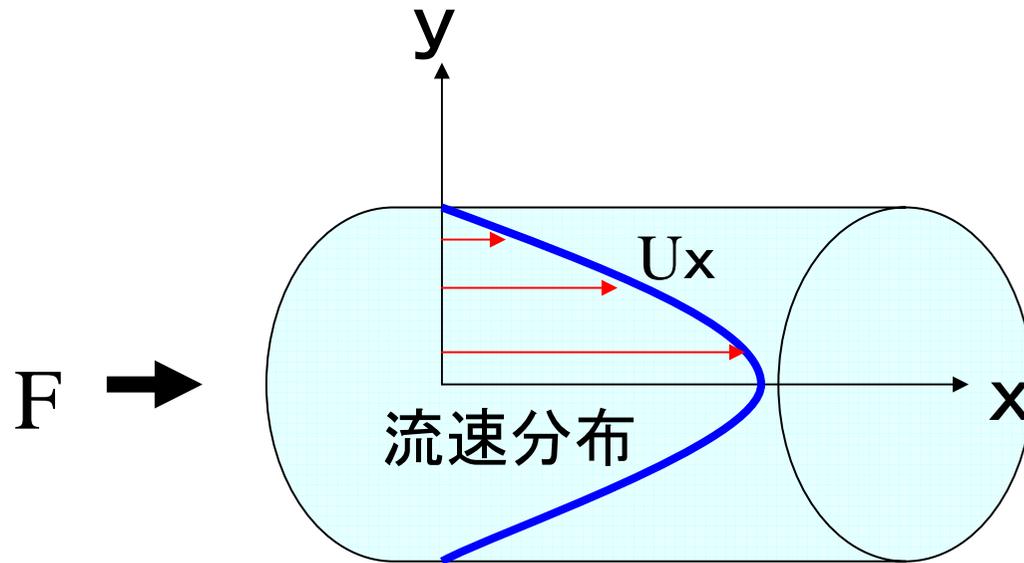


Newton 粘性 (Viscosity)



$$F = \eta_s D$$

比較 Hook's Law

$$F = kx$$

η_s : 粘性係数、せん断粘度、 D : 流速勾配

$$D = dU_x/dy = (dx/dt)/dy = (dx/dy)/dt$$

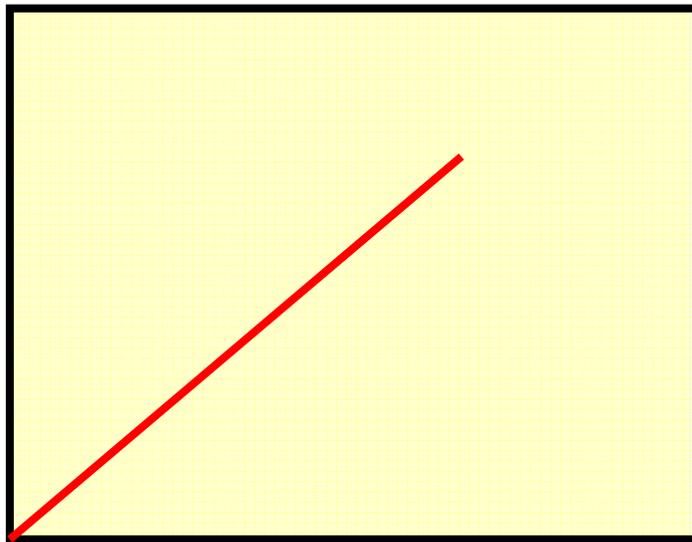
dx/dy : せん断変形 (shear deformation) = γ

$D = d\gamma/dt$: せん断速度 (shear rate)

