

ガス吸収

1. 充填塔

充填塔は、内部にリング状の人工物や触媒粉体などの充填物を詰めた液分散型の気液分離装置であり、圧力損失が小さく、構造が単純で安価である。気液接触方式は、一般に向流操作が用いられる。塔頂より供給される吸収液は、充填物を濡らしながら流下する。塔底より供給されるガスは、充填物の間隙を通過して上昇する。充填物の表面上で気液接触することで、ガス側の目的成分が吸収液側へ物質移動する。充填物には、表面積と空隙率が大きく、丈夫なものが望まれる。**不規則充填物**は、取り扱いが容易だが偏流が起りやすい。**規則充填物**は、積み重ねて充填する。高価だが偏流が起りにくい。吸収液の選定について、回収の成分がアセトンやアンモニアなど水溶性の場合は水、ベンゼンなど油溶性の場合は鉱油（灯油や軽油など、石油留分に含まれる炭化水素油）、二酸化炭素や硫化水素など酸性ガスの場合はアルカリ溶液が用いられる。

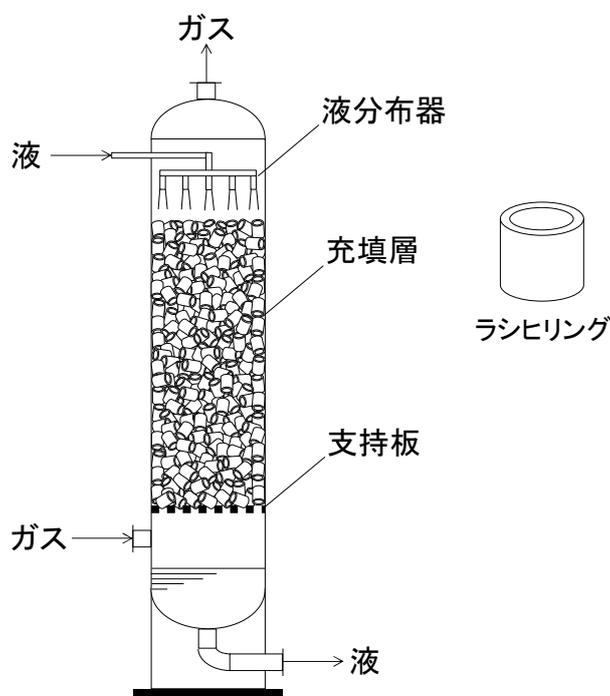


図 1.1 向流充填塔

[文献 1] R.E. Treybal; Mass-transfer operations 第3版 (1980), 6章 図 6.27 を参考に作成

2. ガスの溶解度

2. 1 難溶性ガスの場合

溶質成分と不溶性の中性成分からなる混合ガスに圧力をかけて水と接触させると、混合ガス中の溶質成分が水に吸収されて気液間での物質移動が起こる。気液平衡時における溶質ガスの平衡分圧 p [Pa] と溶質成分の最大溶解量、すなわち溶解度 C [kmol/m³] との間には、直線関係が成り立つ。この関係をヘンリ

一の法則といい、水に難溶性かつ反応性に乏しい不活性のガスに対して成り立つ。

$$p = HC \quad \cdots(2.1.1)$$

ただし、 H はヘンリー定数[Pa・m³/kmol]であり、この値が大きいほど溶質は水に溶解しにくい。上式を次式のように変形すると、溶解度 C [kmol/m³]は液相中の溶質モル分率 x [-]に変換される。

$$p = HC_T x \quad \cdots(2.1.2)$$

$$\boxed{p = Ex} \quad [E \equiv HC_T] \quad \cdots(2.1.3)$$

ただし、 C_T は溶液の全濃度(溶液のモル密度)[kg/m³]、 E はヘンリー定数[Pa/モル分率]。

上式を次式のように変形すると、分圧 p [Pa]は気相中の溶質モル分率 y [-]に変換される。

$$\frac{p}{P_T} = \frac{Ex}{P_T} \quad \cdots(2.1.4)$$

$$\boxed{y = mx} \quad \left[m \equiv \frac{E}{P_T} \right] \quad \cdots(2.1.5)$$

ただし、 m はヘンリー定数[-]、 P_T は溶質ガスと不活性ガスの全圧[Pa]。

ヘンリー定数 C, E, m の間には、次式が成り立つ。

$$E = C_T H = P_T m \quad \cdots(2.1.6)$$

ガスの溶解度は温度の影響を受けることから、ヘンリー定数も温度ごとに変化する。各種ガスに対する各温度でのヘンリー定数については、化工便覧を参照の事。

2. 2 易溶性ガスの場合

NH₃、Cl₂、SO₂などは水に対する溶解度が高く、ヘンリーの法則が成り立たない。ガスの種類ごとに定式化するか、文献値を用いる。

SO₂の溶解度について、次式が知られている。[文献 2]

$$x = ap + bp^{1/2} \quad [p > 0.025 \text{ atm}] \quad \cdots(2.2.1)$$

$$\log_{10} a = \frac{1282}{T_L} - 5.939 \quad \cdots(2.2.2)$$

$$\log_{10} b = \frac{1368}{T_L} - 7.232 \quad \cdots(2.2.3)$$

ただし、 T_L は吸収液の絶対温度[K]。

いくつかの有機物ガスの溶解度について、次式が知られている。[文献 2]

$$\text{(アセトン)} \quad \log_{10} E = 7.165 - \frac{2040}{T_L} \quad \cdots(2.2.4)$$

$$\text{(エタノール)} \quad \log_{10} E = 7.580 - \frac{2390}{T_L} \quad \cdots(2.2.5)$$

$$\text{(メタノール)} \quad \log_{10} E = 5.478 - \frac{1550}{T_L - 43.15} \quad \cdots(2.2.6)$$

ただし、 E はヘンリー定数[atm/モル分率]、 T_L は吸収液の絶対温度[K]。

2. 3 溶解平衡曲線

溶解平衡曲線は、次式で表される。

$$y = mx \quad \left[m \equiv \frac{E}{P_T} \right] \quad \cdots(2.3.1)$$

塔頂から塔底へ向かって溶質ガスの吸収が進むにつれ、溶質成分の凝縮熱 λ [kJ/kmol] と溶解熱 q [kJ/kmol] により吸収液の温度が上昇する。吸収液 1 モルあたりの発熱量は、溶質 1 モルあたりの放熱量に等しいことから、塔の中腹(溶質モル分率 x)において、次式が成り立つ。[文献 3]

$$C_p M (T_L - T_{L1}) = (\lambda + q)x \quad \cdots(2.3.2)$$

$$T_L = \frac{\lambda + q}{C_p M} x + T_{L1} \quad \cdots(2.3.3)$$

ただし、 C_p は吸収液の平均モル比熱[kJ/(kg·K)]、 M は吸収液のモル質量[kg/kmol]、 T_L は中腹の吸収液温度[K]、 T_{L1} は塔頂の吸収液温度[K]。

塔頂から塔底における適当な x を上式に代入してその位置における液温 T を求め、文献値や関連式によりその液温でのヘンリー定数 E または m を求める。平衡曲線の式に上の x を代入すると、ガス側の平衡濃度 y が求まるので、 x - y 座標上にプロットする。また別の x を代入して同様の手順を繰り返すと、折れ線での溶解平衡曲線を描くことができる。

3. 充填塔内のガス流速および溶質組成

3. 1 溶質ガス

3. 1. 1 塔底(溶質ガス)

塔底の溶質ガスのモル流速 $G_{MAb}S$ [kmol/h] は、次式で表される。

$$G_{MAb}S = G_{MTb}S y_b \quad \cdots(3.1.1.1)$$

塔底の混合ガス基準の溶質ガス組成 y_b [kmol-溶質/kmol-混合ガス] は、設計条件として与えられる。

塔底の同伴ガス基準の溶質ガス組成 Y_b [kmol-溶質/kmol-同伴ガス] は、次のように導かれる。混合ガスの量を 1 [kmol-混合ガス] とすると、溶質ガスの量は 1 [kmol-混合ガス] $\times y$ [kmol-溶質/kmol-混合ガス] = y [kmol-溶質]、同伴ガスの量は 1 [kmol-混合ガス] $\times (1-y)$ [kmol-同伴ガス/kmol-混合ガス] = $1-y$ [kmol-同伴ガス] となる。単位に着目して立式すると、次式となる。

$$Y_b = \frac{y_b}{1-y_b} \quad \cdots(3.1.1.2)$$

3. 1. 2 塔頂(溶質ガス)

塔頂の溶質ガスのモル流速 $G_{MA1}S$ [kmol/h] は、次式で表される。

$$G_{MA1}S = G_{MTb}S y_b (1-\eta) \quad \cdots(3.1.2.1)$$

ただし、 η は溶質の回収率[-]。

上式は、溶質が吸収液によって回収された後、塔頂より排出される残存の溶質量を表す。

塔頂の混合ガス基準の溶質ガス組成 y_t [kmol-溶質/kmol-混合ガス]は、次式のように導かれる。

$$y_t = \frac{G_{MAI}S}{G_{MAI}S + G_{MB}S} \quad \cdots(3.1.2.2)$$

$$y_t = \frac{G_{MTb}S y_b(1-\eta)}{G_{MTb}S y_b(1-\eta) + G_{MTb}S(1-y_b)} \quad \cdots(3.1.2.3)$$

$$y_t = \frac{y_b(1-\eta)}{y_b(1-\eta) + (1-y_b)} \quad \cdots(3.1.2.4)$$

$$\boxed{y_t = \frac{y_b(1-\eta)}{1-y_b\eta}} \quad \cdots(3.1.2.5)$$

なお、最初の y_t 式の分母を塔底の混合ガスの全モル流速 $G_{MTb}S$ と置くのは間違いである。混合ガス中の溶質の一部は、吸収液側に移動するので、混合ガス全体としてのモル数、すなわちモル流速は減少する。

したがって、塔底の $G_{MTb}S$ 値は塔内で変化するので、そのまま用いることはできない。同伴ガス流速と塔頂における溶質ガス流速を別々に求めて和をとり、塔頂の混合ガス流速を求める。

塔頂の同伴ガス基準の溶質ガス組成 Y_t [kmol-溶質/kmol-同伴ガス]については、まず Y の式を y について整理する。

$$Y = \frac{y}{1-y} \quad \cdots(3.1.2.6)$$

$$Y(1-y) = y \quad \cdots(3.1.2.7)$$

$$Y = (1+Y)y \quad \cdots(3.1.2.8)$$

$$y = \frac{Y}{1+Y} \quad \cdots(3.1.2.9)$$

y_t の式に代入すると、同伴ガス基準の溶質ガス組成 Y_t を得る。

$$\frac{Y_t}{1+Y_t} = \frac{\{y_b/(1+Y_b)\}(1-\eta)}{1-\{Y_b/(1+Y_b)\}\eta} \quad \cdots(3.1.2.10)$$

$$\frac{Y_t}{1+Y_t} = \frac{Y_b(1-\eta)}{(1+Y_b)-Y_b\eta} \quad \cdots(3.1.2.11)$$

$$\frac{Y_t}{1+Y_t} = \frac{Y_b(1-\eta)}{1+Y_b(1-\eta)} \quad \cdots(3.1.2.12)$$

$$Y_t = \frac{Y_b(1-\eta)}{1+Y_b(1-\eta)}(1+Y_t) \quad \cdots(3.1.2.13)$$

$$\left[1 - \frac{Y_b(1-\eta)}{1+Y_b(1-\eta)}\right] Y_t = \frac{Y_b(1-\eta)}{1+Y_b(1-\eta)} \quad \cdots(3.1.2.14)$$

$$\left[\frac{\{1+Y_b(1-\eta)\}-Y_b(1-\eta)}{1+Y_b(1-\eta)}\right] Y_t = \frac{Y_b(1-\eta)}{1+Y_b(1-\eta)} \quad \cdots(3.1.2.15)$$

$$\boxed{Y_t = Y_b(1-\eta)} \quad \cdots(3.1.2.16)$$

3.1.3 中腹(溶質ガス)

中腹の溶質ガスのモル流速 $G_{MA}S$ [kmol/h]は、塔頂と塔底の算術平均で与えられる。

$$G_{MA}S = \frac{G_{MAt}S + G_{MAb}S}{2} \quad \dots(3.1.3.1)$$

$$G_{MA}S = \frac{G_{MTb}S y_b(1-\eta) + G_{MTb}S y_b}{2} \quad \dots(3.1.3.2)$$

$$G_{MA}S = \frac{G_{MTb}S y_b(2-\eta)}{2} \quad \dots(3.1.3.3)$$

$$G_{MA}S = G_{MTb}S y_b \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) \quad \dots(3.1.3.4)$$

中腹の溶質ガス組成 y [kmol-溶質/kmol-混合ガス]および Y [kmol-溶質/kmol-同伴ガス]は、それぞれ操作線の式で表される。

$$y = \frac{L_{MT}}{G_{MT}}(x - x_t) + y_t \quad \left[x = \frac{y^*}{m}, x_t = 0, y_t = \frac{y_b(1-\eta)}{1-y_b\eta} \right] \quad \dots(3.1.3.5)$$

$$Y = \frac{L_{MB}}{G_{MB}}(X - X_t) + Y_t \quad \left[X = \frac{X^*}{m}, X_t = 0, Y_t = Y_b(1-\eta) \right] \quad \dots(3.1.3.6)$$

3.2 同伴ガス

塔内の同伴ガスのモル流速 $G_{MB}S$ [kmol/h]は、次式で表される。

$$G_{MB}S = G_{MTb}S(1 - y_b) \quad \dots(3.2.1)$$

同伴ガスは、吸収液にほとんど溶解しないことから、そのモル流速は、塔内でほとんど変化しない。

3.3 混合ガス

3.3.1 塔底(混合ガス)

塔底の混合ガスのモル流速 $G_{MTb}S$ [kmol/h]は、設計条件として与えられる。なお、混合ガス流速が体積流量 G_V [m³/h]で与えられた場合のモル流速 $G_{MTb}S$ [kmol/h]は、次式で表される。

$$G_{MTb}S = \frac{G_V}{v_G} \quad \dots(3.3.1.1)$$

ただし、 G_{MTb} は塔底の混合ガスの塔断面積当たりのモル流速[kmol/(m²・h)]、 S は塔断面積[m²]、 v_G は温度 T_G [K]の気体 1 kmol が占める体積[m³/kmol]。

モル体積 v_G の計算について、標準状態(0°C, 1気圧)の気体 1 kmol が占める体積は 22.4 m³/kmol であることから、定圧条件下では、シャルルの法則($v_G = kT_G$)を用いて次式が成り立つ。

$$\frac{22.4}{273.15} = \frac{v_G}{T_G} \quad \dots(3.3.1.2)$$

$$v_G = 0.082006T_G \quad \dots(3.3.1.3)$$

混合ガス流速が質量流量 G_W [kg/h]で与えられた場合のモル流速 $G_{MTb}S$ [kmol/h]は、次式で表される。

$$\boxed{G_{MTb}S = \frac{G_w}{M_{GTb}}} \quad \cdots(3.3.1.4)$$

ただし、 M_{GTb} は塔底の混合ガスの平均モル質量[kg/kmol]であり、次式で表される。

$$M_{GTb} = M_A y_b + M_{GB}(1 - y_b) \quad \cdots(3.3.1.5)$$

ただし、 M_A は溶質のモル質量[kg/kmol]、 M_{GB} は同伴ガスのモル質量[kg/kmol]、 y_b は塔底の溶質ガス組成[-]。

3.3.2 塔頂(混合ガス)

