混合冷媒の水平管内凝縮熱伝達*

飛原英治^{*1}, 張力生^{*2}Condensation Heat Transfer of Mixed Refrigerants
inside a Horizontal Tube

Eiji HIHARA and Lisheng ZHANG

Experimental and analytical studies of condensation heat transfer were performed for pure, binary and ternary mixtures of HFC32, HFC125 and HFC134a. These heat transfer coefficients were measured inside a horizontal smooth tube 5.8 mm ID and 8 m long. The refrigerant mixture in the test section was cooled by water flowing through an annulus around the tube. The refrigerant temperature was 40°C and the mass flux was varied between 150 and 400 kg/m²s for all the experiments. The heat transfer coefficients for nonazeotropic binary and ternary mixtures was about 20% lower than that for HFC134a at low mass flux conditions. A new predictive model for condensation heat transfer of multicomponent mixtures is proposed, in which the heat transfer deterioration due to the mass transfer effect is taken into account both in forced-convection condensation and in free-convection condensation. The predicted results are in good agreement with the experimental ones.

Key Words: Condensation, Heat Transfer, Mass Transfer, Mixed Refrigerant, HFCs, Horizontal Tube

1. 結 言

成層圏オゾン層破壊物質の一つとしてハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)類は 2020 年に全廃されることが決まっている。HCFC22 はエアコンや冷凍機の作動媒体として広く使用されており, その代替冷媒の開発が急務となっている。HCFC22 の代替冷媒としては, 塩素を含まないハロゲン化合物であるハイドロフルオロカーボン(HFC)類の混合物や炭化水素類が候補に挙げられている⁽¹⁾。わが国においては, 表 1 に示す代替冷媒候補の中で, 可燃性のない HFC32, HFC125 の二成分混合冷媒 R410A とそれに HFC134a を添加した三成分混合冷媒 R407C が有力視されている。R407C は非共沸混合物であるため, 相変化を伴う熱伝達の性能は物質拡散効果により, 単成分媒体の熱伝達率よりも低下する。これは熱交換器の大型化や冷凍機の成績係数の低下を招く恐れがあるので, 相変化を伴う熱交換器における伝熱性能を解明し促進する方法の研究が進められている。なお, R410A は擬似共沸混合物である

ので, 混合物特有の伝熱低下は起こらない。

二成分非共沸混合冷媒の凝縮における伝熱低下のメカニズムに関しては, 藤井の解説⁽²⁾に紹介されている。代替冷媒の伝熱に関して, Anand-Chitti⁽³⁾によるレビューもある。二成分非共沸混合冷媒の管内凝縮熱伝達や内面加工管を利用した伝熱促進に関する研究は比較的多く, HCFC22/CFC12 を対象とする Bokhanovski⁽⁴⁾, Tandon ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾, CFC11/CFC113 を対象とする望月ら⁽⁷⁾, HCFC22/CFC114 を対象とする小山ら⁽⁸⁾⁽⁹⁾, HFC32/134a を対象とする内田ら⁽¹⁰⁾, 五島ら⁽¹¹⁾, 原口ら⁽¹²⁾の研究がある。三成分混合冷媒の管内凝縮熱伝達に関する研究はまだ始まったばかりで, HFC32/125/134a を対象として五島ら⁽¹³⁾, 鳥越ら⁽¹⁴⁾の実験的研究がある程度で, 伝熱モデルに関する研究はほとんどない。

著者ら⁽¹⁵⁾はこれまで, 多成分混合冷媒の水平平滑管内沸騰熱伝達の実験と予測モデルの研究を行ってきたが, 混合物の物質拡散効果による伝熱低下機構は沸騰と凝縮では類似な面が多い。そこで本研究では, 三成分混合冷媒の管内凝縮熱伝達モデルを構築することを目的として, 二成分非共沸混合冷媒(HFC32/134a)と三成分混合冷媒(HFC32/125/134a)の平滑管内凝縮熱伝達率を計測した。続いて二成分非共沸混合冷媒を対象とする管内凝縮熱伝達モデルを提案し, それを三成分