Newton 流体の性質

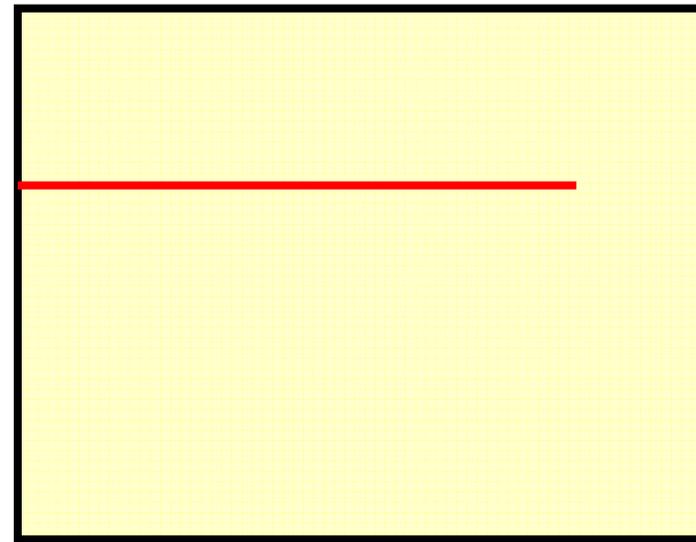
$$F = \eta_s D$$

速度勾配
D



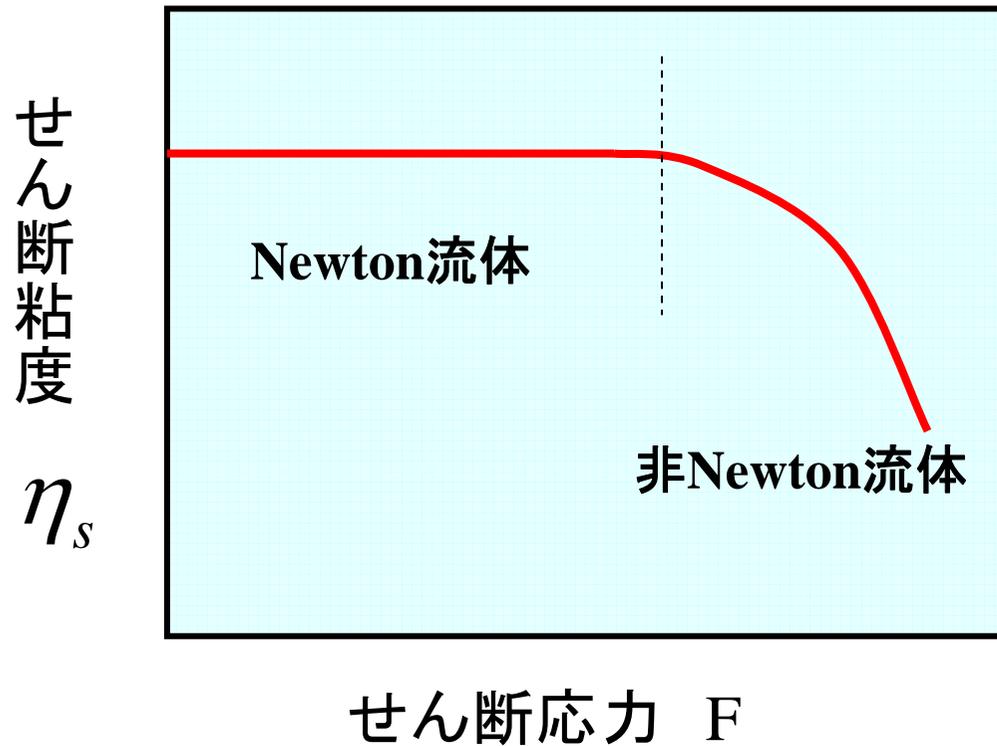
せん断応力 F

せん断粘度
 η_s



せん断応力 F

粘度のせん断応力依存性



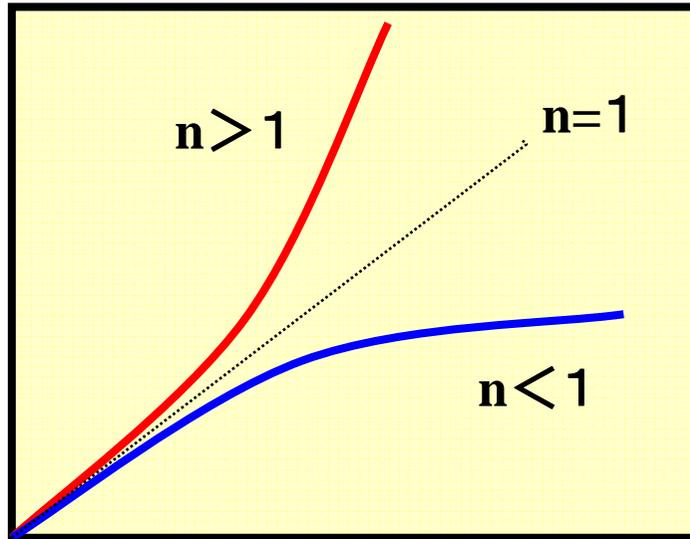
せん断応力が小さい時: Newton流体

せん断速度大きい時: 非Newton流体 (べき法則流体)