塔頂の混合ガスのモル流速 $G_{MTt}S$ [kmol/h]は、塔頂の溶質ガス流速 $G_{MAt}S$ [kmol/h]と同伴ガス流速 $G_{MB}S$ [kmol/h]の和で表される。

$$G_{MAt}S = G_{MA}S + G_{MB}S \quad \cdots(3.3.2.1)$$

$$G_{MAt}S = G_{MTb}S y_b (1 - \eta) + G_{MTb}S (1 - y_b) \quad \cdots(3.3.2.2)$$

$$G_{MAt}S = G_{MTb}S y_b - G_{MTb}S y_b \eta + G_{MTb}S - G_{MTb}S y_b \quad \cdots(3.3.2.3)$$

$$\boxed{G_{MAt}S = G_{MTb}S (1 - y_b \eta)} \quad \cdots(3.3.2.4)$$

3.3.3 中腹(混合ガス)

中腹の混合ガスのモル流速 $G_{MT}S$ [kmol/h]は、中腹の溶質ガス流速 $G_{MA}S$ [kmol/h]と同伴ガス流速 $G_{MB}S$ [kmol/h]の和で表される。

$$G_{MT}S = G_{MA}S + G_{MB}S \quad \cdots(3.3.3.1)$$

$$G_{MT}S = G_{MTb}S y_b \left(1 - \frac{\eta}{2}\right) + G_{MTb}S (1 - y_b) \quad \cdots(3.3.3.2)$$

$$G_{MT}S = G_{MTb}S y_b \left(-\frac{\eta}{2}\right) + G_{MTb}S \quad \cdots(3.3.3.3)$$

$$\boxed{G_{MT}S = G_{MTb}S \left(1 - \frac{y_b \eta}{2}\right)} \quad \cdots(3.3.3.4)$$

4. 充填塔内の液流速および溶質組成

4. 1 溶質液

4.1.1 塔底(溶質液)

塔底の吸収液基準の溶質液組成 x_b [kmol-溶質/kmol-吸収液]は、塔底の混合ガス基準の溶質ガス組成 y_b [kmol-溶質/kmol-混合ガス]が既知であることから、操作線の式を用いて次式のように導かれる。

$$G_{MT}(y - y_t) = L_{MT}(x - x_t) \quad \cdots(4.1.1.1)$$

$$y_b - y_t = \frac{L_{MT}}{G_{MT}}(x_b - x_t) \quad \cdots(4.1.1.2)$$

$$\boxed{x_b = \frac{G_{MT}}{L_{MT}}(y_b - y_t) + x_t} \quad \cdots(4.1.1.3)$$

$$x_b = \frac{G_{MT}}{L_{MT}} \left[y_b - \frac{y_b(1-\eta)}{1-y_b\eta} \right] + 0 \quad \cdots(4.1.1.4)$$

$$x_b = \frac{G_{MT}}{L_{MT}} \left[\frac{y_b(1-y_b\eta) - y_b(1-\eta)}{1-y_b\eta} \right] \quad \cdots(4.1.1.5)$$

$$x_b = \frac{G_{MT}}{L_{MT}} \left[\frac{y_b - y_b^2\eta - y_b + y_b\eta}{1-y_b\eta} \right] \quad \cdots(4.1.1.6)$$

$$\boxed{x_b = \frac{G_{MT}}{L_{MT}} \left[\frac{y_b\eta(1-y_b)}{1-y_b\eta} \right]} \quad \cdots(4.1.1.7)$$

塔底の純溶媒基準の溶質液組成 X_b [kmol-溶質/kmol-純溶媒]についても、上と同様の手順で導かれる。

$$G_{MB} \left(\frac{y}{1-y} - \frac{y_t}{1-y_t} \right) = L_{MB} \left(\frac{x}{1-x} - \frac{x_t}{1-x_t} \right) \quad \cdots(4.1.1.8)$$

$$G_{MB}(Y - Y_t) = L_{MB}(X - X_t) \quad \cdots(4.1.1.9)$$

$$Y_b - Y_t = \frac{L_{MB}}{G_{MB}}(X_b - X_t) \quad \cdots(4.1.1.10)$$

$$\frac{G_{MB}}{L_{MB}}(Y_b - Y_t) = X_b - X_t \quad \cdots(4.1.1.11)$$

$$\boxed{X_b = \frac{G_{MB}}{L_{MB}}(Y_b - Y_t) + X_t} \quad \cdots(4.1.1.12)$$

$$X_b = \frac{G_{MB}}{L_{MB}} [Y_b - Y_b(1-\eta)] + 0 \quad \cdots(4.1.1.13)$$

$$\boxed{X_b = \frac{G_{MB}Y_b\eta}{L_{MB}}} \quad \cdots(4.1.1.14)$$

4.1.2 塔頂(溶質液)

塔底の溶質のモル流速 $L_{MA}S$ [kmol/h]は、原料の吸収液に溶質が含まれないことから、0となる。塔頂の溶質液組成 x_t [kmol-溶質/kmol-吸収液]および X_t [kmol-溶質/kmol-純溶媒]も同様である。

4.1.3 中腹(溶質液)

中腹の溶質のモル流速 $L_{MA}S$ [kmol/h]は、塔頂と塔底の算術平均で与えられる。

$$L_{MA}S = \frac{L_{MA}S + L_{MAb}S}{2} \quad \cdots(4.1.3.1)$$

塔底の溶質のモル流速 $L_{MAb}S$ [kmol/h]は、混合ガスに含まれる溶質の回収量に等しい。

$$L_{MAb}S = G_{MTb}S y_b \eta \quad \cdots(4.1.3.2)$$

ただし、 η は溶質の回収率[-]。

もとの式に代入すると、次式のようになる。

$$L_{MA}S = \frac{0 + G_{MTb}S y_b \eta}{2} \quad \cdots(4.1.3.3)$$

$$\boxed{L_{MA}S = G_{MTb}S y_b \left(\frac{\eta}{2}\right)} \quad \cdots(4.1.3.4)$$

中腹の溶質液組成 x [kmol-溶質/kmol-吸収液]および X [kmol-溶質/kmol-純溶媒]は、それぞれ操作線の式より導かれる。

$$\boxed{x = \frac{G_{MT}}{L_{MT}}(y - y_t) + x_t} \quad \left[y = mx^*, y_t = \frac{y_b(1-\eta)}{1-y_b\eta}, x_t = 0 \right] \quad \cdots(4.1.3.5)$$

$$\boxed{X = \frac{G_{MB}}{L_{MB}}(Y - Y_t) + X_t} \quad [Y = mX^*, Y_t = Y_b(1-\eta), X_t = 0] \quad \cdots(4.1.3.6)$$

4. 2 純溶媒

塔内の純溶媒のモル流速 $L_{MB}S$ [kmol/h]は、最小溶媒量($L_{MB}S$)_{min} の 1.25~2.0 倍程度に設定される。

$$L_{MB}S = \phi(L_{MB}S)_{\min} \quad (\phi=1.25\sim 2.0) \quad \cdots(4.2.1)$$

純溶媒のモル流速は、塔内でほとんど変化しない。

4. 3 吸収液

4.3.1 塔底(吸収液)

塔底の吸収液のモル流速 $L_{MTb}S$ [kmol/h]は、塔底の吸収液流速 $L_{MAb}S$ [kmol/h]と純溶媒流速 $L_{MB}S$ [kmol/h]の和で表される。

$$L_{MTb}S = L_{MAb}S + L_{MB}S \quad \cdots(4.3.1.1)$$

$$\boxed{L_{MTb}S = G_{MTb}S y_b \eta + L_{MB}S} \quad \cdots(4.3.1.2)$$

4.3.2 塔頂(吸収液)

塔頂の吸収液のモル流速 $L_{MTt}S$ [kmol/h]は、塔頂の吸収液流速 $L_{MAt}S$ [kmol/h]と純溶媒流速 $L_{MB}S$ [kmol/h]の和で表される。

$$L_{MTt}S = L_{MAt}S + L_{MB}S \quad \cdots(4.3.2.1)$$

$$L_{MTt}S = 0 + L_{MB}S \quad \cdots(4.3.2.2)$$

$$\boxed{L_{MTt}S = L_{MB}S} \quad \cdots(4.3.2.3)$$

4.3.3 中腹(吸収液)

中腹の吸収液のモル流速 $L_{MT}S$ [kmol/h]は、中腹の溶質流速 $L_{MA}S$ [kmol/h]と純溶媒流速 $L_{MB}S$ [kmol/h]の和で表される。

$$L_{MT}S = L_{MA}S + L_{MB}S \quad \cdots(4.3.3.1)$$

$$L_{MT}S = G_{MTb}S y_b \left(\frac{\eta}{2} \right) + L_{MB}S \quad \cdots(4.3.3.2)$$

5. 向流充填塔の物質収支

ガス側から液側への溶質の移動量と液側における溶質の吸収量が等しいと仮定するとき、塔頂と中腹における溶質の成分物質収支式は、次式で表される。

$$G_{MT}y + L_{MTt}x_t = G_{MTt}y_t + L_{MT}x \quad \cdots(5.1)$$

混合ガス(溶質ガスと同伴ガス)と吸収液(ガス側から来た溶質と純溶媒)の全モル速度 G_{MT} [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]および L_{MT} [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]は、それぞれ塔内で変化する。これは、ガス側の溶質が液側へ移動することでガス側の溶質量が減少し、液側の溶質量が増大するためである。すなわち、ガス側の溶質のモル速度 G_{MA} が減少することで全モル速度 G_{MT} が減少し、液側の溶質のモル速度 L_{MA} が増大することで全モル速度 L_{MT} が増大する。したがって、塔内で変化して取り扱いの難しい G_{MT} と L_{MT} を、塔内でほとんど変化しない同伴ガスのモル速度 G_{MB} [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]と純溶媒のモル速度 L_{MB} [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]で置き換える。

全ガスと全液のモル速度を1とするとき、塔の中腹におけるモル速度とモル比の関係は、次式となる。

$$(\text{全ガス } G_{MT}) : (\text{溶質 } G_{MA}) : (\text{同伴ガス } G_{MB}) = 1 : y : (1-y) \quad \cdots(5.2)$$

$$(\text{全液 } L_{MT}) : (\text{溶質 } L_{MA}) : (\text{純溶媒 } L_{MB}) = 1 : x : (1-x) \quad \cdots(5.3)$$

上式を比例配分することで、次式が導かれる。

$$G_{MT} = \frac{G_{MB}}{1-y} \quad \cdots(5.4)$$

$$L_{MT} = \frac{L_{MB}}{1-x} \quad \cdots(5.5)$$

同様にして、塔頂(t)における量論比より次式を得る。

$$G_{MTt} = \frac{G_{MB}}{1-y_t} \quad \cdots(5.6)$$

$$L_{MTt} = \frac{L_{MB}}{1-x_t} \quad \cdots(5.7)$$

上式をもとの成分物質収支式に代入すると、同伴ガスと純溶媒基準の成分物質収支式が導かれる。

$$G_{MB} \left(\frac{y}{1-y} - \frac{y_t}{1-y_t} \right) = L_{MB} \left(\frac{x}{1-x} - \frac{x_t}{1-x_t} \right) \quad \cdots(5.8)$$

上式は、次のように理解する。混合ガスを1 kmol とすると、溶質ガスは y [kmol -溶質]、同伴ガスは $(1-y)$ [kmol -同伴ガス]で表される。 $y/(1-y)$ の単位は、 $[\text{kmol}$ -溶質/ kmol -同伴ガス]となる。いま、同伴ガスの量が G_{MB} [kmol -同伴ガス/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]なので、 $G_{MB}y/(1-y)$ の単位は、 $[\text{kmol}$ -同伴ガス/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h})] \times [\text{kmol}$ -溶質/ kmol -同伴ガス] = $[\text{kmol}$ -溶質/ $(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]となる。したがって、収支式の左辺全体は、塔の中腹(濃い)から塔頂(薄い)までに溶質が液側へ移動する量(吸収される量)を表している。右辺全体も同じ考え方にしたと、ガス側から溶質が移動してくる分だけ等しく液側で吸収される量(吸収する量)、という意味になる。

希薄溶液の場合($x, y \ll 1$)、 $1-x \doteq 1$, $1-x_t \doteq 1$, $1-y \doteq 1$, $1-y_t \doteq 1$ が成り立つ。さらに、 $G_{MB} \doteq G_{MT}$ 、 $L_{MB} \doteq$