* 原稿受付 1997 年 1 月 27 日。

*1 正員, 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)。

*2 日本ゼネラルモーターズ (〒196-8668 昭島市つつじヶ丘 1-1-110)。

非共沸混合冷媒へ拡張し、その予測結果を実験結果と比較した。混合冷媒の凝縮熱伝達モデルでは、強制対流凝縮成分と自由対流凝縮成分の両方に伝熱低下を考慮している。

Table 1 Alternative Refrigerants for HCFC22⁽¹⁶⁾

ASHRAE Number	Refrigerant	Composition (wt%)	Boiling Point (°C)
R410A	HFC32/125	50/50	-51.9
R407C	HFC32/125/134a	23/25/52	-43.7
	HFC32/134a	30/70	-41.6
R290	Propane	100	-42.0
R717	Ammonia	100	-33.3

記 号

- C : 熱伝達率の修正係数
 C_p : 等圧比熱 (kJ/kgK)
 D_G : 気相の拡散係数 (m^2/s)
 d : 管内径 (m)
 Ga : ガリレオ数 $= g \rho_L d^3 / \mu_L^2$
 H : 相変化数 $= C_{pL}(T_{\text{sat}} - T_w) / \Delta h$
 k_B : 自由対流凝縮の伝熱低下係数
 k_F : 強制対流凝縮の伝熱低下係数
 M : 質量流束 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
 m_{co} : 凝縮流束 ($\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$)
 Nu : ヌセルト数 $= \alpha d / \lambda_L$
 q : 熱流束 (W/m^2)
 Sc : シュミット数
 T : 温度 (K)
 T_w : 壁面温度 (K)
 X : クオリティ
 X_{tt} : Lockhart-Martinelli パラメータ
 x : 液相中の低沸点成分濃度
 y : 気相中の低沸点成分濃度
 α : 熱伝達率 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
 α_m : 物質伝達率 (m/s)
 Δh : 飽和状態の温度の等しい気相と液相の比エンタルピー差 (kJ/kg)
 λ : 熱伝導率 (W/mK)
 μ : 粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- 添字
- 0 : 気相と液相の平均値 (循環冷媒)
 b : バルク
 co : 凝縮液
 G : 気相
 i : 気液界面
 L : 液相

sat: 飽和状態

2. 実験装置と実験条件

実験装置は、図1に示すように、ポンプで冷媒を循環する形式である。ポンプを出た冷媒は流量計と予備加熱器を経たあと、蒸発器で蒸発し、凝縮器で熱伝達率が測定された後、冷媒タンクに戻る。凝縮器は銅製二重管で内管側を冷媒が、外管側を冷却水が対向して流れる。その詳細を図2に示す。内管は内径5.8mmの平滑管で、1セクションの長さは1m、それが8本接続されている。外管側には冷却水の伝熱促進と偏流を防ぐために針金が線状に挿入されている。冷却水系は2系統に分けて流されており、冷却水の流量と各セクションの温度上昇から凝縮熱量が計算される。

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

冷媒のクオリティは凝縮熱量から計算され、冷媒の飽和温度は圧力と冷媒のクオリティからPeng-Robinson状態方程式より求められるが、その値は測定された冷媒温度とよく一致していた。内管の壁温は、事前に測定した冷却水側の平均熱伝達率、凝縮熱量、冷却水温から求めた。その内管の壁温と凝縮熱量、冷媒温度から凝縮熱伝達率を求めた。熱伝達率の不確かさは、±9%と見積もられている。

冷媒の入口温度は40°C、熱流束は2~25kW/m²、冷媒の質量速度は150~420kg/m²sである。混合冷媒の組成は、二成分系がHFC32/134a (30/70wt%)、三成分系がHFC32/125/134a (23/25/52wt%)である。どちらも非共沸的な性質を示す。

Fig. 2 Details of the condenser

3. 凝縮熱伝達モデル

3.1 単成分系 単成分系の水平管内凝縮熱伝達相関式には、Cavallini-Zecchin⁽¹⁷⁾や Shah⁽¹⁸⁾などのように单相流の Dittus-Boelter 式をクオリティ、密度比、還元圧力などを用いて修正したものと、藤井ら⁽¹⁹⁾のように強制対流凝縮領域や自由対流凝縮領域等に分けて表わすものがある。前者では二相流の効果を表わす修正項を実験データとの比較から最適化しているの、凝縮の様態や流動様式に対応していない。したがって、混合冷媒系の物質伝達の効果をモデル化するにあたって、水平管と垂直管の違いをモデル化しにくいなど困難な点が多い。それに対し、後者は強制対流凝縮と自由対流凝縮の物理モデルが比較的是っきりしているの、混合冷媒系の物質伝達の効果のモデル化が容易である。そこで、本研究では、単成分の水平管内凝縮熱伝達相関式を強制対流凝縮と自由対流凝縮の組み合わせで表現した原口ら⁽²⁰⁾の相関式を用いることにした。