非Newton 流体の性質

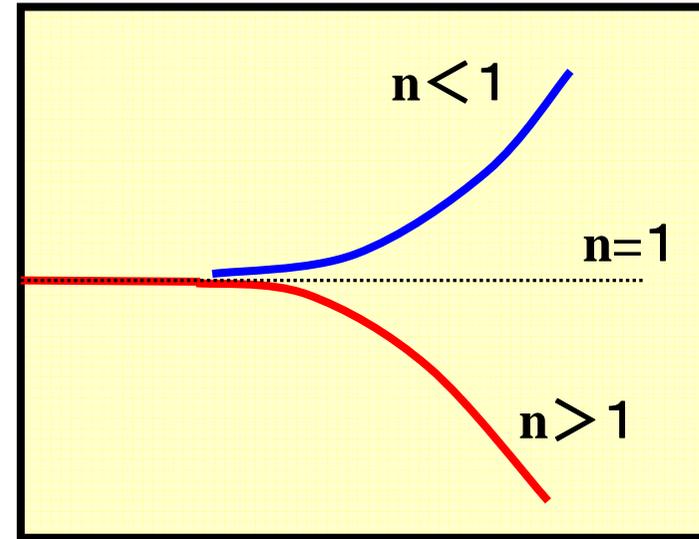
$$F = \eta_s D^{1/n}$$

速度勾配
D



せん断応力 F

せん断粘度
 η_s



せん断応力 F

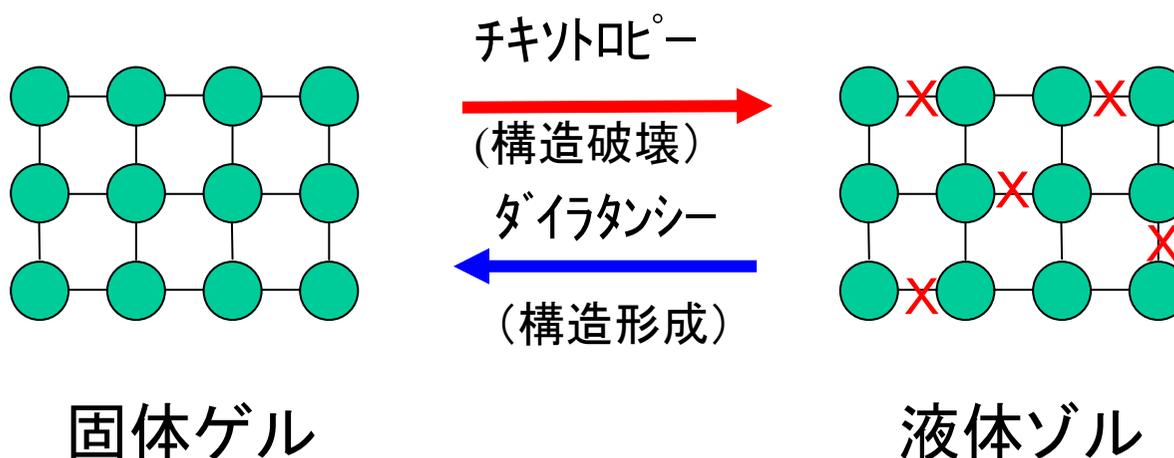
$n=1$: Newton流体、 $n>1$: チキソトロピー、 $n<1$: ダイラタンシー

各種の液体の性質

Newton液体 : 水、低分子液体

チキソトロピー : 塗料、あり地獄、鳴き砂 (粒子均一)

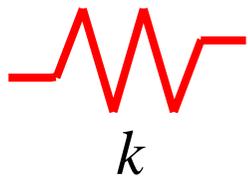
ダイラタンシー : 生クリーム、海辺の砂 (粒子不均一)



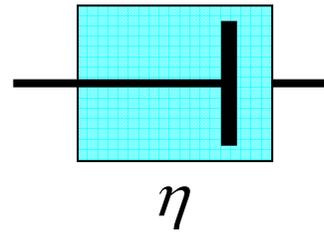
粘弾性体の変形

弾性 → バネ

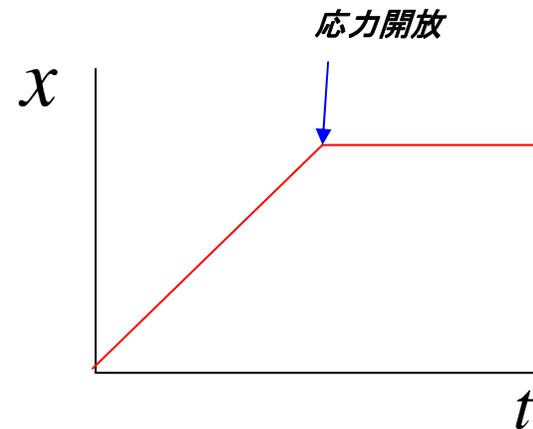
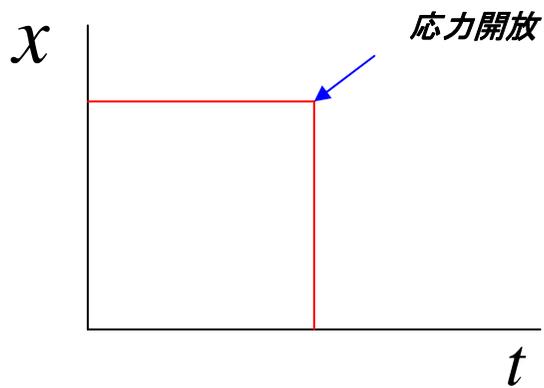
粘性 → ダッシュポット