L_{MT} が成り立つ。このとき、成分物質収支式は、次式で表される。

$$\boxed{G_{MT}(y-y_t) = L_{MT}(x-x_t)} \quad (\text{希薄条件}) \quad \dots(5.9)$$

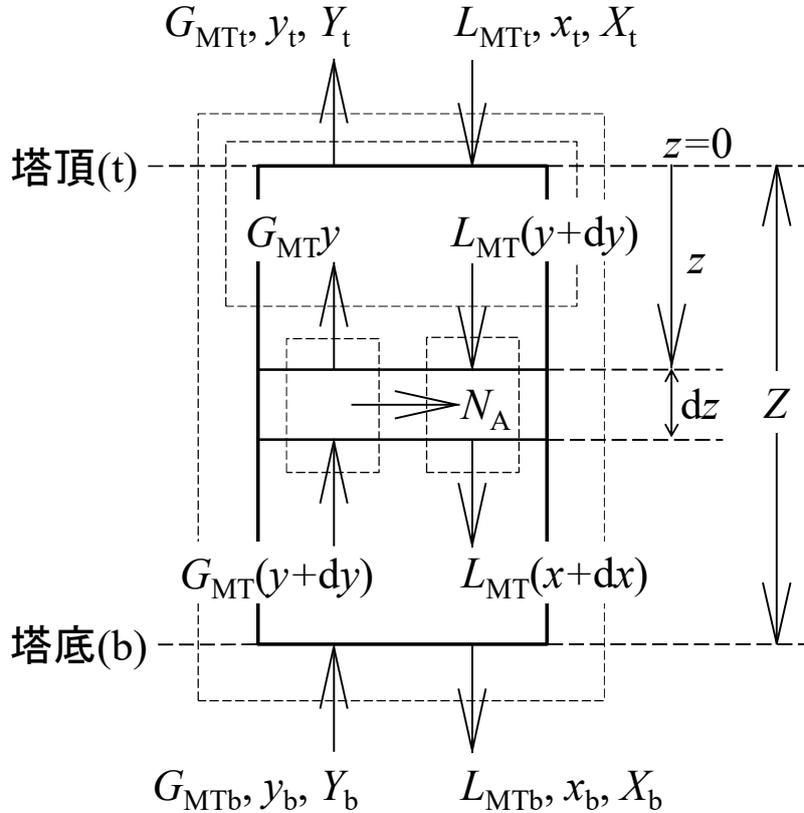


図 5.1 向流充填塔の物質収支

表 5.1 充填塔内のモル流速と溶質組成

流体相	モル流速またはモル分率	塔頂(top)	中腹	塔底(bottom)
混合ガス (溶質+同伴ガス)	溶質ガスのモル流速 G_{MA} [kmol/(m ² ·h)]	G_{MA} $G_{MTb}y_b(1-\eta)$	G_{MA} $(G_{MA}+G_{MAB})/2$ $G_{MTb}y_b(1-0.5\eta)$	G_{MAB} $G_{MTb}y_b$
	同伴ガスのモル流速 G_{MB} [kmol/(m ² ·h)]		G_{MB} $G_{MTb}(1-y_b)$	
	混合ガスのモル流速 G_{MT} [kmol/(m ² ·h)]	G_{MT} $G_{MA}+G_{MB}$ $G_{MTb}(1-y_b\eta)$	G_{MT} $G_{MA}+G_{MB}$ $G_{MTb}(1-0.5y_b\eta)$	G_{MTb} (設定値)
	混合ガス基準の溶質のモル分率 y [kmol-溶質/kmol-混合ガス]	y_t $G_{MA}/(G_{MA}+G_{MB})$ $y_b(1-\eta)/(1-y_b\eta)$	y 操作線 $y=f(x)$	y_b (設定値)
	同伴ガス基準の溶質のモル分率 Y [kmol-溶質/kmol-同伴ガス]	Y_t G_{MA}/G_{MB} $Y_b(1-\eta)$	Y 操作線 $Y=f(X)$	Y_b $y_b/(1-y_b)$
吸収液 (溶質+純溶媒)	溶質液のモル流速 L_{MA} [kmol/(m ² ·h)]	L_{MA} 0	L_{MA} $(L_{MA}+L_{MAB})/2$ $G_{MTb}y_b\eta/2$	L_{MAB} $G_{MTb}y_b\eta$
	純溶媒のモル流速 L_{MB} [kmol/(m ² ·h)]		L_{MB} $\phi(L_{MB})_{min}$ ($\phi=1.25\sim 2.0$)	
	吸収液のモル流速 L_{MT} [kmol/(m ² ·h)]	L_{MT} $L_{MA}+L_{MB}$ $\phi(L_{MB})_{min}$	L_{MT} $L_{MA}+L_{MB}$ $(G_{MTb}y_b\eta/2)+\phi(L_{MB})_{min}$	L_{MTb} $L_{MAB}+L_{MB}$ $G_{MTb}y_b\eta+\phi(L_{MB})_{min}$
	吸収液基準の溶質のモル分率 x [kmol-溶質/kmol-吸収液]	x_t 0	x 操作線 $x=f^{-1}(y)$	x_b 操作線 $x_b=f^{-1}(y_b)$ $(G_{MT}/L_{MT})[y_b\eta(1-y_b)/(1-y_b\eta)]$

	純溶媒基準の溶質のモル分率 X [kmol-溶質/kmol-純溶媒]	X_t 0	X 操作線 $X=f^{-1}(Y)$	X_b 操作線 $X_b=f^{-1}(Y_b)$ $(G_{MB}/L_{MB})Y_b/\eta$
--	---	------------	--------------------------	---

η : 溶質の回収率[-](設定値)、(下付文字)A=溶質、B=同伴ガスまたは純溶媒、M=物質、T=混合ガスまたは吸収液、b=塔底、t=塔頂

6. 操作線

同伴ガスと純溶媒基準の成分物質収支式より操作線の式が導かれる。

$$G_{MB}(Y - Y_t) = L_{MB}(X - X_t) \quad \left[\frac{y}{1-y} \equiv Y, \frac{y_t}{1-y_t} \equiv Y_t, \frac{x}{1-x} \equiv X, \frac{x_t}{1-x_t} \equiv X_t \right] \quad \cdots(6.1)$$

$$Y = \left(\frac{L_{MB}}{G_{MB}} \right) (X - X_t) + Y_t \quad \cdots(6.2)$$

$$y = \left(\frac{L_{MT}}{G_{MT}} \right) (x - x_t) + y_t \quad (\text{希薄条件}) \quad \cdots(6.3)$$

ただし、 G_{MT} は混合ガスのモル流速[kmol/(m²·h)]、 L_{MT} は吸収液のモル流速[kmol/(m²·h)]。

操作線は、塔内の任意の高さ位置($z=z$)におけるガス側と液側の溶質組成(X, Y)あるいは(x, y)を表す。すなわち、塔内の任意の高さ位置で測定された溶質組成データは、収支が正確に取れていれば、ちょうど操作線上にプロットされる。操作線は、塔の高さ方向の溶質組成分布を表す式であり、塔頂のガスおよび液組成(t)と液ガス比が決まれば、吸収除去された溶質量に相当する塔底の液組成(b)を見積もることができる。液ガス比を図上で変化させると、塔底の液組成(b)も種々変化するので、それを見ながら塔の運転条件としての液ガス比を図解法で検討することができる。工学的には、最小液ガス比の1.25~2.0倍程度に設定される。液ガス比が決まると、ガス流量は既知の操作量なので、塔頂ガスの溶質濃度を目標値まで下げるのに必要となる吸収液量を見積もることができる。

7. 最小溶媒量

操作線と平衡線の間の距離は、物質移動の推進力に相当する。操作線が平衡線と交わると、推進力は零となり、分離不能となる。すなわち、分離に必要な塔高は無限大となる。このときの液ガス比を**最小液ガス比**といい、次式で表される。

$$\left(\frac{L_{MB}}{G_{MB}} \right)_{\min} = \frac{Y_b - Y_t}{X_b^* - X_t} \quad \cdots(7.1)$$

$$\left(\frac{L_{MT}}{G_{MT}} \right)_{\min} = \frac{y_b - y_t}{x_b^* - x_t} \quad (\text{希薄条件}) \quad \cdots(7.2)$$

ただし、 X_b^* と x_b^* は塔底における溶質ガス組成 Y_b と y_b に対する液側の平衡組成[-]であり、平衡線の式より求める。

最小溶媒量 $(L_{MB}S)_{\min}$ あるいは $(L_{MT}S)_{\min}$ [kmol/h]は、次式で与えられる。

$$(L_{MB}S)_{\min} = (L_{MB}/G_{MB})_{\min} (G_{MB}S) \quad \cdots(7.3)$$

$$\boxed{(L_{MT}S)_{\min} = (L_{MT}/G_{MT})_{\min}(G_{MT}S)} \quad (\text{希薄条件}) \quad \dots(7.4)$$

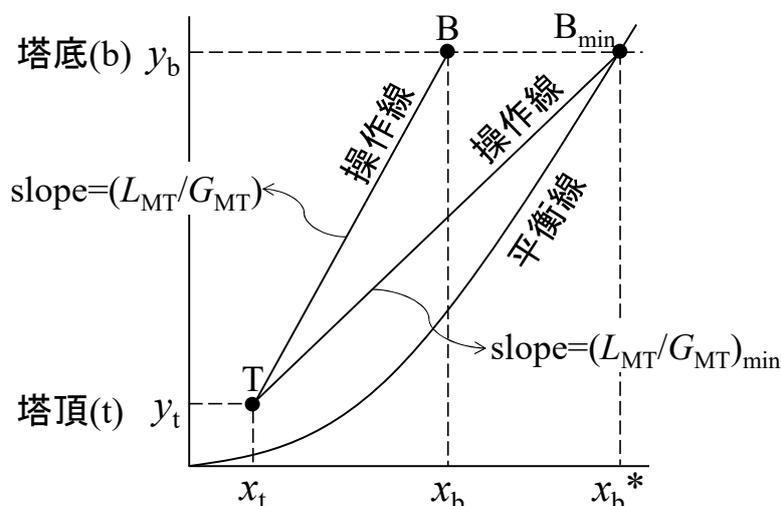


図 7.1 操作線と最小液ガス比

(希薄条件でない場合は、 x と y を X と Y に、 L_{MT}/G_{MT} を L_{MB}/G_{MB} に変更する。)

8. フラッシング速度

向流充填塔において、液流速を一定に保ち、ガス流速を増加させてゆくと、充填層高当たりのガスの圧力損失は、ガス流速の約2乗に比例して増加する。ガス流速がある値を越えると、塔内の液滞留量(液ホールドアップ)が次第に増加してガスの流路が狭くなるため、ガスの圧力損失が急激に増大するようになる。この状態をローディングと呼び、そのときのガス流速をローディング速度という。さらにガス流速がローディング速度よりも増大してある値に達すると、液がガスに持ち上げられて塔内を流下できなくなる。この状態をフラッシング(溢注、いつおう)と呼び、フラッシングが開始されるガス流速をフラッシング速度という。実際のガス流速 G [kg/(m²・s)]は、フラッシング速度 G_F [kg/(m²・s)]の50~70%程度、あるいはローディング速度の90%程度を採用する。

フラッシング速度 G_F の推算法については、多くの報告例がある。ここでは、汎用性の高い Eckert (エッカート) 線図を用いる。(代入する値の単位に注意。) **[文献4]**

$$\text{縦軸: } \frac{G_F^2 F_p}{\rho_G \rho_L g} \left(\frac{\rho_w}{\rho_L} \right) \mu_L^{0.2} \quad \dots(8.1)$$

$$\text{横軸: } \frac{L}{G} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \quad (\text{フローパラメーター}) \quad \dots(8.2)$$

ただし、 F_g は充填物因子[1/ft]、 G_F はフラッシング速度[lb/(ft²・h)]、 g は重力加速度[ft/h²]、 L は中腹における吸収液の全質量流速[lb/(ft²・h)]、 G は中腹における混合ガスの全質量流速[lb/(ft²・h)]、 ρ_G はガス密度[lb/ft³]、 ρ_L は吸収液密度[lb/ft³]、 ρ_w は水の密度[lb/ft³]、 μ_L は吸収液粘度[cP]。

全モル流速 $L_{MT}S$ と $G_{MT}S$ を全質量流速 LS と GS に変換する際は、吸収液または混合ガスの平均モル質量 M_{LT} [kg/kmol] と M_{GT} [kg/kmol] を用いる。

$$M_{LT} = M_A x_{av} + M_{LB}(1 - x_{av}) \quad \left[x_{av} \equiv \frac{x_t + x_b}{2} \right] \quad \cdots(8.3)$$

$$M_{GT} = M_A y_{av} + M_{GB}(1 - y_{av}) \quad \left[y_{av} \equiv \frac{y_t + y_b}{2} \right] \quad \cdots(8.4)$$

ただし、 M_A は溶質の分子量、 M_{GB} は同伴ガスの分子量、 M_{LB} は純溶媒の分子量。

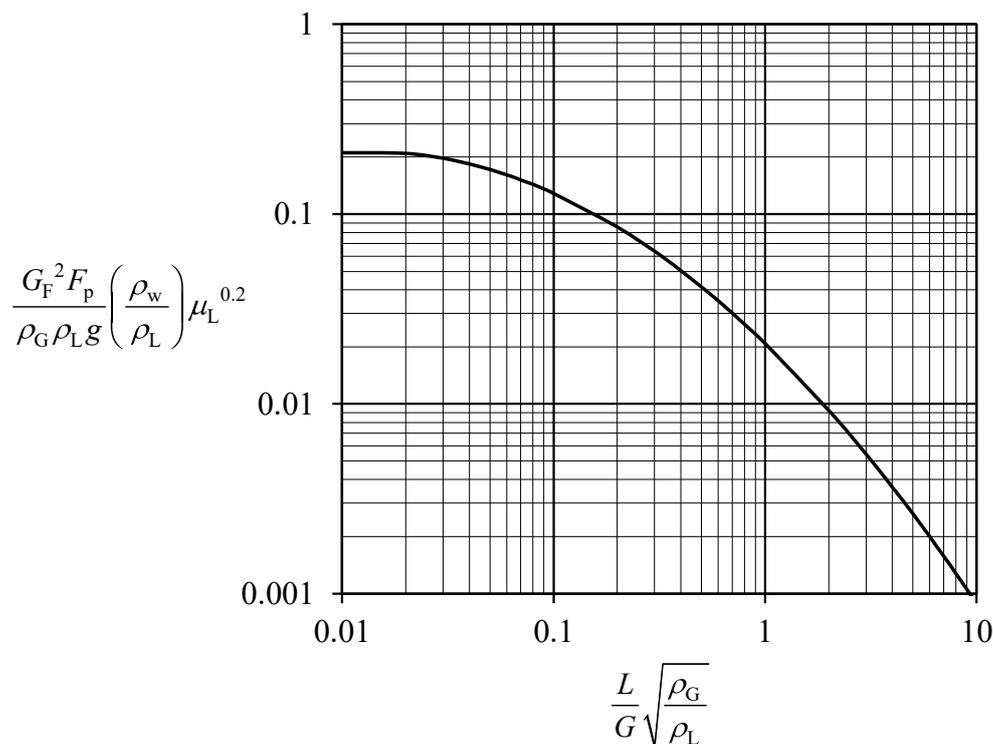


図 8.1 Eckert 線図(1970 年度版のフラッディング曲線のみを記載) [文献 4]

[文献 5] S. Piche et al., *Ind. Eng. Chem. Res.* **40** (2001) 476-487 に記載の相関式をもとに近似曲線を描いた

- ①フローパラメーター(横軸の値)を求める。
- ②縦軸の値を読みとる。
- ③縦軸の式に含まれる G_F を求める。計算値の単位は、 $[\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})]$ で与えられる。

9. 塔径

フラッディング速度あるいはローディング速度をもとに決定された質量基準のガス流速 G [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] を用いると、塔断面積 S [m^2] は、次式のように導かれる。

$$\frac{GS}{\rho_G} = G_v \quad \cdots(9.1)$$

$$\boxed{S = \frac{\rho_G G_v}{G}} \quad \cdots(9.2)$$

ただし、 G_V は混合ガスの体積流量[m³/s]、 S は塔断面積[m²]、 ρ_G はガス密度[kg/m³]。塔径 D_T [m]は、塔断面積 S [m²]を用いて次式で表される。

$$D_T = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad \dots(9.3)$$

10. 液ホールドアップ

塔内に滞留する液量を液ホールドアップといい、充填層体積に対する液体積の比[m³-液/m³-充填層]で定義される。液ホールドアップには、塔内の全液量に相当する全ホールドアップ h_t [-]、操作時に塔内を流下する液量に相当する動的ホールドアップ h_d [-]、静止時に充填物表面や充填物間の間隙に存在する静的ホールドアップ h_s [-]があり、次の関係式が成り立つ。

$$h_t = h_d + h_s \quad \dots(9.1)$$

吸収液が水の場合は、ローディング点以下において、Shulman らの実験式がある。[文献 6]

$$h_t = \alpha(L/4.88)^\beta D_{ps}^{-2} \quad [\beta = \gamma D_{ps}^\theta] \quad \dots(9.2)$$

$$h_s = \delta D_{ps}^{-\lambda} \quad \dots(9.3)$$

ただし、 L は塔断面積当たりの吸収液流速[kg/(m²・h)]、 D_{ps} は充填物と表面積の等しい球の相当径[cm]、 α 、 β 、 γ 、 θ 、 δ 、 λ は定数。

表 10.1 h_t および h_s 式における定数[文献 7]

充填物	α	γ	θ	δ	λ
ラシヒリング (炭素鋼製)	0.0734	0.195	0.376	0.156	1.21
ラシヒリング (磁製)	0.0209	0.267	0.376	0.065	1.21
ベルルサドル (磁製)	0.0232	0.267	0.376	0.066	1.56

表 10.2 充填物の球相当径 D_{ps} [文献 7]