原口らは式(1)の形式の相関式を提案している。

$$Nu = (Nu_F^2 + Nu_B^2)^{1/2} \quad (1)$$

ただし、 Nu_F 、 Nu_B はそれぞれ強制対流凝縮、自由対流凝縮を表わしている。本研究で扱う混合冷媒の主成分である HFC134a 単成分凝縮熱伝達率を式(1)と比較すると、後述するように式(1)は高質量流束域、高クオリティ域で過大に予測した。本研究の目的は、混合冷媒の伝熱低下モデルを検討することにあるので、単成分系の予測式は実験データを適切に再現する必要がある。したがって、強制対流凝縮項に修正係数 C をかけて補正する。

$$Nu = [(C Nu_F)^2 + Nu_B^2]^{1/2} \quad (2)$$

3.2 二成分系 本研究では、強制対流凝縮成分と自由対流凝縮成分のそれぞれに伝熱低下係数 k_F 、 k_B をかけて修正する。

$$Nu = [(k_F C Nu_F)^2 + (k_B Nu_B)^2]^{1/2} \quad (3)$$

非共沸混合冷媒では圧力一定でも相変化とともに飽和温度が変化するので、凝縮によって、飽和温度の低下に対応する顕熱と相変化熱の両方が冷却水へ捨てられる。エネルギーの保存式は

$$\pi d q = -M_L C_{pL} \frac{dT_{Lb}}{dz} - M_G C_{pG} \frac{dT_{Gb}}{dz} + \pi d m_{co} \Delta h \quad (4)$$

である。ただし、 d は管内径、 q は熱流束、 M_L 、 M_G は液相、気相の質量流束、 C_p は等圧比熱、 dT_{Lb}/dz 、 dT_{Gb}/dz は液相と気相のバルク温度の軸方向勾配で両者は等しい。 m_{co} は単位面積単位時間当たり凝縮する質量で、 Δh は気相バルクと液相バルクの比エンタルピーの差である。気相バルクと液相バルクは飽和関係にはないので、 Δh をモデル化するには困難が多い。そこで、本モデルではバルクの状態はクオリティから計算される飽和状態に近いと仮定して、飽和状態の圧力の等しい気相と液相の比エンタルピーの差で近似する。

(1) 強制対流凝縮モデル

図 3 に示すような環状流モデルを考える。低沸点成分の保存から次式が成り立つ。

$$x_b M_L + y_b M_G = x_0 M \quad (5)$$

ただし、 x_b 、 y_b はそれぞれ液相バルク、気相バルク中の低沸点成分の質量濃度、 x_0 は循環冷媒中の低沸点成分の濃度である。

気相中の物質拡散に関する保存式は

$$\alpha_{mG} \rho_G (y_i - y_b) = (y_i - x_{co}) m_{co} \quad (6)$$

と表される。 α_{mG} は気相の物質伝達率、 y_i は気液界面の気相中の低沸点成分の質量濃度、 x_{co} は凝縮物質中の低沸点成分の質量濃度である。凝縮開始時（クオリティ $X=1$ ）は $x_{co}=x_i$ 、凝縮終了時（ $X=0$ ）は $x_{co}=y_i$ であり、 x_{co} はあるクオリティでは x_i と y_i の間にあり

$$x_{co} = x_i + \frac{y_i - x_i}{\frac{x_0 - x_i}{y_i - x_0} \left(\frac{dT}{dx_i} \right) \left(\frac{dy_i}{dT} \right) + 1} \quad (7)$$

である。式(7)の導出（方法は付録参照）にあたって、気相と液相はそれぞれ均質で飽和関係にあると仮定しているが、 x_{co} は式(7)で十分近似できる。式(6)は気液界面における気相中の濃度 y_i と凝縮物質中の濃度 x_{co} の差を気相バルクから気液界面への物質拡散で補っていることを表現している。液相の物質伝達率は気相のそれに比べて十分大きいので、液相の物質拡散抵抗は無視する。気相の物質伝達率は、二相流による増倍効果を