$$F = kx$$

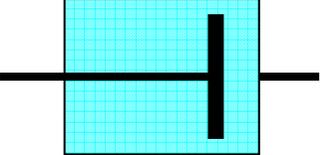


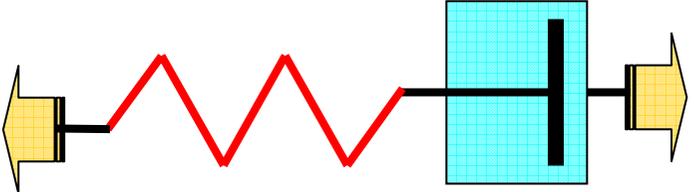
$$F = \eta \frac{dx}{dt}$$

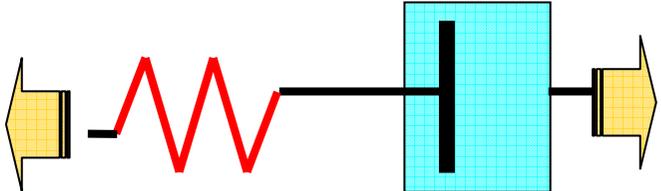


一般の材料の性質

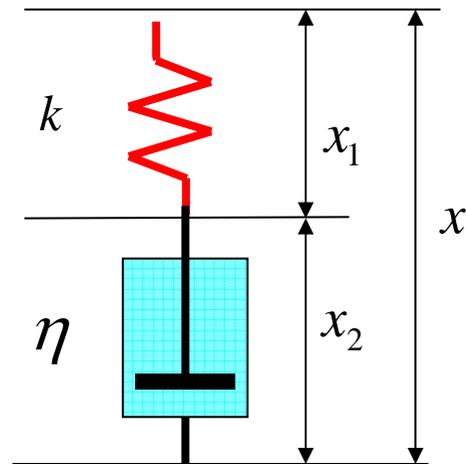
弾性 → バネ  $F = kx$

粘性 → ダッシュポット  $F = \eta D$

早い変形  緩和時間、
応答時間: τ

遅い変形  $\tau = \eta/k$

直列モデル (Maxwell Model)



$$x = x_1 + x_2$$

$$F = k x_1$$

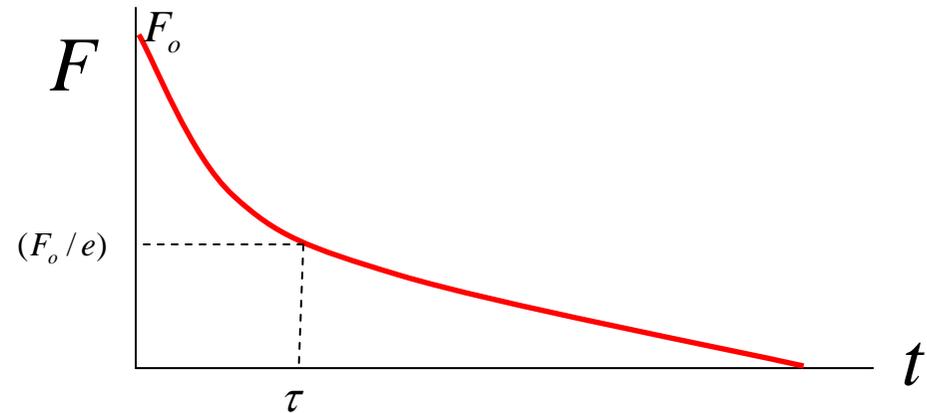
$$F = \eta \frac{dx_2}{dt}$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{k} \frac{dF}{dt} + \frac{F}{\eta}$$

$$\frac{dx}{dt} = 0$$

$$F = F_0 e^{-t/\tau}$$

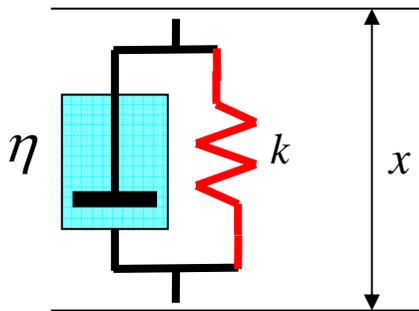
$$\tau = \eta/k$$



応力緩和 (歪一定)