充填物	称呼寸法	D_{ps} [cm]
ラシヒリング (磁製)	1/2 in	1.77
	1 in	3.56
	1 1/2 in	5.30
	2 in	7.25
ベルルサドル (磁製)	1/2 in	1.62
	1 in	3.20
	1 1/2 in	4.72

11. 塔高

11.1 充填塔内の微小収支

塔の中腹における任意の微小区間 $z \sim z+dz$ における混合ガスおよび吸収液中の溶質の物質収支は、溶質

のガス吸収速度 N_A [mol/(m²·s)]を用いてそれぞれ次式で表される。(物質収支図を参照の事。)

$$S(G_{MT}y)_{z=z+dz} = S(G_{MT}y)_{z=z} + N_A dA \quad \cdots(11.1.1)$$

$$S(L_{MT}y)_{z=z+dz} = S(L_{MT}y)_{z=z} + N_A dA \quad \cdots(11.1.2)$$

$$dA = aSdz \quad \cdots(11.1.3)$$

ただし、 a は充填層体積当たりの気液接触界面積[m²/m³]、 A は気液接触界面積[m²]、 S は塔の断面積[m²]。上式において、全モル速度基準(G_{MT} , L_{MT})は塔の高さ方向で変化することから、同伴ガスおよび純溶媒基準(G_{MB} , L_{MB})に変換して定数化する。上式に G_{MT} と L_{MT} の式を代入して dA の式を用いると、次式のようなになる。

$$SG_{MB} \left(\frac{y}{1-y} \right)_{z=z+dz} = SG_{MB} \left(\frac{y}{1-y} \right)_{z=z} + N_A aSdz \quad \cdots(11.1.4)$$

$$SL_{MB} \left(\frac{x}{1-x} \right)_{z=z+dz} = SL_{MB} \left(\frac{x}{1-x} \right)_{z=z} + N_A aSdz \quad \cdots(11.1.5)$$

ここで、導関数の定義式は、次式で与えられる。

$$\frac{df}{dz} = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z+\Delta z) - f(z)}{(z+\Delta z) - z} \left[= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{f(z)_{z=z+\Delta z} - f(z)_{z=z}}{(z+\Delta z) - z} \right] \quad \cdots(11.1.6)$$

上式で $f(z)=y(z)/\{1-y(z)\}$ とおくと、 SG_{MB} の式は次式のようなになる。

$$G_{MB} \frac{(y/1-y)_{z=z+dz} - (y/1-y)_{z=z}}{dz} = N_A a \quad \cdots(11.1.7)$$

$$G_{MB} \frac{d}{dz} \left(\frac{y}{1-y} \right) = N_A a \quad \cdots(11.1.8)$$

$$\boxed{G_{MB} d \left(\frac{y}{1-y} \right) = N_A a dz} \quad \cdots(11.1.9)$$

SL_{MB} の式についても同様にして、次式が導かれる。

$$\boxed{L_{MB} d \left(\frac{x}{1-x} \right) = N_A a dz} \quad \cdots(11.1.10)$$

希薄溶液の場合($x, y \ll 1$)、 $1-x \doteq 1$, $1-y \doteq 1$, $G_{MB} \doteq G_{MT}$, $L_{MB} \doteq L_{MT}$ が成り立つ。

$$\boxed{G_{MT} dy = N_A a dz} \quad \cdots(11.1.11)$$

$$\boxed{L_{MT} dx = N_A a dz} \quad \cdots(11.1.12)$$

1 1. 2 ガス側基準の場合

ガス側基準の境膜物質移動速度は、次式で表される。

$$N_A = k_G P_T (y - y_i) = k_y (y - y_i) \quad \cdots(11.2.1)$$

$G_{MT} dy$ の式に代入して N_A を消去し、塔底から塔頂まで積分すると、ガス側境膜基準の塔高 Z [m]を得る。

$$G_{MT} dy = k_G P_T (y - y_i) a dz = k_y (y - y_i) a dz \quad \cdots(11.2.2)$$

$$Z = \frac{G_{MT}}{k_G a P_T} \int_{y_i}^{y_b} \frac{dy}{y - y_i} = \frac{G_{MT}}{k_y a} \int_{y_i}^{y_b} \frac{dy}{y - y_i} \quad \cdots(11.2.3)$$

$$\boxed{Z = H_G N_G} \left[H_G \equiv \frac{G_{MT}}{k_G a P_T} \text{ あるいは } \frac{G_{MT}}{k_y a}, N_G \equiv \int_{y_i}^{y_b} \frac{dy}{y - y_i} \right] \quad \cdots(11.2.4)$$

ただし、 H_G はガス側基準の境膜移動単位高さ[m](ガス側境膜 HTU)、 N_G はガス側基準の境膜移動単位数[-](ガス側境膜 NTU)、 $k_G a$ はガス側基準の境膜容量係数[mol/(m³・s・Pa)]。

ガス側基準の総括物質移動速度は、次式で表される。

$$N_A = K_G(p - p^*) = K_G P_T(y - y^*) = K_y(y - y^*) \left[\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}, \frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} \right] \quad \cdots(11.2.5)$$

ただし、 p と y において、溶質成分を表す下付き文字 A は省略した。

$G_{MT} dy$ の式に代入して N_A を消去し、塔底から塔頂まで積分すると、ガス側総括基準の塔高 Z [m]を得る。

$$G_{MT} dy = K_G P_T(y - y^*) adz = K_y(y - y^*) adz \quad \cdots(11.2.6)$$

$$Z = \frac{G_{MT}}{K_G a P_T} \int_{y_i}^{y_b} \frac{dy}{y - y^*} = \frac{G_{MT}}{K_y a} \int_{y_i}^{y_b} \frac{dy}{y - y^*} \quad \cdots(11.2.7)$$

$$\boxed{Z = H_{OG} N_{OG}} \left[H_{OG} \equiv \frac{G_{MT}}{K_G a P_T} \text{ あるいは } \frac{G_{MT}}{K_y a}, N_{OG} \equiv \int_{y_i}^{y_b} \frac{dy}{y - y^*} \right] \quad \cdots(11.2.8)$$

$$\frac{1}{K_G a} = \frac{1}{k_G a} + \frac{H}{k_L a} \quad \cdots(11.2.9)$$

$$\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{k_y a} + \frac{m}{k_x a} \quad \cdots(11.2.10)$$

ただし、 H_{OG} はガス側基準の総括移動単位高さ[m](ガス側総括 HTU)、 N_{OG} はガス側基準の総括移動単位数[-](ガス側総括 NTU)、 $K_G a$ はガス側基準の総括容量係数[mol/(m³・s・Pa)]。

1 1 . 3 液側基準の場合

液側基準の境膜物質移動速度は、次式で表される。

$$N_A = k_L C_T(x_i - x) = k_x(x_i - x) \quad \cdots(11.3.1)$$

$L_{MT} dx$ の式に代入して N_A を消去し、塔底から塔頂まで積分すると、液側境膜基準の塔高 Z [m]を得る。

$$L_{MT} dx = k_L C_T(x_i - x) adz = k_x(x_i - x) adz \quad \cdots(11.3.2)$$

$$Z = \frac{L_{MT}}{k_L a C_T} \int_{x_i}^{x_b} \frac{dx}{x_i - x} = \frac{L_{MT}}{k_x a} \int_{x_i}^{x_b} \frac{dx}{x_i - x} \quad \cdots(11.3.3)$$

$$\boxed{Z = H_L N_L} \left[H_L \equiv \frac{L_{MT}}{k_L a C_T} \text{ あるいは } \frac{L_{MT}}{k_x a}, N_L \equiv \int_{x_i}^{x_b} \frac{dx}{x_i - x} \right] \quad \cdots(11.3.4)$$

ただし、 H_L は液側基準の境膜移動単位高さ[m](液側境膜 HTU)、 N_L は液側基準の境膜移動単位数[-](液

側境膜 NTU)。

液側基準の総括物質移動速度は、次式で表される。

$$N_A = K_L(C^* - C) = K_L C_T(x^* - x) = K_x(x^* - x) \left[\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G}, \frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{mk_y} \right] \quad \cdots(11.3.5)$$

ただし、 C と x において、溶質成分を表す下付き文字 A は省略した。

$L_{MT}dx$ の式に代入して N_A を消去し、塔底から塔頂まで積分すると、液側総括基準の塔高 Z [m] を得る。

$$L_{MT}dx = K_L C_T(x^* - x)dz = K_x(x^* - x)dz \quad \cdots(11.3.6)$$

$$Z = \frac{L_{MT}}{K_L a C_T} \int_{x_1}^{x_b} \frac{dx}{x^* - x} = \frac{L_{MT}}{K_x a} \int_{x_1}^{x_b} \frac{dx}{x^* - x} \quad \cdots(11.3.7)$$

$$\boxed{Z = H_{OL} N_{OL}} \left[H_{OL} \equiv \frac{L_{MT}}{K_L a C_T} \text{ あるいは } \frac{L_{MT}}{K_x a}, N_{OL} \equiv \int_{x_1}^{x_b} \frac{dx}{x^* - x} \right] \quad \cdots(11.3.8)$$

$$\frac{1}{K_L a} = \frac{1}{k_L a} + \frac{1}{Hk_G a} \quad \cdots(11.3.9)$$

$$\frac{1}{K_x a} = \frac{1}{k_x a} + \frac{1}{mk_y a} \quad \cdots(11.3.10)$$

ただし、 H_{OL} は液側基準の総括移動単位高さ[m](液側総括 HTU)、 N_{OL} は液側基準の総括移動単位数[-](液側総括 NTU)、 $K_L a$ は液側基準の総括容量係数[1/h]。

上式で与えられる塔高 Z は、厳密には充填層の高さを表すことに留意する。

12. HTUとNTU

12.1 総括HTU

ガス側総括 HTU(H_{OG})は、容量係数基準のガス側総括抵抗式より導かれる。

$$\frac{1}{K_G a} = \frac{1}{k_G a} + \frac{H}{k_L a} \quad \cdots(12.1.1)$$

$$\frac{G_{MT}}{K_G a P_T} = \frac{G_{MT}}{k_G a P_T} + \frac{HG_{MT}}{k_L a P_T} \quad \cdots(12.1.2)$$

$$\boxed{H_{OG} = H_G + \frac{mG_{MT}}{L_{MT}} H_L} \quad \cdots(12.1.3)$$

液側総括 HTU(H_{OL})は、容量係数基準の液側総括抵抗式より導かれる。

$$\frac{1}{K_L a} = \frac{1}{k_L a} + \frac{1}{Hk_G a} \quad \cdots(12.1.4)$$

$$\frac{L_{MT}}{K_L a C_T} = \frac{L_{MT}}{k_L a C_T} + \frac{L_{MT}}{Hk_G a C_T} \quad \cdots(12.1.5)$$

$$\boxed{H_{OL} = H_L + \frac{L_{MT}}{mG_{MT}} H_G} \quad \cdots(12.1.6)$$

11.2 境膜HTU

①物質移動式に基づく計算法 ガス側境膜 HTU(H_G)と液側境膜 HTU(H_L)は、恩田の式などの推算式より求められる容量係数 $k_G a$ と $k_L a$ をもとに、次式で計算することができる。

$$H_G = \frac{G_{MT}}{k_G a P_T} \quad \cdots(12.2.1)$$

$$H_L = \frac{L_{MT}}{k_L a C_T} \quad \cdots(12.2.2)$$

ただし、 C_T は吸収液の全モル濃度[mol/m³]、 P_T はガスの全圧[Pa]。

②推算式に基づく計算法 ガス側境膜 HTU(H_G)の推算式として Fellingner (フェリンジャー)の式[文献9]、液側境膜 HTU(H_L)の推算式として Sherwood-Holloway (シャーウッド・ハロウェイ)の式[文献10]がある。

$$\text{(Fellingner の式)} \quad H_G = c \left(\frac{G^m}{L^n} \right) Sc_G^{2/3} \quad \left[Sc_G \equiv \frac{\mu_G}{\rho_G \mathcal{D}_G} \right] \quad \cdots(12.2.3)$$

$$\text{(Sherwood-Holloway の式)} \quad H_L = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{L}{\mu} \right)^n Sc_L^{1/2} \quad \left[Sc_L \equiv \frac{\mu_L}{\rho_L \mathcal{D}_L} \right] \quad \cdots(12.2.4)$$

ただし、 G は混合ガスの質量速度[kg/(m²·s)]、 L は吸収液の質量速度[kg/(m²·s)]、 Sc はシュミット数[-]、 μ は粘度[Pa·s]、 ρ は密度[kg/m³]、 \mathcal{D} は拡散係数[m²/s]、 c, m, n, α は定数、下付き文字の G はガス、 L は液。

表 12.2.1 Fellingner 式の定数[文献11]

充填物	称呼寸法	c	m	n	G [kg/(m ² ·s)]	L [kg/(m ² ·s)]
ラシヒリング	3/8 in	0.722	0.45	0.47	0.28~0.69	0.69~2.10
	1/2 in	1.04	0.43	0.60	0.28~0.69	0.69~2.10
	1 in	0.648	0.32	0.51	0.28~0.83	0.69~6.30
	1(1/2) in	0.968	0.38	0.66	0.28~0.97	0.69~2.10
	1(1/2) in	0.803	0.38	0.40	0.28~0.97	2.10~6.30
	2 in	1.04	0.41	0.45	0.28~1.10	0.69~6.30
ベルルサドル	1/2 in	0.629	0.30	0.74	0.28~0.97	0.69~2.10
	1/2 in	0.428	0.30	0.24	0.28~0.97	2.10~6.30
	1 in	0.537	0.36	0.40	0.28~1.10	0.69~6.30
	1(1/2) in	0.759	0.32	0.45	0.28~1.40	0.69~6.30

表 12.2.2 Sherwood-Holloway 式の定数[文献12]

充填物	称呼寸法	α	n	充填物	称呼寸法	α	n	
ラシヒリング	3/8 in	3100	0.46	ベルルサドル	1/2 in	690	0.28	
	1/2 in	1400	0.35		1 in	780	0.28	
	1 in	430	0.22		1 1/2 in	730	0.28	
	1 1/2 in	380	0.22					
	2 in	340	0.22					

気相拡散係数 \mathcal{D}_G [cm²/s]の推算については、Gilliland(ギリランド)の式が簡便である。[文献13]

$$\mathcal{D}_G = \frac{0.0043T^{1.5} \sqrt{(1/M_A) + (1/M_B)}}{P(V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \quad \cdots(12.2.5) \quad (\text{計算結果の単位は、[cm}^2/\text{s]で与えられる。})$$

ただし、 M は分子量、 P は圧力[atm]、 T は絶対温度[K]、 V は分子容[cm³/mol]、下付き記号 A は溶質ガス、B は同伴ガス。分子容 V_A と V_B の算出には、下表の原子容を用いる。(原子容の和が分子容になる。) 液相拡散係数 \mathcal{D}_L [cm²/s] の推算については、Wilke & Chang (ウイルケーチャン) の式がある。[文献 14]

$$\mathcal{D}_L = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\gamma M)^{1/2} T}{\mu V_m^{0.6}} \quad \dots(12.2.6) \quad (\text{計算結果の単位は、[cm}^2\text{/s]で与えられる。})$$