考慮して

$$\alpha_{mG} = 0.023 \left(\frac{M_G d}{\mu_G} \right)^{0.8} Sc_G^{0.4} (1 + 1.22 X_{ll}^{0.2})^2 \frac{D_{Gj}}{d} \dots (8)$$

と表す⁽²¹⁾。 Sc_G はシュミット数, D_{Gj} は拡散係数, X_{ll} は Lockhart- Martinelli パラメータである。

式(4)から m_{co} が求められ, 式(5)(6)を連立して解くことによって気液界面の状態(濃度と温度)が求められる。熱伝達率の低下係数は界面温度 T_i , 壁温 T_w , 飽和温度 T_{sat} を用いて

$$k_F = \frac{T_i - T_w}{T_{sat} - T_w} \dots (9)$$

と定義する。

Fig. 3 Conceptual model of forced convection condensation for a binary refrigerant (HFC32/134a)

(2) 自由対流凝縮モデル

自由対流凝縮は軸方向の流れが顕著でない系の凝縮であるから, 軸方向の質量保存式(5)は重要な意味をもたない。本来は管断面で界面温度や濃度も分布をもつと考えるべきであるが, 気相バルク温度は圧力とクオリティから計算される飽和温度に等しく, 界面はクオリティ 0 の状態に等しいと仮定すると, 図 4 のように, 式(6)の気相の物質拡散は $x_{col} = x_{il}$, $y_{bl} = y_{sat}$ として

$$\alpha_{mG} \rho_G (y_i - y_{sat}) = (y_i - x_i) m_{co} \dots (10)$$

となる。

気相の物質伝達率の見積りにあたっては, 二相増倍

係数を 1 として

$$\alpha_{mG} = 0.023 \left(\frac{M_G d}{\mu_G} \right)^{0.8} Sc_G^{0.4} \frac{D_{Gj}}{d} \dots (11)$$

とする。式(10)を満たすように気液界面温度が計算されると, 熱伝達低下係数は次式で求められる。

$$k_B = \frac{T_i - T_w}{T_{sat} - T_w} \dots (12)$$

Fig. 4 Conceptual model of free-convection condensation for a binary refrigerant (HFC32/134a)

3・3 三成分系 三成分系の熱伝達モデルは二成分系モデルを機械的に拡張することによって構成することができる。エネルギーの保存則は式(4)と同じである。

(1) 強制対流凝縮モデル

成分物質 $j(=1, 2)$ の流量の保存則は

$$x_{bj} M_L + y_{bj} M_G = x_{0j} M \quad (j=1, 2) \dots (13)$$

となる。気相中の気液界面近傍の物質拡散の保存則は

$$\alpha_{mGj} \rho_G (y_{ij} - y_{bj}) = (y_{ij} - x_{coj}) m_{co} \quad (j=1, 2) \dots (14)$$

である。ただし,

$$x_{coj} = x_{ij} + \frac{y_{ij} - x_{ij}}{x_{0j} - x_{ij} \left(\frac{dT}{dx_{ij}} \right) \left(\frac{dy_{ij}}{dT} \right) + 1} \quad (j=1, 2) \dots (15)$$

$$\alpha_{mGj} = 0.023 \left(\frac{M_G d}{\mu_G} \right)^{0.8} Sc_G^{0.4} (1 + 1.22 X_{ll}^{0.2})^2 \frac{D_{Gj}}{d} \quad (j=1, 2) \dots (16)$$

伝熱低下係数の定義は式(9)と同じである。

(2) 自由対流凝縮モデル

気相中の気液界面近傍の物質拡散の保存則は

$$\alpha_{mGj} \rho_G (y_{ij} - y_{satj}) = (y_{ij} - x_{ij}) m_{co} \quad (j=1, 2) \cdots (17)$$

である。ただし、

$$\alpha_{mGj} = 0.023 \left(\frac{M_G d}{\mu_G} \right)^{0.8} Sc_G^{0.4} \frac{D_{Gj}}{d} \quad (j=1, 2) \cdots (18)$$

伝熱低下係数は式(12)と同じように定義する。

4. 実験結果と熱伝達予測結果の比較

4.1 単一冷媒の熱伝達 単一冷媒 HFC134a について、実験結果と原口の実験式を修正した結果の比較を図5に示す。式(3)の修正係数を $C=0.85$ とすることによって、良好に予測できることが分かった。他の単一冷媒でも同様の結果が得られた。局所熱伝達率を予測するにあたっては、実験条件として圧力、クオリティ、壁温、質量流束を与えて計算した。壁温の変わりに熱流束を与えることも考えられるが、その結果は今回の結果と大きな違いはなかった。