高分子材料の応力緩和現象を良く表現できる。

並列モデル (Voigt Model)



$$x = x_{\infty} (1 - e^{-t/\lambda})$$

$$\lambda = \eta/k$$

$$F_1 = kx$$

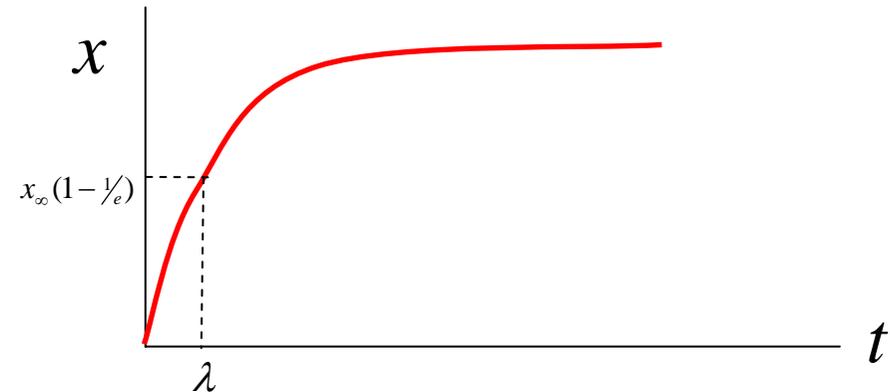
$$F_2 = \eta \frac{dx}{dt}$$

$$F = F_1 + F_2$$

$$= kx + \eta \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{dF}{dt} = 0$$

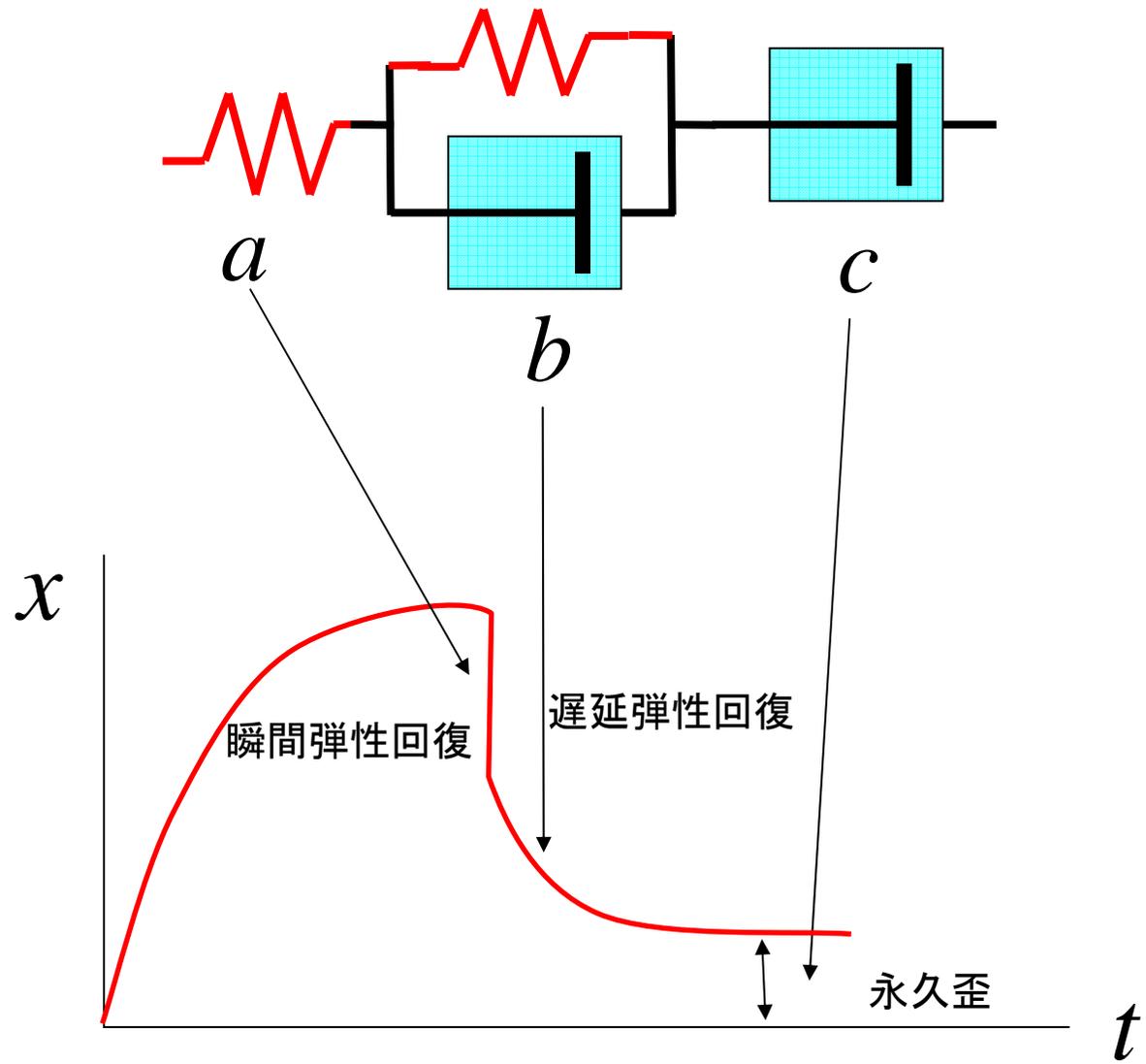
$$k \frac{dx}{dt} + \eta \frac{d^2x}{dt^2} = 0$$