ただし、 M は溶媒のモル質量[g/mol]、 T は絶対温度[K]、 γ は溶媒の会合度(水溶媒 2.6、メタノール 1.9、エタノール 1.5、ベンゼンその他非会合性溶媒 1.0)、 μ は溶媒粘度[cP]、 V_m は大気圧下の沸点における溶質の分子容[cm³/mol]。分子容 V_m の算出には、下表の原子容を用いる。(原子容の和が分子容になる。)

表 12.2.3 分子容算出のための原子容 [文献 15]

元素等	原子容[cm ³ /mol]
C	14.8
H(化合物)	3.7
H(H ₂ 分子)	7.15
O(二重結合)	7.4
O(アルデヒド、ケトン)	7.4
O(メチルエステル)	9.1
O(エチルエステル)	9.9
O(高級エステル、エーテル)	11.0
O(アルコール、カルボン酸)	12.0
N	15.6
N(第一級アミン-NH ₂)	10.5
N(第二級アミン-NH)	12.0
N(第三級アミン-N-)	14.8
空気	29.9

12.3 総括NTU

総括 NTU(N_{OG} , N_{OL})を求めるには、溶質ガスの平衡組成 y^* を求める必要がある。たとえば、ガス側総括 NTU(N_{OG})は、次のようにして求める。操作線上における塔頂から塔底までの液組成 $x_1 \sim x_b$ を適当な刻み幅で複数に分割する。各液組成 x に対応する溶質ガス組成 y を操作線の式より、平衡ガス組成 y^* を平衡線の式より求める。このとき、操作線上の y と平衡線上の y^* の差($y-y^*$)がガス側基準の総括吸収推進力となる。この逆数 $1/(y-y^*)$ を区画ごとに求め、 $1/(y-y^*)$ 対 y の折れ線グラフを作成する。さらに、各プロットから x 軸に向かって垂線を下ろすと、分割された区画が台形で表されることが分かる。各台形の面積は、溶質ガス組成 $y_k \sim y_{k+1}$ 間における物質移動のしにくさを表しており、工学的には塔高として反映される。塔頂から塔底までの組成範囲 $y_1 \sim y_b$ で台形面積の和を図上で求めると(図積分という)、それがガス側総括 NTU(N_{OG})となる。一方、液側総括 NTU(N_{OL})を求める場合は、操作線上における塔頂から塔底までのガス組成 $y_1 \sim y_b$ を適当な刻み幅で複数に分割して $1/(x-x^*)$ 対 x のグラフを作成し、図積分を行えばよい。操作線上の x と平衡線上の x^* の差($x-x^*$)が液側基準の総括吸収推進力となる。

なお、平衡線と操作線がともに直線の場合は、図積分の代わりに吸収推進力の対数平均 $(y-y^*)_{lm}$ あるいは $(x-x^*)_{lm}$ を用いて、解析的に求めることができる。

$$N_{OG} \equiv \int_{y_t}^{y_b} \frac{dy}{y-y^*} = \frac{y_b - y_t}{(y-y^*)_{lm}} \left[(y-y^*)_{lm} \equiv \frac{(y_b - y_b^*) - (y_t - y_t^*)}{\ln\{(y_b - y_b^*)/(y_t - y_t^*)\}} \right] \quad \dots(12.3.1)$$

$$N_{OL} \equiv \int_{x_t}^{x_b} \frac{dx}{x-x^*} = \frac{x_b - x_t}{(x-x^*)_{lm}} \left[(x-x^*)_{lm} \equiv \frac{(x_b - x_b^*) - (x_t - x_t^*)}{\ln\{(x_b - x_b^*)/(x_t - x_t^*)\}} \right] \quad \dots(12.3.2)$$

表 12.3.1 ガス側総括NTU(N_{OG})の解析例

x	y	y^*	$1/(y-y^*)$	台形面積
(x_t)0.000	(y_t)0.0020366	(y_t^*)0	491.01	
(x_2)0.001	(y_2)0.0058138	(y_2^*)0.00210	269.26	(S_1)1.4358
(x_3)0.002	(y_3)0.0095910	(y_3^*)0.00420	185.49	(S_2)0.85886
(x_4)0.003	(y_4)0.013368	(y_4^*)0.00630	141.47	(S_3)0.61752
(x_5)0.004	(y_5)0.017145	(y_5^*)0.00840	114.34	(S_4)0.48315
(x_b)0.0047557	(y_b)0.02	(y_b^*)0.00998	99.871	(S_5)0.30573
(Henry 定数 $m=2.1$)				(ΣS)3.7010

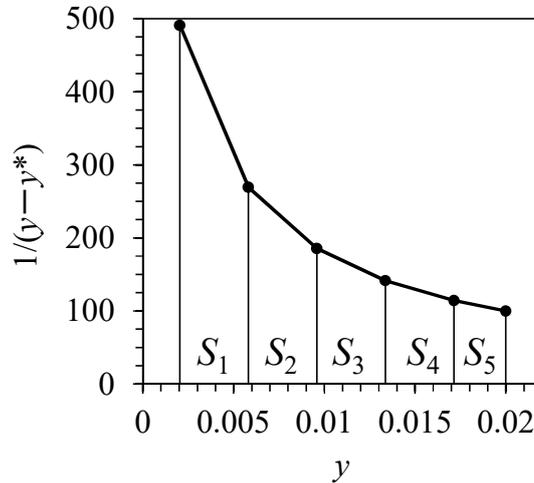


図 12.3.1 ガス側総括NTU(N_{OG})の解析例(図積分)

-
- ①塔頂と塔底の溶質液組成 x_t と x_b をとる。
 - ② x_t と x_b の間を適当な刻み幅で分割する。(等間隔である必要はない。)
 - ③操作線の式を用いて、各 x に対応する溶質ガス組成 y を求める。
 - ④平衡線($y=mx$)の式を用いて、各 x に対応する溶質ガスの平衡組成 y^* を求める。
 - ⑤各 x に対応するガス側総括推進力($y-y^*$)の逆数を求める。
 - ⑥ $1/(y-y^*)$ 対 y の折れ線グラフを作成する。
 - ⑦各区画の台形面積を求める。
 - ⑧台形面積の和 $\Sigma S(=N_{OG})$ を求める。
-

12.4 境膜NTU

境膜 NTU(N_G, N_L)を求めるには、気液界面における溶質組成 x_i および y_i を求める必要がある。図解法と解析法がある。ここでは、ガス側境膜 NTU(N_G)の求め方を例にとる。

12.4.1 図解法

操作線上における塔頂から塔底までの液組成 $x_1 \sim x_b$ を適当な刻み幅で複数に分割する。各液組成 x に対応する溶質ガス組成 y を操作線の式より求め、操作線上の各組成点 (x, y) から平衡線に向けて対応線(タイライン)を引く。対応線と平衡線の交点 (x_i, y_i) が塔内における任意の液ガス組成 (x, y) に対応する気液界面組成に相当し、組成差 $(y - y_i)$ がガス境膜内の吸収推進力となる。この逆数 $1/(y - y_i)$ を区画ごとに求め、 $1/(y - y_i)$ 対 y の折れ線グラフを作成する。各プロットから x 軸に向かって垂線を下ろし、塔頂から塔底までの組成範囲 $y_1 \sim y_b$ で台形面積の和を図積分で求めると、それがガス側境膜 NTU(N_G)となる。一方、液側境膜 NTU(N_L)を求める場合は、操作線上における塔頂から塔底までのガス組成 $y_1 \sim y_b$ を適当な刻み幅で複数に分割して $1/(x - x_i)$ 対 x のグラフを作成し、図積分を行えばよい。操作線上の x と平衡線上の x_i の差 $(x - x_i)$ が液境膜内の吸収推進力となる。

対応線は、物質移動速度式より導かれる。

$$N_A = k_G a P_T (y - y_i) = k_L a C_T (x_i - x) \quad \cdots(12.4.1.1)$$

$$y = -\frac{k_L a C_T}{k_G a P_T} (x - x_i) + y_i \quad \cdots(12.4.1.2)$$

上式に境膜 HTU(H_G, H_L)を代入すると、対応線の傾きは次式で表される。

$$-\frac{k_L a C_T}{k_G a P_T} = -\left(\frac{H_G}{H_L}\right)\left(\frac{L_{MT}}{G_{MT}}\right) \quad \left[H_G = \frac{G_{MT}}{k_G a P_T}, H_L = \frac{L_{MT}}{k_L a C_T} \right] \quad \cdots(12.4.1.3)$$

対応線の傾きを求めるには、恩田式などの推算式で物質移動計算を行い、ガス側と液側の境膜容量係数 $k_L a$ と $k_G a$ を求めるか、Fellinger 式や Sherwood 式を用いて境膜 HTU(H_G, H_L)を直接求める。種々の物質移動操作における一般的な計算方法にしたがうならば、前者の方法となる。

12.4.2 解析法

流体中の溶質組成 (x, y) は操作線上、気液界面組成 (x_i, y_i) は平衡線上にある。液側の界面組成 x_i は、平衡線より導かれる。

$$x_i = \frac{y_i}{m} \quad \cdots(12.4.2.1)$$

ガス側の界面組成 y_i は、対応線の式に液組成 x_i を代入することで導かれる。

$$y = -\frac{k_L a C_T}{k_G a P_T} \left(x - \frac{y_i}{m}\right) + y_i \quad \cdots(12.4.2.2)$$

$$y = k \left(x - \frac{y_i}{m}\right) + y_i \quad \left[k \equiv -\frac{k_L a C_T}{k_G a P_T} \right] \quad \cdots(12.4.2.3)$$

$$y - kx = -\left(\frac{k}{m}\right)y_i + y_i \quad \cdots(12.4.2.4)$$

$$y - kx = \left(1 - \frac{k}{m}\right)y_i \quad \dots(12.4.2.5)$$

$$y_i = \frac{y - kx}{1 - (k/m)} \quad \dots(12.4.2.6)$$

平衡線と操作線がともに直線で近似される場合は、ガス境膜または液境膜内における吸収推進力の対数平均 $(y - y_i)_{lm}$ あるいは $(x - x_i)_{lm}$ を用いて求めることができる。

$$N_G \equiv \int_{y_i}^{y_b} \frac{dy}{y - y_i} = \frac{y_b - y_t}{(y - y_i)_{lm}} \left[(y - y_i)_{lm} \equiv \frac{(y_b - y_{bi}) - (y_t - y_{ti})}{\ln\{(y_b - y_{bi})/(y_t - y_{ti})\}} \right] \quad \dots(12.4.2.7)$$

$$N_L \equiv \int_{x_i}^{x_b} \frac{dx}{x - x_i} = \frac{x_b - x_t}{(x - x_i)_{lm}} \left[(x - x_i)_{lm} \equiv \frac{(x_b - x_{bi}) - (x_t - x_{ti})}{\ln\{(x_b - x_{bi})/(x_t - x_{ti})\}} \right] \quad \dots(12.4.2.8)$$

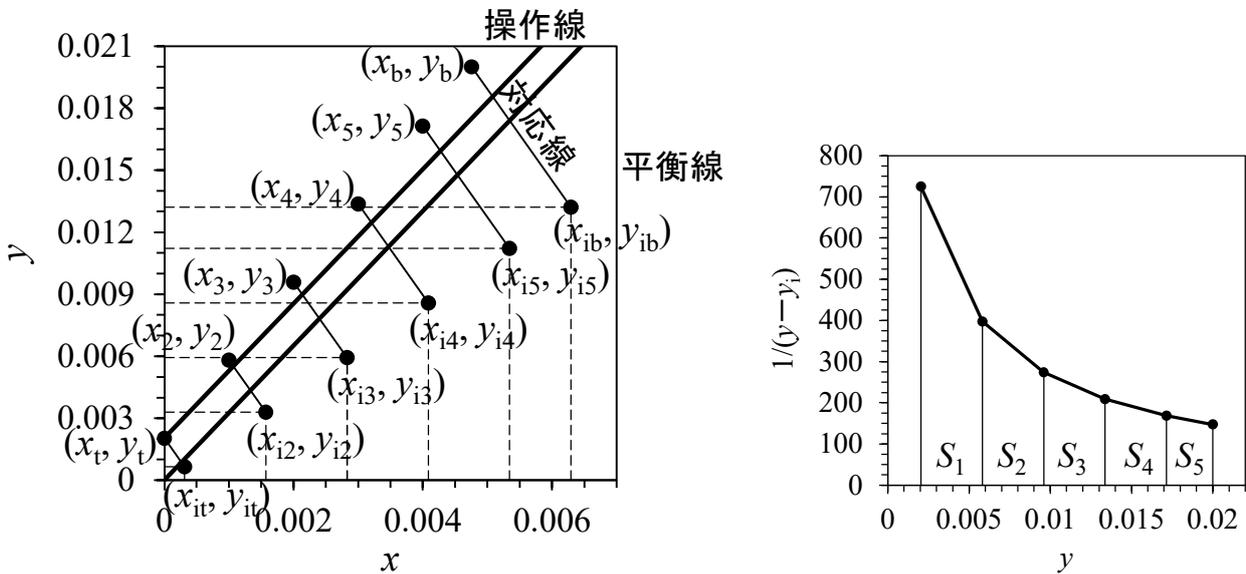


図 12.4.1 ガス側境膜 NTU (N_G) の解析例

表 12.4.1 ガス側境膜 NTU (N_G) の解析例

(気液界面組成は、解析法により求めた。図解法の場合は、図上で読み取った値を書く。)

x	y	x_i	y_i	$1/(y - y_i)$	台形面積
$(x_i)=0.000$	$(y_i)=0.0020366$	$(x_{it})=0.00031295$	$(y_{it})=0.0006572$	724.95	
$(x_2)=0.001$	$(y_2)=0.0058138$	$(x_{i2})=0.0015706$	$(y_{i2})=0.0032984$	397.55	$(S_1)=2.1199$
$(x_3)=0.002$	$(y_3)=0.0095910$	$(x_{i3})=0.0028284$	$(y_{i3})=0.0059397$	273.87	$(S_2)=1.2680$
$(x_4)=0.003$	$(y_4)=0.013368$	$(x_{i4})=0.0040861$	$(y_{i4})=0.0085809$	208.88	$(S_3)=0.91174$
$(x_5)=0.004$	$(y_5)=0.017145$	$(x_{i5})=0.0053438$	$(y_{i5})=0.011222$	168.82	$(S_4)=0.71334$
$(x_b)=0.0047557$	$(y_b)=0.02$	$(x_{ib})=0.0062943$	$(y_{ib})=0.013218$	147.45	$(S_5)=0.45140$
					$(\Sigma S)=5.4645$

(Henry 定数 $m=2.1$, 対応線の傾き $k=-4.4075$)

- ①塔頂と塔底の溶質液組成 x_t と x_b をとる。
- ② x_t と x_b の間を適当な刻み幅で分割する。(等間隔である必要はない。)
- ③操作線の式を用いて、各 x に対応する溶質ガス組成 y を求める。