Fig. 5 Comparison of the modified Haraguchi's equation with the experimental data for HFC134a

4.2 混合冷媒の熱伝達 図6に三成分混合冷媒の実験結果の一例を示す。区間平均熱伝達率 α 、クオリティ X 、熱流束 q 、冷却水温度 T_c 、冷媒温度の測定値 T_r 、飽和温度の計算値 T_{sat} の凝縮器入口からの変化が示されている。冷却水流路は2系統に分けられているので、冷却水温や熱流束は前半部分と後半部分で不連続になっているが、熱伝達率は熱流束に影響されないで連続して変化している。冷媒は過熱蒸気で流入し、完全

凝縮してサブクール状態で流出する。クオリティと圧力から状態方程式を用いて計算された飽和温度と測定された冷媒温度の偏差は高々 0.2°C でよく一致していた。このことから、今回用いた状態方程式は、飽和温度に関しては十分精度が高いことが確認された。

図7に質量流束による凝縮熱伝達率の変化を三成分混合冷媒と単成分冷媒を比較した結果を示す。三成分混合冷媒とその主成分である HFC134a を比較すると、低質量流束では三成分系の熱伝達率はかなり悪いが、質量流束の増加と共に HFC134a の熱伝達率に漸近してゆく。低質量流束では気液界面近傍での物質拡散抵抗に起因する伝熱低下が顕著であることが分かる。また、

Fig. 6 Example of experimental results for a HFC32/125/134a mixture

Fig. 7 Dependence of mass flux on the heat transfer coefficients

三種の単成分冷媒の熱伝達率の違いは、その物性値の違いが原因で、HFC32は熱伝導率が高く粘性係数も小さいため、他に比べて熱伝達率が高い結果となっている。

図8, 9に二成分系と三成分系の実験結果と修正原口の予測式(2)との比較を示す。どちらの系も予測値は実験値より平均して約30%高い。従って、物質伝達効果による伝熱低下を考慮する必要があることが分かる。

Fig. 8 Comparison of measured Nusselt numbers with modified Haraguchi's correlation for a HFC32/134a mixture

Fig. 9 Comparison of measured Nusselt numbers with modified Haraguchi's correlation for a HFC32/125/134a mixture

図10にHFC32/134a系の熱伝達率の測定結果と予測結果の比較を示す。今回の実験条件の範囲で、ほぼ妥当な予測を与えるが、高クオリティ域、高質量流束域で高めに予測する傾向がある。

図11にHFC32/125/134a系の比較結果を示す。高クオリティ域、高質量流束域で高めの予測をする傾向は

二成分系と同じであるが、予測誤差は±30%の範囲に入っている。物質伝達に伴う伝熱低下の修正は低質量流束、低クオリティ域で大きく、クオリティが0.1以下ではその修正が過大になり適用はできない。

Fig. 10 Comparison of predicted and measured heat transfer coefficients for a HFC32/134a mixture

Fig. 11 Comparison of predicted and measured heat transfer coefficients for a HFC32/125/134a mixture

4.3 物質伝達率 伝熱低下係数は、物質伝達係数の与え方如何によって、結果は大きく変わりうる。特に、物質伝達効果の大きい自由対流凝縮の物質伝達係数は結果に大きな影響を及ぼす。藤井ら⁽¹⁹⁾は、共存対流凝縮域の界面剪断力の実験式を求めているので、運動量伝達と物質伝達の相似則を仮定すると、物質伝達率は次式のように表わされる。

$$\alpha_{mG} = 9.8 \left(\frac{H}{Pr_L} \right)^{13/60} Ga^{-1/20} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.2} 0.023 \left(\frac{M_G d}{\mu_G} \right)^{0.8} Sc_G^{0.4} \frac{D_G}{d} \quad \dots\dots\dots(19)$$

ただし、 H は相変化数、 Ga はガリレオ数である。式(19)