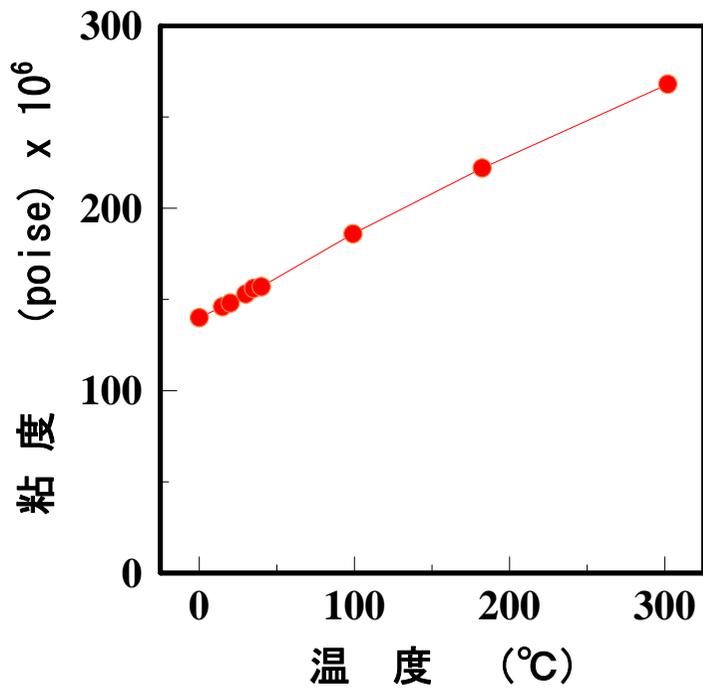
クリープ (応力一定)

高分子材料のクリープ現象を良く表現できる。

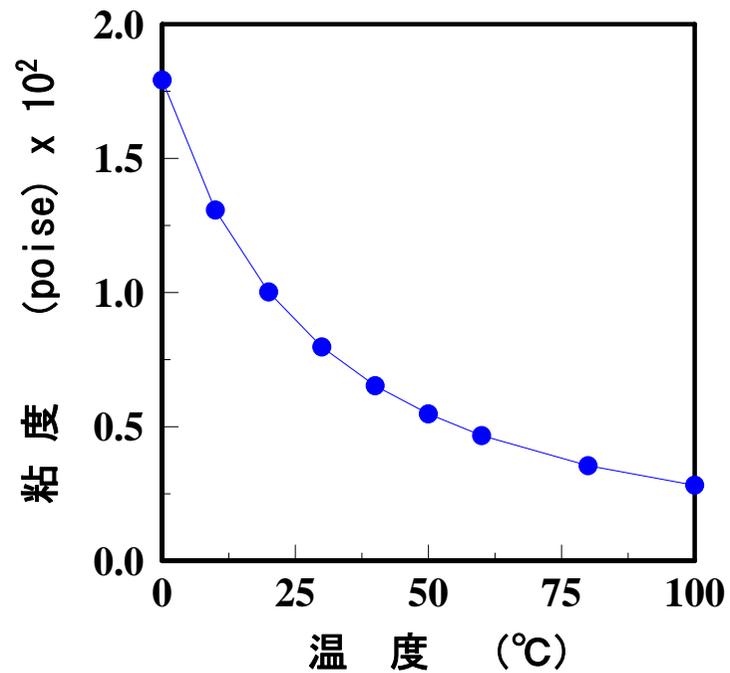
複合モデル



気体と液体の粘度の温度変化



炭酸ガス(気体)



水 (液体)