- ④平衡線($y=mx$)の式を用いて、各 x に対応する溶質ガスの平衡組成 y^* を求める。
- ⑤操作線上の溶質組成(x, y)から平衡線に向かって傾き $-k_L a C_T / k_G a P_T$ または $-k_x a / k_y a$ の対応線を引く。
- ⑥平衡線との交点(x_i, y_i)を読む。これが、塔の任意の高さ位置における液側とガス側の界面濃度となる。
- ※ヘンリーの式 $y_i = m x_i$ を用いると、作図をしなくとも気液界面組成(x_i, y_i)を計算することができる。
- ⑦各 x_i に対応するガス側境膜推進力($y - y_i$)の逆数を求める。
- ⑧ $1/(y - y_i)$ 対 y の折れ線グラフを作成する。
- ⑨各区画の台形面積を求める。
- ⑩台形面積の和 $\Sigma S (= N_G)$ を求める。

12.5 HTUとNTUの工学的意味

HTU (移動単位高さ Height of Transfer Unit) は、1回の分離に必要な塔高に相当し、塔の分離性能を表す。値が小さい程、より低い塔高 (低コスト) で1回の分離が済むので、塔の分離性能が良い。また、移動論的には、物質移動速度の抵抗係数 $1/K$ に相当する。NTU (移動単位数 Number of Transfer Unit) は、推進力の逆数に相当することから、物質移動のしにくさ、すなわち分離の難度を表す。値が小さい程、物質移動速度が大きく、分離が容易。塔高 Z が HTU と NTU の積で表されることの直感的な理解について、充填塔を棚段塔に置き換えて考えてみる。棚段塔の塔高は、棚の段数と段間隔の積で決まる。これを充填塔に置き換えると、HTU が棚段の段間隔に相当し (1回の分離に棚段1枚が必要となり、段間隔が一つ生じる。)、NTU が棚段の数に相当する。(分離の難度を分離の必要回数、すなわち棚段の必要数とみなす。)

13. 物質移動

13.1 物理吸収速度

二重境膜モデルでは、ガスと液が接触した瞬間に溶解平衡状態が実現され、ガス側と液側の境膜に十分に発達した濃度勾配が瞬時に形成されると考える [文献 16]。このとき、溶質の物質移動速度 N_A [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] は、ガス側と液側で次式のように表される。

$$\text{ガス側(G)} : N_{AG} = k_G(p_A - p_{Ai}) = k_G P_T (y_A - y_{Ai}) = k_y (y_A - y_{Ai}) \quad \cdots(13.1.1)$$

$$\text{液側(L)} : N_{AL} = k_L(C_{Ai} - C_A) = k_L C_T (x_{Ai} - x_A) = k_x (x_{Ai} - x_A) \quad \cdots(13.1.2)$$

ただし、 C_A は溶質濃度 [mol/m^3]、 C_T は全濃度 [mol/m^3]、 P_T は全圧 [Pa]、 p_A は溶質の分圧 [Pa]、 k_G, k_L, k_x, k_y は境膜物質移動係数、 x_A, y_A は溶質のモル分率 [—]。添え字 i は気液界面における値。

希薄溶液の場合は、溶解平衡下において Henry の法則が成り立つ。

$$\text{ガス側(G)} : p_A = H C_A^* \quad \cdots(13.1.3) \quad \text{または} \quad y_A = m x_A^* \quad \cdots(13.1.4)$$

$$\text{界面(i)} : p_{Ai} = H C_{Ai} \quad \cdots(13.1.5) \quad \text{または} \quad y_{Ai} = m x_{Ai} \quad \cdots(13.1.6)$$

$$\text{液側(L)} : C_A = (1/H) p_A \quad \cdots(13.1.7) \quad \text{または} \quad x_A = (1/m) y_A \quad \cdots(13.1.8)$$

ただし、 H と m は Henry 定数。

溶解平衡時における溶質の物質移動速度は、ガス側と液側とで等しいことから、次式が成り立つ。

$$N_A = N_{AG} = N_{AL} \quad \cdots(13.1.9)$$

$$(\text{分圧基準} \cdot \text{濃度基準}) \quad N_A = k_G(p_A - p_{Ai}) = k_L(C_{Ai} - C_A) \quad \cdots(13.1.10)$$

$$(\text{モル分率基準}) \quad N_A = k_y(y_A - y_{Ai}) = k_x(x_{Ai} - x_A) \quad \cdots(13.1.11)$$

N_{AG} と N_{AL} のいずれを用いても N_A を求めることができるが、式中の p_{Ai} , C_{Ai} , y_{Ai} , x_{Ai} の測定が困難である。したがって、これらを含まない総括の吸収速度式を導くことになる。

二重境膜モデルの欠点は、①気液界面での溶解抵抗を考慮していない点、②気液が接触した瞬間に溶解平衡を仮定している点、③境膜の存在(乱流渦が界面まで届かない)を前提にしている点、にある。 [文献 17] ①については、ガス側の溶質分子が気液界面に達すると、ある活性化エネルギーの山を越えて溶媒和状態となり、液側へ取り込まれる速度過程が別に存在するはずであり、これに相当する境膜抵抗 $1/k$ が必要である。放散の場合は、分子間力を断ち切って脱溶媒和を実現するのに必要な活性化エネルギーが存在するはずであり、これに相当する境膜抵抗 $1/k$ が必要である。②については、とくに液側は粘性抵抗が大きく、濃度勾配が十分に発達するまで時間がかかる。これに対する修正理論として、浸透説がある。③に対する修正理論として、渦で界面が乱れ液側の新鮮な溶質分子によって界面が構成し直されるとする表面更新説がある。

13.2 ガス側基準の総括物質移動係数

13.2.1 分圧基準の場合

分圧基準の物質移動速度 N_A の第2項と第3項をそれぞれ次式のように変形する。

$$\frac{N_A}{k_G} = p_A - p_{Ai} \quad \cdots(13.2.1.1)$$

$$\frac{HN_A}{k_L} = H(C_{Ai} - C_A) \quad \cdots(13.2.1.2)$$

辺々加えると、次式ようになる。

$$\frac{N_A}{k_G} + \frac{HN_A}{k_L} = (p_A - p_{Ai}) + H(C_{Ai} - C_A) \quad \cdots(13.2.1.3)$$

$$\left(\frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L} \right) N_A = (p_A - p_{Ai}) + H(C_{Ai} - C_A) \quad \cdots(13.2.1.4)$$

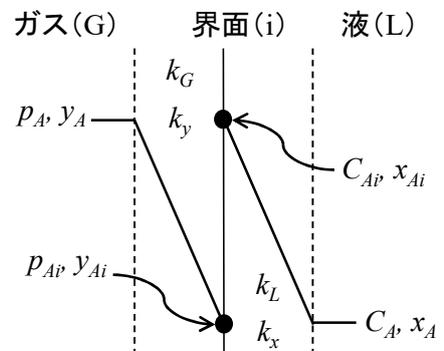
$$N_A = \frac{(p_A - p_{Ai}) + H(C_{Ai} - C_A)}{1/k_G + H/k_L} \quad \cdots(13.2.1.5)$$

p_{Ai} と C_A の式をそれぞれ代入すると、分圧基準のガス側総括吸収速度式を得る。

$$N_A = \frac{(p_A - HC_{Ai}) + H\{C_{Ai} - (1/H)p_A^*\}}{1/k_G + H/k_L} \quad \cdots(13.2.1.6)$$

$$N_A = \frac{1}{1/k_G + H/k_L} (p_A - p_A^*) \quad \cdots(13.2.1.7)$$

$$\boxed{N_A = K_G(p_A - p_A^*)} \quad \cdots(13.2.1.8) \quad \text{分圧差の係数を } K_G \text{ に置き換えた式から } 1/K_G \text{ の式が導かれる。}$$



$$\boxed{\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{H}{k_L}} \quad \cdots(13.2.1.9) \quad \text{はじめから } K_G \text{ がこの式で定義されているのではない。}$$

ただし、 K_G は分圧基準のガス側総括物質移動係数[mol/(m²・s・Pa)]。

13.2.2 モル分率基準の場合

モル分率基準の物質移動速度 N_A の第2項と第3項をそれぞれ次式のように変形する。

$$\frac{N_A}{k_y} = y_A - y_{Ai} \quad \cdots(13.2.2.1)$$

$$\frac{mN_A}{k_x} = m(x_{Ai} - x_A) \quad \cdots(13.2.2.2)$$

辺々加えると、次式のようになる。

$$\frac{N_A}{k_y} + \frac{mN_A}{k_x} = (y_A - y_{Ai}) + m(x_{Ai} - x_A) \quad \cdots(13.2.2.3)$$

$$\left(\frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} \right) N_A = (y_A - y_{Ai}) + m(x_{Ai} - x_A) \quad \cdots(13.2.2.4)$$

$$N_A = \frac{(y_A - y_{Ai}) + m(x_{Ai} - x_A)}{1/k_y + m/k_x} \quad \cdots(13.2.2.5)$$

y_{Ai} と x_A の式をそれぞれ代入すると、モル分率基準のガス側総括吸収速度式を得る。

$$N_A = \frac{(y_A - mx_{Ai}) + m\{x_{Ai} - (1/m)y_A^*\}}{1/k_y + m/k_x} \quad \cdots(13.2.2.6)$$

$$N_A = \frac{1}{1/k_y + m/k_x} (y_A - y_A^*) \quad \cdots(13.2.2.7)$$

$$\boxed{N_A = K_y (y_A - y_A^*)} \quad \cdots(13.2.2.8)$$

$$\boxed{\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x}} \quad \cdots(13.2.2.9)$$

ただし、 K_y はモル分率基準のガス側総括物質移動係数[mol/(m²・s)]。

13.3 液側基準の総括物質移動係数

13.3.1 濃度基準の場合

溶質の物質移動速度 N_A の第2項と第3項をそれぞれ次式のように変形する。

$$\frac{N_A}{Hk_G} = \frac{p_A - p_{Ai}}{H} \quad \cdots(13.3.1.1)$$

$$\frac{N_A}{k_L} = C_{Ai} - C_A \quad \cdots(13.3.1.2)$$

辺々加えると、次式のようになる。

$$\frac{N_A}{Hk_G} + \frac{N_A}{k_L} = \left(\frac{p_A - p_{Ai}}{H} \right) + (C_{Ai} - C_A) \quad \cdots(13.3.1.3)$$

$$\left(\frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G} \right) N_A = (C_{Ai} - C_A) + (p_A - p_{Ai})/H \quad \cdots(13.3.1.4)$$

$$N_A = \frac{(C_{Ai} - C_A) + \{(p_A - p_{Ai})/H\}}{1/k_L + 1/Hk_G} \quad \cdots(13.3.1.5)$$

p_A と p_{Ai} の式をそれぞれ代入すると、濃度基準の液側総括吸収速度式を得る。

$$N_A = \frac{(C_{Ai} - C_A) + \{HC_A^* - HC_{Ai}\}/H}{1/k_L + 1/Hk_G} \quad \cdots(13.3.1.6)$$

$$N_A = \frac{1}{1/k_L + 1/Hk_G} (C_A^* - C_A) \quad \cdots(13.3.1.7)$$

$$\boxed{N_A = K_L (C_A^* - C_A)} \quad \cdots(13.3.1.8)$$

$$\boxed{\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G}} \quad \cdots(13.3.1.9)$$

ただし、 K_L は濃度基準の液側総括物質移動係数[m/s]。

13.3.2 モル分率基準の場合

モル分率基準の物質移動速度 N_A の第2項と第3項をそれぞれ次式のように変形する。

$$\frac{N_A}{k_x} = x_{Ai} - x_A \quad \cdots(13.3.2.1)$$

$$\frac{N_A}{mk_y} = \frac{y_A - y_{Ai}}{m} \quad \cdots(13.3.2.2)$$

辺々加えると、次式のようになる。

$$\frac{N_A}{k_x} + \frac{N_A}{mk_y} = (x_{Ai} - x_A) + \frac{y_A - y_{Ai}}{m} \quad \cdots(13.3.2.3)$$

$$\left(\frac{1}{k_x} + \frac{1}{mk_y} \right) N_A = (x_{Ai} - x_A) + \frac{y_A - y_{Ai}}{m} \quad \cdots(13.3.2.4)$$

$$N_A = \frac{(x_{Ai} - x_A) + (y_A - y_{Ai})/m}{1/k_x + 1/mk_y} \quad \cdots(13.3.2.5)$$

y_A と y_{Ai} の式をそれぞれ代入すると、モル分率基準の液側総括吸収速度式を得る。

$$N_A = \frac{(x_{Ai} - x_A) + (mx_A^* - mx_{Ai})/m}{1/k_x + 1/mk_y} \quad \cdots(13.3.2.6)$$

$$N_A = \frac{1}{1/k_x + 1/mk_y} (x_A^* - x_A) \quad \cdots(13.3.2.7)$$

$$\boxed{N_A = K_x (x_A^* - x_A)} \quad \cdots(13.3.2.8)$$

$$\frac{1}{K_x} = \frac{1}{k_x} + \frac{1}{mk_y} \quad \cdots(13.3.2.9)$$

ただし、 K_x は液側モル分率基準総括物質移動係数[mol/(m²·s)]。

1 3. 4 境膜物質移動係数

ガス側および液側基準の境膜物質移動係数 k_G [mol/(m²·s·Pa)]および k_L [m/s]の推算式として、恩田の式が有名である。【文献 18】

$$\frac{k_G RT}{a_t \mathcal{D}_G} = 5.23 \left(\frac{G}{a_t \mu_G} \right)^{0.7} \left(\frac{\mu_G}{\rho_G \mathcal{D}_G} \right)^{1/3} (a_t D_p)^{-2.0} \left[\text{適用範囲: } \frac{G}{a_t \mu_G} = 2 \sim 1000 \right] \quad \cdots(13.4.1)$$

ただし、称呼寸法 15 mm 以下の充填物に対しては、5.23 の代わりに 2.0 を用いる。

$$k_L \left(\frac{\rho_L}{\mu_L g} \right)^{1/3} = 0.0051 \left(\frac{L}{a_w \mu_L} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_L}{\rho_L \mathcal{D}_L} \right)^{-1/2} (a_t D_p)^{0.4} \left[\text{適用範囲: } \frac{4L}{a_w \mu_L} = 1.6 \sim 2400 \right] \quad \cdots(13.4.2)$$

$$\frac{a_w}{a_t} = 1 - \exp \left[-1.45 \left(\frac{L}{a_t \mu_L} \right)^{0.1} \left(\frac{a_t L^2}{\rho_L^2 g} \right)^{-0.05} \left(\frac{L^2}{\rho_L \sigma a_t} \right)^{0.2} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0.75} \right] \quad \cdots(13.4.3)$$

ただし、 a_t は充填層容積当たりの充填物の全表面積[m²/m³]、 a_w は充填層容積当たりの充填物の濡れ面積[m²/m³]、 \mathcal{D} は溶質の拡散係数[m²/s]、 D_p は充填物の称呼寸法[m]、 g は重力加速度[m/s²]、 G は混合ガスの質量流速[kg/(m²·s)]、 L は吸収液の質量流速[kg/(m²·s)]、 R は気体定数[J/(mol·K)]、 μ は粘度[Pa·s]、 ρ は密度[kg/m³]、 σ は吸収液の表面張力[N/m]、 σ_c は充填物材質に対する液の臨界表面張力[N/m](磁製 0.061、鋼製 0.075)、下付き文字の G はガス、 L は液。

充填物の濡れ面積 a_w は、気液有効接触面積 a に相当する。上で求めた k_G あるいは k_L に乗じると、容量係数 $k_G a$ [mol/(m³·s·Pa)]および $k_L a$ [1/s]を求めることができる。

