (2)$$

[問3]横軸にu/U、縦軸にy/Hをとったグラフを異なる3つの流量qについて描き、流量qがある臨界値以下になると逆流（基材の走行方向とは逆向きの流れ）が発生することを示せ。ただしU、Hは現実的な値を各自で想定して定めてよい。