気体の粘度の温度依存性

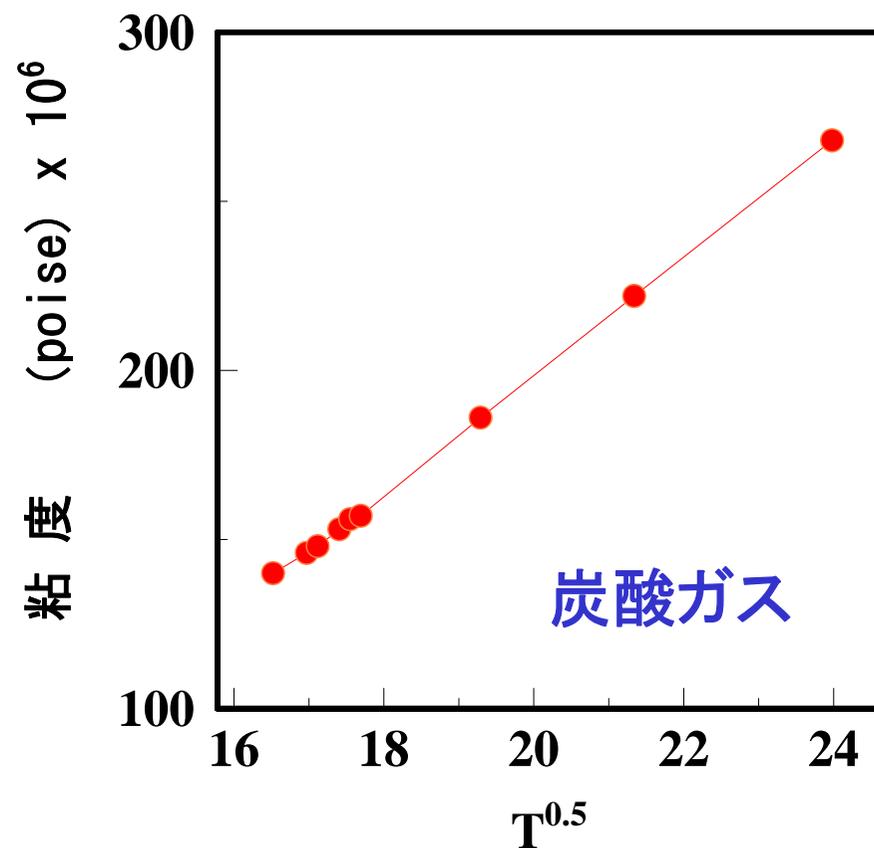
気体分子運動論

$$\eta = \frac{2}{3\pi r^2} \sqrt{\frac{mkT}{\pi}}$$

m : 分子の質量

r : 分子の直径

$$\eta \propto T^{0.5}$$



液体の粘度の温度変化

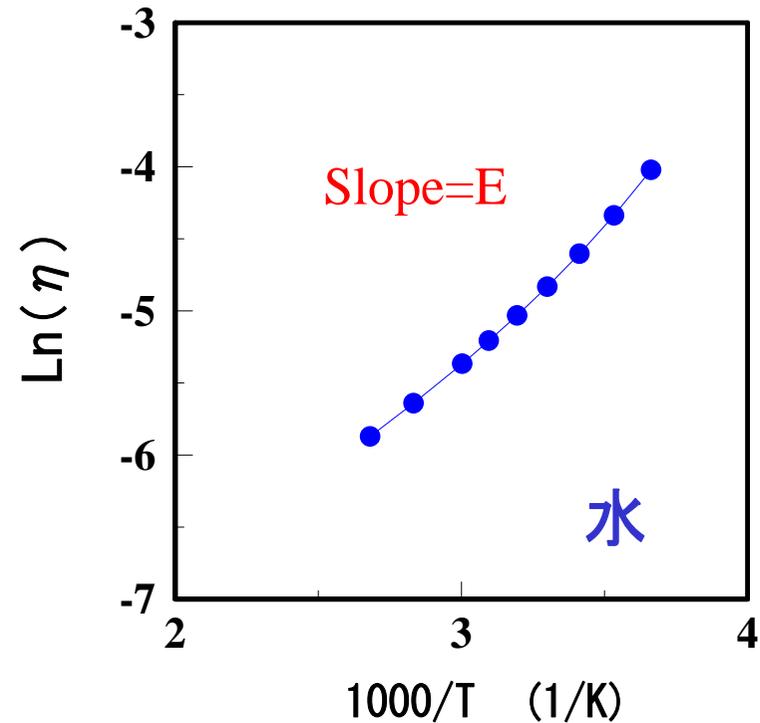
Andradeの粘度則

(1930年)