1 4. 圧力損失

充填塔の圧力損失 ΔP [Pa]の推算式については、Leva の式がある。【文献 19】

$$\frac{\Delta P}{Z} = \alpha (10^{\beta L / \rho_L}) \left(\frac{G^2}{\rho_G} \right) \quad \cdots(14.1)$$

ただし、 G は混合ガスの質量流速[kg/(m²·s)]、 L は吸収液の質量流速[kg/(m²·s)]、 Z は充填層高[m]、 α と β は定数。

上式で与えられる圧力損失 ΔP は、厳密には充填層の圧力損失を表すことに留意する。圧力損失を求めることで、ガスの供給に用いる送風機の所要動力を見積もることができる。

表 14.1 Leva の式における定数【文献 20】

充填物	称呼寸法	α	β
-----	------	----------	---------

ラシヒリング (磁製)	1/2 in	1700	83.9
	3/4 in	449	53.3
	1 in	438	51.1
	1 1/2 in	165	47.2
	2 in	154	34.8
ベルルサドル (磁製)	1/2 in	658	42.8
	3/4 in	329	34.8
	1 in	220	34.8
	1 1/2 in	109	26.6

15. 設計計算

塔型式	棚段塔・ 充填塔	吸収液の密度 ρ_L	純溶媒の密度に等しい
溶質ガス	アセトン	吸収液の粘度 μ_L	純溶媒の粘度に等しい
同伴ガス	乾燥空気	吸収液の表面張力 σ	72 mN/m
純溶媒	水	水の密度 ρ_w	純溶媒の密度に等しい
溶質の分子量 M_A	58	塔底の溶質ガス組成 y_b	0.02(2 mol%)
同伴ガスの分子量 M_{GB}	28.8	混合ガスの体積流量 G_V	1000 m ³ /h
同伴ガスの密度 ρ_{GB}	1.18 kg/m ³	塔底の混合ガス温度 T_{Gb}	25°C
同伴ガスの粘度 μ_G	18.5 $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	塔底の混合ガス圧 P_T	101.3 kPa(1 気圧)
混合ガスの密度 ρ_G	同伴ガスの密度に等しい	塔頂の吸収液組成 x_t	0 mol%(純溶媒)
混合ガスの粘度 μ_G	同伴ガスの粘度に等しい	塔内の吸収液温度 T_L	25°C
溶質の凝縮潜熱 λ	30100 kJ/kmol	溶質の回収率 η	0.90(90%)
溶質の溶解熱 q	10450 kJ/kmol	液ガス比(L_M/G_M)	最小液ガス比の2倍
純溶媒の分子量 M_{LB}	18	質量基準ガス流速 G	フラッディング速度の50%
純溶媒の密度 ρ_{LB}	1000 kg/m ³	充填物の種類	1 1/2 in 磁製ラシヒリング
純溶媒の粘度 μ_{LB}	0.001 Pa \cdot s	重力加速度 g	9.81 m/s ²
純溶媒の平均比熱容量 C_p	4.2 kJ/(kg \cdot K)		

付表 充填物特性

[文献8] 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂五版(1988), 10章吸収, 表10-8より一部抜粋して改変

充填物	材質	称呼寸法	厚さ [mm]	充填個数 [個/m ³]	充填物重量 [kg/m ³]	充填物表面積 a_t [m ² /m ³]	空隙率 ε [-]	充填物因子 F_p [1/m]
ラシヒリング	磁製	1/2 in	2.4	378000	881	367	0.64	1900
		1 in	3.2	47700	673	190	0.74	509
		1 1/2 in	4.8	13700	689	121	0.73	312
		2 in	6.4	5790	657	91.9	0.74	213
ベルルサドル	磁製	1/2 in		590000	865	466	0.62	787
		1 in		77000	721	249	0.68	361
		1 1/2 in		22800	641	151	0.71	213
		2 in		8830	625	105	0.72	148

①ヘンリー定数 m [-]

$$\log_{10}E = 7.165 - 2040/T_L = 7.165 - 2040/(273.15 + 25) = 0.32280$$

$$E = 10^{0.32280} = 2.1028 \text{ atm/モル分率}$$

$$m = E/P_T = (2.1028) \text{ atm/モル分率} \cdot (101.3) \text{ kPa/atm} / (101.3) \text{ kPa} = 2.1028 \approx \boxed{2.10}$$

②塔底の混合ガスのモル流速 $G_{MTb}S$ [kmol/h]

$$v_G = 0.082006 T_G = (0.082006)(273.15 + 25) = 24.450 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

$$G_{MTb}S = G_V / v_G = 1000 / 24.450 = 40.899 \text{ kmol/h} \doteq \boxed{40.9 \text{ kmol/h}}$$

③同伴ガスのモル流速 $G_{MB}S$ [kmol/h]

$$G_{MB}S = G_{MTb}S(1 - y_b) = (40.899)(1 - 0.02) = 40.081 \text{ kmol/h} \doteq \boxed{40.1 \text{ kmol/h}}$$

④塔頂の混合ガス基準の溶質ガス組成 y_t [kmol-溶質/kmol-混合ガス]

$$y_t = y_b(1 - \eta) / (1 - y_b\eta) = (0.02)(1 - 0.90) / \{1 - (0.02)(0.90)\} = 0.0020366 \doteq \boxed{0.00204}$$

⑤中腹の混合ガスのモル流速 $G_{MT}S$ [kmol/h]

$$G_{MA}S = (G_{MTb}S)y_b(1 - \eta) = (40.899)(0.02)(1 - 0.90) = 0.081798 \text{ kmol/h}$$

$$G_{MAb}S = (G_{MTb}S)y_b = (40.899)(0.02) = 0.81798 \text{ kmol/h}$$

$$G_{MA}S = (G_{MA}S + G_{MAb}S) / 2 = (0.081798 + 0.81798) / 2 = 0.44988 \text{ kmol/h}$$

$$G_{MT}S = G_{MA}S + G_{MB}S = 0.44988 + 40.081 = 40.530 \text{ kmol/h} \doteq \boxed{40.5 \text{ kmol/h}}$$

⑥最小液ガス比 $(L_{MB}/G_{MB})_{\min}$

希薄条件を仮定する。

$$x_b^* = y_b / m = 0.02 / 2.1028 = 0.0095112$$

$$(L_{MB}/G_{MB})_{\min} \doteq (L_{MT}/G_{MT})_{\min} = (y_b - y_t) / (x_b^* - x_t) = (0.02 - 0.0020366) / (0.0095112 - 0) = 1.8886 \doteq \boxed{1.89}$$

⑦最小溶媒量 $(L_{MB}S)_{\min}$ [kmol/h]

$$(L_{MB}S)_{\min} \doteq (L_{MB}/G_{MB})_{\min} (G_{MB}S) = (1.8886)(40.081) = 75.696 \text{ kmol/h} \doteq \boxed{75.7 \text{ kmol/h}}$$

⑧操作線

希薄条件を仮定する。

$$(L_{MT}/G_{MT}) = (2)(L_{MT}/G_{MT})_{\min} = (2)(1.8886) = 3.7772$$

$$y = (L_{MT}/G_{MT})(x - x_t) + y_t = (3.7772)(x - 0) + 0.0020366 = 3.7772x + 0.0020366$$

$$\boxed{y = 3.78x + 0.00204}$$

⑨塔底の吸収液基準の溶質液組成 x_b [kmol-溶質/kmol-吸収液]

$$x_b = (y_b - 0.0020366) / (3.7772) = (0.02 - 0.0020366) / (3.7772) = 0.0047557 \doteq \boxed{0.00476}$$

⑩中腹の吸収液のモル流速 $L_{MT}S$ [kmol/h]

$$L_{MAb}S = (G_{MTb}S)y_b\eta = (40.899)(0.02)(0.90) = 0.73618 \text{ kmol/h}$$

$$L_{MB}S = \phi(L_{MB}S)_{\min} = (2)(75.696) = 151.39 \text{ kmol/h}$$

$$L_{MA}S = (L_{MA}S + L_{MAb}S) / 2 = (0 + 0.73618) / 2 = 0.36809 \text{ kmol/h}$$

$$L_{MT}S = L_{MA}S + L_{MB}S = 0.36809 + 151.39 = 151.75 \text{ kmol/h} \doteq \boxed{152 \text{ kmol/h}}$$

⑪質量基準の液ガス比 (L/G)

$$x_{av} = (x_b + x_t) / 2 = (0.0047557 + 0) / 2 = 0.0023778$$

$$M_{LT} = M_A x_{av} + M_B(1 - x_{av}) = (58)(0.0023778) + (18)(1 - 0.0023778) = 18.095 \text{ kg/kmol}$$

$$LS = (L_{MT}S)M_{LT} = (151.75)^{\text{kmol/h}}(18.095)^{\text{kg/kmol}} = 2745.9 \text{ kg/h}$$

$$y_{av} = (y_b + y_t) / 2 = (0.02 + 0.0020366) / 2 = 0.0110183$$

$$M_{GT} = M_A y_{av} + M_B(1 - y_{av}) = (58)(0.0110183) + (28.8)(1 - 0.0110183) = 29.121 \text{ kg/kmol}$$

$$GS = (G_{MT}S)M_{GT} = (40.530)^{\text{kmol/h}}(29.121)^{\text{kg/kmol}} = 1180.2 \text{ kg/h}$$

$$L/G = LS/GS = 2745.9 / 1180.2 = 2.3266 \doteq \boxed{2.33}$$

⑫フローパラメーター $F.P.$ [—]

$$F.P.=(L/G)(\rho_G/\rho_L)^{0.5}=(2.3266)(1.18/1000)^{0.5}=0.079921 \doteq \boxed{0.0799}$$

⑬フラッシング速度 G_F [kg/(m²·s)]

$$(G_F^2 F_p)(\rho_w/\rho_L)\mu_L^{0.2}/(\rho_G\rho_L g)=0.14$$

$$F_p=(312)^{1/m}(0.3048)^{m/ft}=95.097 \text{ ft}^{-1}$$

$$\rho_G=(1.18)^{\text{kg/m}^3}(1/0.4536)^{\text{lb/kg}}(0.3048^3)^{\text{m}^3/\text{ft}^3}=0.073663 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_L=(1000)^{\text{kg/m}^3}(1/0.4536)^{\text{lb/kg}}(0.3048^3)^{\text{m}^3/\text{ft}^3}=62.426 \text{ lb/ft}^3$$

$$\mu_L=0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ cP}$$

$$\rho_w/\rho_L=1$$

$$g=(9.81)^{\text{m/s}^2}(1/0.3048)^{\text{ft/m}}(3600^2)^{\text{s}^2/\text{h}^2}=4.1711\times 10^8 \text{ ft/h}^2$$

$$G_F=[(0.14)(\rho_G\rho_L g)/\{F_p(\rho_w/\rho_L)\mu_L^{0.2}\}]^{0.5}$$

$$G_F=[(0.14)(0.073663)(62.426)(4.1711\times 10^8)/\{(95.097)(1)(1)^{0.2}\}]^{0.5}$$

$$G_F=(1680.4)^{\text{lb}/(\text{ft}^2\cdot\text{h})}(0.4536)^{\text{kg}/\text{lb}}(1/0.3048^2)^{\text{ft}^2/\text{m}^2}(1/3600)^{\text{h}/\text{s}}=2.2790 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}) \doteq \boxed{2.28 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})}$$

⑭塔断面積 S [m²]

$$G=0.5G_F=(0.5)(2.2790)=1.1395 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$$

$$S=\rho_G G_V/G=(1.18)^{\text{kg}/\text{m}^3}(1000)^{\text{m}^3/\text{h}}(1/3600)^{\text{h}/\text{s}}/1.1395^{\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})}=0.28765 \text{ m}^2 \doteq \boxed{0.288 \text{ m}^2}$$

⑮塔径 D_T [m]

$$D_T=(4S/\pi)^{0.5}=\{4(0.28765)/\pi\}^{0.5}=0.60518 \text{ m} \doteq \boxed{0.605 \text{ m}}$$

⑯液の動的ホールドアップ h_d [—]

吸収液は、近似的に水とみなす。

$$L=(LS)/S=2746.0^{\text{kg}/\text{h}}/0.28765^{\text{m}^2}=9546.3 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$$

$$\beta=\gamma D_{ps}^\theta=(0.267)(5.30)^{0.376}=0.49984$$

$$h_t=\alpha(L/4.88)^\beta D_{ps}^{-2}=(0.0209)(9546.3/4.88)^{0.49984}(5.30)^{-2}=0.032868$$

$$h_s=\delta D_{ps}^{-\lambda}=(0.065)(5.30)^{-1.21}=0.0086405$$

$$h_d=h_t-h_s=0.032868-0.0086405=0.024227 \doteq \boxed{0.0242}(2.42\%)$$

⑰気相拡散係数 \mathcal{D}_G [m²/s]

$$V_A(\text{CH}_3-\text{CO}-\text{CH}_3)=3\text{C}+6\text{H}(\text{化合物})+\text{O}(\text{ケトン})=(3)(14.8)+(6)(3.7)+7.4=74$$

$$V_B(\text{Air})=29.9$$

$$\mathcal{D}_G=0.0043T^{1.5}\{(1/M_A)+(1/M_B)\}^{0.5}/\{P(V_A^{1/3}+V_B^{1/3})^2\}$$

$$\mathcal{D}_G=(0.0043)(273.15+25)^{1.5}\{(1/58)+(1/28.8)\}^{0.5}/[(1)\{(74)^{1/3}+(29.9)^{1/3}\}^2]=0.094639 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mathcal{D}_G=9.4639\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \doteq \boxed{9.46\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

⑱液相拡散係数 \mathcal{D}_L [m²/s]

$$V_m=V_A(\text{CH}_3-\text{CO}-\text{CH}_3)=74$$

$$\mathcal{D}_L=(7.4\times 10^{-8})(\gamma M_{LB})^{0.5}T/(\mu_{LB}V_m^{0.6})=(7.4\times 10^{-8})\{(2.6)(18)\}^{0.5}(273.15+25)/\{(1)(74)^{0.6}\}=1.1409\times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$\mathcal{D}_L=1.1409\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \doteq \boxed{1.14\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}}$$

⑲充填物の濡れ面積 a_w [m²/m³]

$$L=(L_{MT}S)M_{LT}/S=\{(151.75)^{\text{kmol}/\text{h}}(1/3600)^{\text{h}/\text{s}}\}(18.096)^{\text{kg}/\text{kmol}}/(0.28765)^{\text{m}^2}=2.6518 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$$

$$L/a_w\mu_L=2.6518^{\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})}/\{(121)^{\text{m}^2/\text{m}^3}(0.001)^{\text{Pa}\cdot\text{s}}\}=21.915$$

$$a_i L^2 / (\rho_L^2 g) = (121)(2.6518)^2 / \{(1000)^2(9.81)\} = 8.6735 \times 10^{-5}$$

$$L^2 / (\rho_L \sigma a_i) = (2.6518)^2 / \{(1000)(0.072)(121)\} = 8.0716 \times 10^{-4}$$

$$\sigma_c / \sigma = 0.061 / 0.072 = 0.84722$$

$$a_w / a_t = 1 - \exp[-(1.45)(L/a_w \mu_L)^{0.1} \{a_i L^2 / (\rho_L^2 g)\}^{-0.05} \{L^2 / (\rho_L \sigma a_i)\}^{0.2} (\sigma_c / \sigma)^{0.75}]$$

$$a_w / a_t = 1 - \exp[-(1.45)(21.915)^{0.1} (8.6735 \times 10^{-5})^{-0.05} (8.0716 \times 10^{-4})^{0.2} (0.84722)^{0.75}] = 0.15484$$

$$a_w = (0.48817)(121) = 59.068 \text{ m}^2/\text{m}^3 \doteq \boxed{59.1 \text{ m}^2/\text{m}^3}$$