の下線部が二相増倍係数である。二相増倍係数はクオリティを変数として含まず、本実験範囲では 2.0~2.4 の範囲にある。式(19)を式(11)の代わりに用いた場合の二成分系の予測結果と実験結果の比較を図 12 に示す。平均して 20%程度過大に予測する。また、二成分系の熱伝達低下係数の計算例を図 13 に示す。強制対流凝縮の低下係数はほとんど 1 であり、結果に影響を与えない。式(19)では自由対流凝縮域の気相の物質伝達率としては大きいようである。

Fig. 12 Comparison of predicted Nusselt numbers based on eq. (19) with measured ones for a HFC32/134a mixture

Fig. 13 Factors of heat transfer deterioration for a HFC32/134a mixture

6. 結 論

水平管内凝縮熱伝達を強制対流凝縮の寄与と自由対流凝縮の寄与とを合成することにより表現するという原口らの相関式に基づき、それぞれについて物質伝達による伝熱低下モデルを考え、実験結果と比較を行った。その結果、二成分系モデルを三成分系に拡張したモデルで、三成分系の熱伝達を十分予測できることを

明らかにした。

最後に、本研究の遂行にあたり貴重なご助言を頂いた齋藤孝基東京大学名誉教授と実験装置の製作にあたってご協力をいただいた三菱電機(株)山中皓郎氏に感謝申しあげます。また、本研究は文部省科学研究費(No. 06452182)の補助を受けて行われたものである。

文 献

- (1) 飛原英治, 機誌, **98**-917, (1995), 275-278.
- (2) 藤井哲, 日本冷凍協会論文集, **11**, (1994), 1-15.
- (3) Anand, N.K. and Chitti, M.S., *Proc. Japan-U.S. Seminar on Thermal Engng. For Global Environment Protection*, (1995).
- (4) Bokhanovskiy, Y.G., *Heat transfer Sov. Res.*, **12**-4, (1980), 43-45.
- (5) Tandon, T.N., ほか 2 名, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, **107**, (1985), 424-430.
- (6) Tandon, T.N., ほか 2 名, *Int. J. Refrig.*, **9**, (1986), 134-136.
- (7) 望月貞成・ほか 2 名, 機論, **54**, B(1988), 1796-1801.
- (8) 小山繁・ほか 4 名, 機論, **54**, B(1988), 1447-1452.
- (9) 小山繁・ほか 3 名, 機論, **57**, B(1991), 106-112.
- (10) 内田麻里・ほか 2 名, 日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1993), 337-339.
- (11) 五島正雄・ほか 2 名, 日本冷凍協会学術講演会講演論文集, (1994), 125-128.
- (12) 原口英剛・ほか 3 名, 日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1994), 742-744.
- (13) 五島正雄・ほか 3 名, 日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1994), 736-738.
- (14) 鳥越邦和・ほか 3 名, 空気調和・冷凍連合講演会講演論文集, (1994), 145-148.
- (15) Hihara, E. and Zhang, L., *Int. J. Heat Mass Transfer*, to be published.
- (16) 横関明道, 冷凍, **70**-808, (1995), 75-85.
- (17) Cavallini, A. and Zecchin, R., *Heat Transfer*, **3**, (1974), 309-313.
- (18) Shah, M.M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **22**, (1979), 547-556.
- (19) 藤井哲・ほか 2 名, 冷凍, **55**-627, (1980), 3-20.
- (20) 原口英剛・ほか 2 名, 機論, **60**, B(1994), 2117-2124.
- (21) 植田辰洋・井上満, 機論, **43**, B(1977), 233-240.

付録 凝縮液中の濃度の導出

二成分冷媒が等圧的に凝縮する場合を考える。凝縮の進行により飽和温度が T から $T + \Delta T$ に変化するとき、液相、気相中の低沸点成分の組成はそれぞれ、 x , y から $x' = x + (\partial x / \partial T) \Delta T$, $y' = y + (\partial y / \partial T) \Delta T$ へと変化する。ただし、 $(\partial T / \partial x)$ と $(\partial T / \partial y)$ はそれぞれ濃度の変化による沸点温度と露点温度の変化率である。クオリティは $X = (x_0 - x) / (y - x)$ から $X' = (x_0 - x') / (y' - x')$ へと変換し、液相と気相中の低沸点成分の物質保存は $x(1 - X) - x'(1 - X') = x_{co} (X' - X)$ $yX - y'X' = x_{co} (X - X')$

である。以上の式から X' を消去して、簡単な式変形を施せば式(7)を得る。