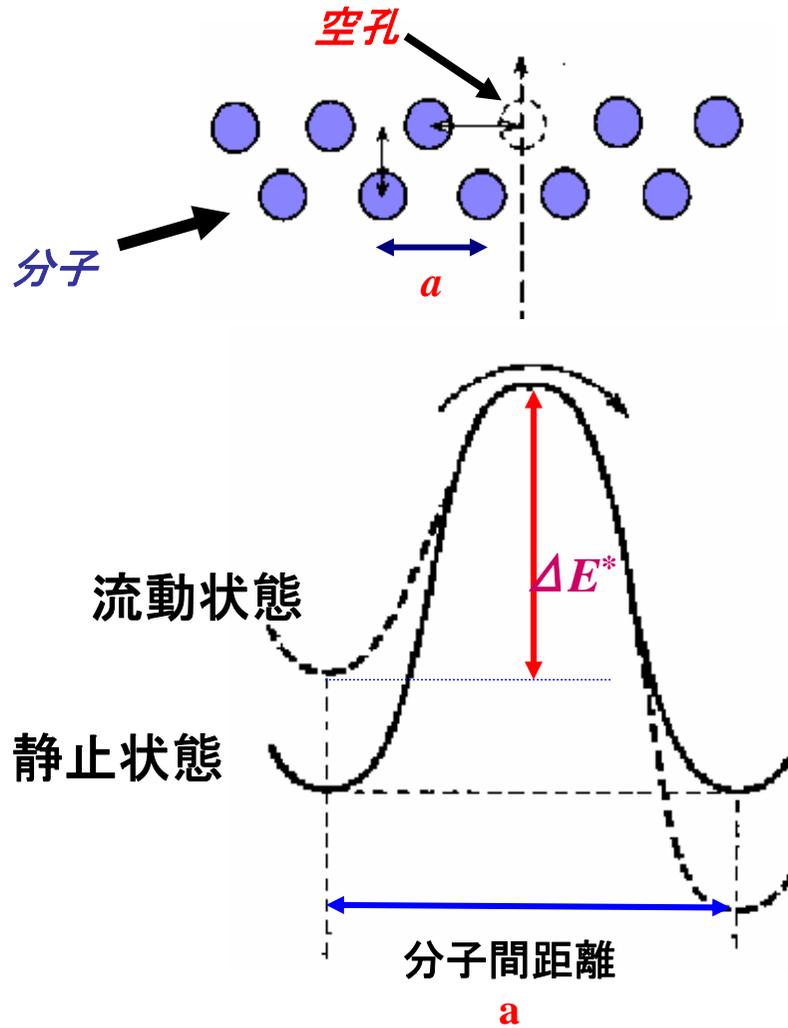
$$\eta = A \exp\left[\frac{\Delta E}{RT}\right]$$

$$\ln[\eta] = \ln[A] + \frac{\Delta E}{RT}$$

ΔE : 流動の活性化エネルギー



Eyringの粘度則



液体 = 分子 + 空孔
分子が空孔へ移動

ΔE^* : 活性化(自由)エネルギー

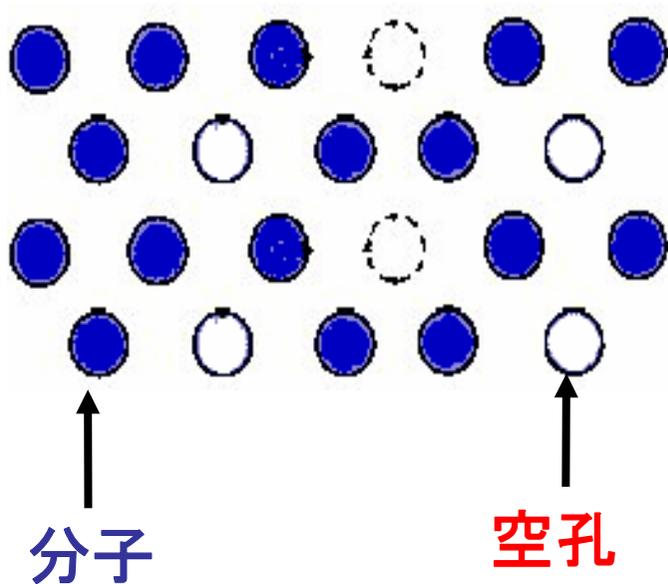
$$\eta = \frac{Nh}{V} \exp\left[\frac{\Delta E^*}{RT}\right]$$

N : アボガドロ数、 h : プランク定数

V : 分子容

Doolittle の粘度則

粘度 \propto 自由体積



$$v = v_0 + v_f$$

$$v_f \ll v_0$$

v : 液体の比容
 v_0 : 分子の比容
 v_f : 空孔の比容

$$\eta = A_0 \exp\left[\frac{Bv_0}{v_f}\right]$$

$$v_f/v_0 \approx v_f/v = f$$

f : 自由体積分率

$$\eta = A_0 \exp\left[\frac{B}{f}\right]$$

B : 定数 ≈ 1