② ガス側基準の境膜容量係数 $k_G a$ [$\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]

$$G = 0.5 G_F = (0.5)(2.2790) = 1.1395 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$G/a_w \mu_G = 1.1395 / \{(121)(18.5 \times 10^{-6})\} = 509.04$$

$$\mu_G / \rho_G \mathcal{D}_G = 18.5 \times 10^{-6} / \{(1.18)(9.4639 \times 10^{-6})\} = 1.6566$$

$$a_i D_p = (121)^{\text{m}^2/\text{m}^3} (1.5)^{\text{in}} (2.54)^{\text{cm}/\text{in}} (0.01)^{\text{m}/\text{cm}} = 4.6101$$

$$k_G R T / a_t \mathcal{D}_G = (5.23)(G/a_w \mu_G)^{0.7} (\mu_G / \rho_G \mathcal{D}_G)^{1/3} (a_i D_p)^{-2.0} = (5.23)(509.04)^{0.7} (1.6566)^{1/3} (4.6101)^{-2.0} = 22.849$$

$$k_G = (22.849)(a_t \mathcal{D}_G / R T) = (22.849)(121)(9.4639 \times 10^{-6}) / \{(8.314)(273.15 + 25)\} = 1.0555 \times 10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

$$k_G a = k_G a_w = (1.0555 \times 10^{-5})(59.068) = 6.2346 \times 10^{-4} \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \doteq \boxed{6.23 \times 10^{-4} \text{ mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})}$$

① 液側基準の境膜容量係数 $k_L a$ [$1/\text{s}$]

$$L/a_w \mu_L = (2.6518)^{\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})} / \{(59.068)^{\text{m}^2/\text{m}^3} (0.001)^{\text{Pa} \cdot \text{s}}\} = 44.894$$

$$\mu_L / \rho_L \mathcal{D}_L = 0.001 / \{(1000)(1.1409 \times 10^{-9})\} = 876.50$$

$$a_i D_p = (121)^{\text{m}^2/\text{m}^3} (1.5)^{\text{in}} (2.54)^{\text{cm}/\text{in}} (0.01)^{\text{m}/\text{cm}} = 4.6101$$

$$k_L (\rho_L / \mu_L g)^{1/3} = (0.0051)(L/a_w \mu_L)^{2/3} (\mu_L / \rho_L \mathcal{D}_L)^{-1/2} (a_i D_p)^{0.4} = (0.0051)(44.894)^{2/3} (876.50)^{-1/2} (4.6101)^{0.4} = 4.0099 \times 10^{-3}$$

$$k_L = (4.0099 \times 10^{-3})(\rho_L / \mu_L g)^{-1/3} = (4.0099 \times 10^{-3}) [1000 / \{(0.001)(9.81)\}]^{-1/3} = 8.5840 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$k_L a = k_L a_w = (8.5840 \times 10^{-5})(59.068) = 5.0703 \times 10^{-3} \text{ 1/s} \doteq \boxed{5.07 \times 10^{-3} \text{ 1/s}}$$

② ガス側境膜 HTU(H_G)[m]

$$(\text{恩田式}) G_{MT} = (G_{MT} S) / S = (40.530)^{\text{kmol}/\text{h}} (1000)^{\text{mol}/\text{kmol}} (1/3600)^{\text{h}/\text{s}} / 0.28765 \text{ m}^2 = 39.138 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$H_G = G_{MT} / (k_G a P_T) = 39.138 / \{(6.2346 \times 10^{-4})(101300)\} = 0.61969 \text{ m} \doteq \boxed{0.620 \text{ m}}$$

$$(\text{Fellinger 式}) G = 0.5 G_F = (0.5)(2.2790) = 1.1395 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$L = (L_{MT} S) (M_{LT} / S) = \{(151.75)^{\text{kmol}/\text{h}} (1/3600)^{\text{h}/\text{s}}\} \{(18.096)^{\text{kg}/\text{kmol}} / (0.28765 \text{ m}^2)\} = 2.6518 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$S c_G = \mu_G / \rho_G \mathcal{D}_G = 18.5 \times 10^{-6} / \{(1.18)(9.4639 \times 10^{-6})\} = 1.6566$$

$$H_G = c (G^m / L^n) S c_G^{2/3} = (0.803)(1.1395^{0.38} / 2.6518^{0.40}) (1.6566)^{2/3} = 0.79982 \text{ m} \doteq \boxed{0.800 \text{ m}}$$

③ 液側境膜 HTU(H_L)[m]

$$(\text{恩田式}) L_{MT} = (L_{MT} S) / S = (151.75)^{\text{kmol}/\text{h}} (1000)^{\text{mol}/\text{kmol}} (1/3600)^{\text{h}/\text{s}} / 0.28765 \text{ m}^2 = 146.54 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$C_T = \rho_L / M_{LT} = 1000^{\text{kg}/\text{m}^3} / \{M_A x_{av} + M_{LB} (1 - x_{av})\}^{\text{kg}/\text{kmol}} = 1000^{\text{kg}/\text{m}^3} / \{(58)(0.0024196) + (18)(1 - 0.0024196)\}^{\text{kg}/\text{kmol}}$$

$$C_T = 1000^{\text{kg}/\text{m}^3} / \{(18.096)^{\text{kg}/\text{kmol}} (0.001)^{\text{kmol}/\text{mol}}\} = 55260 \text{ mol}/\text{m}^3$$

$$H_L = L_{MT} / (k_L a C_T) = 146.54 / \{(5.0703 \times 10^{-3})(55260)\} = 0.52301 \text{ m} \doteq \boxed{0.523 \text{ m}}$$

$$(\text{Sherwood-Holloway 式}) L = (L_{MT} S) (M_{LT} / S) = \{(151.75)^{\text{kmol}/\text{h}} (1/3600)^{\text{h}/\text{s}}\} \{(18.096)^{\text{kg}/\text{kmol}} / (0.28765 \text{ m}^2)\}$$

$$L = 2.6518 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$S c_L = \mu_L / \rho_L \mathcal{D}_L = 0.001 / \{(1000)(1.1409 \times 10^{-9})\} = 876.50$$

$$H_L = (1/\alpha)(L/\mu_L)^n S c_L^{1/2} = (1/380)(2.6518/0.001)^{0.22} (876.50)^{1/2} = 0.44133 \text{ m} \doteq \boxed{0.441 \text{ m}}$$

④ ガス側総括 HTU(H_{OG})[m]

(恩田式) $H_{OG}=H_G+m(G_{MT}/L_{MT})H_L=0.61969+(2.1028)(1/3.7772)(0.52301)=0.91085\text{ m}\doteq 0.911\text{ m}$

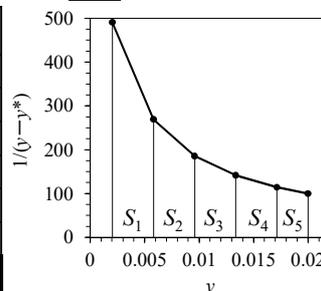
(Fellinger/Sherwood 式) $H_{OG}=H_G+m(G_{MT}/L_{MT})H_L=0.79982+(2.1028)(1/3.7772)(0.44133)=1.0455\text{ m}\doteq 1.04\text{ m}$

より安全側にある Fellinger/Sherwood 式の結果を採用する。

㉕ガス側総括 NTU(N_{OG})[-]

$x_b=(y_b-0.0020366)/3.7772=(0.02-0.0020366)/3.7772=0.0047557\quad N_{OG}=3.7010\doteq 3.70$

x	y	y^*	$1/(y-y^*)$	台形面積
$(x_1=)0.000$	$(y_1=)0.0020366$	0	491.01	
$(x_2=)0.001$	$(y_2=)0.0058138$	0.00210	269.26	$(S_1=)1.4358$
$(x_3=)0.002$	$(y_3=)0.0095910$	0.00420	185.49	$(S_2=)0.85886$
$(x_4=)0.003$	$(y_4=)0.013368$	0.00630	141.47	$(S_3=)0.61752$
$(x_5=)0.004$	$(y_5=)0.017145$	0.00840	114.34	$(S_4=)0.48315$
$(x_b=)0.0047557$	$(y_b=)0.02$	0.00998	99.871	$(S_5=)0.30573$
				$(\Sigma S=)3.7010$

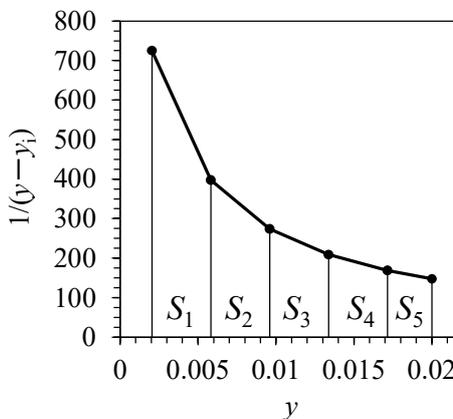
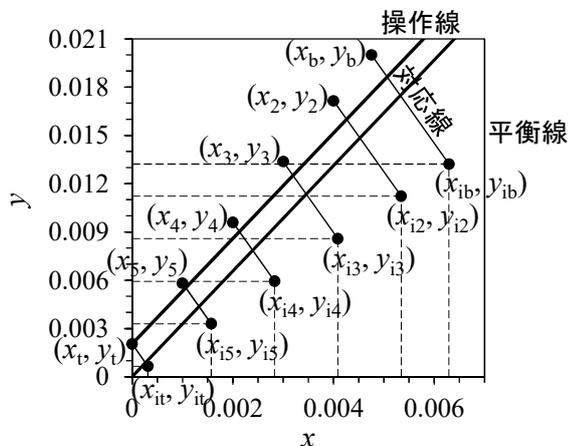


㉖ガス側境膜 NTU(N_G)[-]

$x_b=(y_b-0.0020366)/3.7772=(0.02-0.0020366)/3.7772=0.0047557\quad N_G=5.4645\doteq 5.46$

x	y	x_i	y_i	$1/(y-y_i)$	台形面積
$(x_1=)0.000$	$(y_1=)0.0020366$	$(x_{i1}=)0.00031295$	$(y_{i1}=)0.0006572$	724.95	
$(x_2=)0.001$	$(y_2=)0.0058138$	$(x_{i2}=)0.0015706$	$(y_{i2}=)0.0032984$	397.55	$(S_1=)2.1199$
$(x_3=)0.002$	$(y_3=)0.0095910$	$(x_{i3}=)0.0028284$	$(y_{i3}=)0.0059397$	273.87	$(S_2=)1.2680$
$(x_4=)0.003$	$(y_4=)0.013368$	$(x_{i4}=)0.0040861$	$(y_{i4}=)0.0085809$	208.88	$(S_3=)0.91174$
$(x_5=)0.004$	$(y_5=)0.017145$	$(x_{i5}=)0.0053438$	$(y_{i5}=)0.011222$	168.82	$(S_4=)0.71334$
$(x_b=)0.0047557$	$(y_b=)0.02$	$(x_{ib}=)0.0062943$	$(y_{ib}=)0.013218$	147.45	$(S_5=)0.45140$
				$(\Sigma S=)5.4645$	

(Henry 定数 $m=2.1$, 対応線の傾き $k=-4.4075$)



㉗塔高 Z [m]

(総括基準) $Z=H_{OG}N_{OG}=(1.0455)(3.7010)=3.8693\text{ m}\doteq 3.87\text{ m}$

(境膜基準) $Z=H_GN_G=(0.79982)(5.4645)=4.3706\text{ m}\doteq 4.37\text{ m}$

より安全側にある境膜基準の結果を採用する。

㉘充填塔の圧力損失 ΔP [kPa]

$\Delta P=\alpha(10^{0.1/L})(G^2/\rho_G)Z=(165)(10)^{(47.2)(2.6518)/1000}(1.1395^2/1.18)(4.3706)=1058.6\text{ Pa}\doteq 1.06\text{ kPa}$

[参考]有効数字の丸め方

(ア)切り捨てと切り上げの値を比較してより近い値を採用する。

12.31~~3~~ → (切り捨て)12.31 / (切り上げ)12.32 → (採用)12.31
(イ)(ア)で差が等しい場合は、偶数値を採用する。

12.30~~5~~ → (切り捨て)12.30 / (切り上げ)12.31 → (採用)12.30

[参考]単位換算

1 in (インチ) = 2.54 cm

1 ft (フィート) = 12 in = 0.3048 m

1 lb (ポンド) = 0.4536 kg

1 gal (ガロン) = 0.004546 m³

1 lb/ft³ (ポンド毎立方フィート) = 16.02 kg/m³

1 cP (センチポアズ) = 0.0006720 lb/(ft·s) = 0.001 Pa·s

1 dyn/cm (ダイン毎センチ) = 1 mN/m

参考文献

- [1] R.E. Treybal; Mass-transfer operations 3rd Ed., McGraw Hill Inc. (1980), Chapter 6 Equipment for Gas-Liquid Operations
- [2] 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂四版, 丸善(1978), 6・1 章 ガスの溶解度
- [3] 大野光之; 初歩から学ぶ化学装置設計, 工業調査会(2009), 5 章 吸収装置
- [4] J.S. Eckert; *Chem. Eng. Progr.*, **66**(3) 39-49(1970)
- [5] S. Piche, F. Larachi and B.P.A. Grandjean; *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 476-487(2001)
- [6] H.L. Shulman, C.F. Ullrich, N. Wells and A.Z. Proulx; *AIChE J.*, **1**, 247-253(1955) ※ I ~ IIIの内の I
- [7] 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), 16・177 章 液ホールドアップ
- [8] 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂五版, 丸善(1988), 10 章 吸収(表 10.8)
- [9] L. Fellingner; Sc. D. thesis, M.I.T. (1941)
- [10] T.K. Sherwood and F.A. Holloway; *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, **36**, 39-70(1940)
- [11] 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), 16・180 章 気相 H.T.U.
- [12] 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), 16・181 章 液相 H.T.U.
- [13] E.R. Gilliland; *Ind. Eng. Chem.*, **26**, 681-685(1934)
- [14] C.R. Wilke and P. Chang; *AIChE J.*, **1**, 264-270 (1955)
- [15] 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)
- [16] W.K. Lewis and W.G. Whitman; *Ind. Eng. Chem.*, **16**, 1215-1220(1924)
- [17] 城塚 正, 平田 彰, 村上 昭彦; 化学技術者のための移動速度論, オーム社(1966), 10.1.2 章 二重境膜説
- [18] K. Onda, H. Takeuchi and Y. Okumoto; *J. Chem. Eng. Japan*, **1**, 56-62(1968)
- [19] M. Leva; *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, **50**, 51-56(1954)
- [20] 化学工学協会編; 化学工学便覧 改訂五版, 丸善(1988), 10 章 吸収(表 10.9)

令和 3(2021)年 3 月 11 日作成

令和 3(2021)年 3 月 20 日改訂