

Enhancement of Gas Absorption by utilizing Condensation and Mist formation

メタデータ	言語: jpn
	出版者:
	公開日: 2017-12-08
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: Takimoto, Akira
	メールアドレス:
	所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00049258

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



KEN
1977
1

凝縮およびミスト化によるガス吸収の促進

(研究課題番号 08650248)

平成8年度～平成9年度科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）研究成果報告書

平成10年3月

研究代表者 瀧 本 昭
(金沢大学工学部教授)



8000-60044-7

金沢大学附属図書館

は し が き

本成果報告書は、平成8年、9年度の2ヶ年間にわたり、基盤研究(C)(2)として文部省科学研究費の補助を受けて行われた研究結果をまとめたものであり、その研究組織および研究経費、さらにその成果として発表された研究論文は以下のとおりである。

研究組織

研究代表者： 瀧本 昭（金沢大学工学部・教授）
研究分担者： 林 勇二郎（金沢大学工学部・教授）
研究分担者： 多田 幸生（金沢大学工学部・助教授）
研究分担者： 松田 理（石川工業高等専門学校・助教授）

研究経費

平成8年度	1, 9 0 0 千円
平成9年度	4 0 0 千円

計	2, 3 0 0 千円
---	-------------

研究発表

口頭発表

○瀧本・小東・多田・松田「凝縮過程を利用したガス吸収の促進」

第34回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. (1997.5)

○瀧本・小東・松田「凝縮液膜およびミスト化を利用した

物理吸収法によるガス分離回収の促進」

第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol.3, B324 (1998.5.29)

研究成果

目 次

I. 研究の目的と概要

II. 凝縮を利用したガス吸収法

1. ガス吸収機構
2. ミストの発生・成長とガス吸収
3. 理論解析
4. 数値解析
5. 解析結果

III. 実験装置と方法

1. 実験装置概要
2. 実験方法
3. 各種測定法およびデータ整理法

IV. 結果および考察

1. 基礎データ
2. 冷却管内での凝縮およびミスト生成
3. ガス吸収速度
4. ガス回収率

V. まとめ

1. 研究の目的と概要

ガス吸収法は、混合ガスからの不純物の除去あるいは有用成分の回収などの工業プロセスほか、地球温暖化の要因である炭酸ガスの回収や、未踏技術としての宇宙ステーションや深海探査船内での人間活動に伴う排気ガスの処理などに関係して今日ますます重要な問題となっている。物理的吸収を対象とすると、流下液膜法あるいは噴霧液滴法などが一般的である。その吸収速度は気相中の拡散抵抗、界面抵抗、および液相内の拡散抵抗に関係するが、液相内のガス拡散係数が気相中に比べて2オーダー以上小さいため、液相内の拡散移動が支配的となる。そのため、吸収の促進を目的に界面振動や液膜攪乱などに関する研究が広く行われている。しかし、それも液相内の拡散輸送支配下では限界があり、新しいガス吸収法の開発が必要となる。

物理的ガス吸収に関する研究は比較的新しく、1950年代の日本(亀井)や米国(Univ. Delaware)での層流流下液膜へのガス吸収機構についての理論的・実験的追究が最初である。その後、米国(UCLA, Univ. Illinois)での乱流液膜流を対象にした実験的追究、ソ連の落下液滴へのガス吸収について解析、米国(Oak Ridge National Lab USA)の気流剪断力および溶解熱の影響を考慮した理論的追究、日本(京大)の数値解析など流下液膜によるガス吸収について多数の研究が報告されている。その他、日本(徳島大)では吸収式冷凍機を対象にした発熱を伴う流下液膜への吸収速度の解析や、また、最近では地球温暖化と関連して、炭酸ガス排出低減策の一つとして排出ガスからの炭酸ガス分離回収についてスピーカによる液膜表面への外部振動の効果ならびに炭酸塩水溶液膜を用いたイオン化による吸収促進について理論的実験的に追究した研究(東工大)や、噴霧液滴群によるガス吸収に関する実験的研究(東工大)などが報告されている。以上のこれまでの追究により、流下液膜および噴霧液滴へのガス吸収について十分に明らかにされている。しかし、本手法に関する従来の取り組みは全く見られないのが現状である。

本研究は、以上の観点から物理的ガス吸収を対象に、混合ガス中に含まれる凝縮性気体(水蒸気)の冷却面上への凝縮および気流中でのミスト化を利用して液相拡散支配から気相拡散支配とすることによってガス吸収速度を向上させる新たな吸収法を提案するものであり、理論的・実験的追究によりその有効性を解明し、最終的に実用化を目指すものである。具体的には、垂直冷却円管内への水蒸気-炭酸ガスの凝縮・吸収実験と、現象のモデル化にもとづく理論解析により提案したガス吸収法の有効性を明らかにした上で、実用化のためのガス吸収特性に対する装置形状としての冷却部形状・寸法の影響を理論的・実験的検討し、それより冷却形状に対する操作条件の最適化を追究したものである。

本報告書の構成は以下の通りである。

“I. 研究の目的と概要” では、本研究の社会的意義および目的が述べられる。

“II. 凝縮を利用したガス吸収法” では、本研究で提案する方式のガス吸収機構が述べられ、次いで、鉛直冷却円管を対象とした熱・物質移動現象についての基礎方程式が示され、さらに、これら基礎方程式を解くための数値解法と解析結果が示されている。また、同一液膜流量下の流下液膜法との理論的比較が行われ、本方式の有効性が検証されている。

“III. 実験装置と方法” では、本研究で用いた実験装置の概要が示され、実験方法、測定方法および結果の整理方法が述べられている。

“IV. 結果および考察” では、基礎データとして、管内の速度・温度分布が示され、次いで、冷却管内での壁面凝縮量および発生するミストについての発生条件、滴径分布、発生量などの結果、ならびにガス吸収速度およびガス回収率の結果が示され、II章の理論解析との比較のもと考察が行われている。

“V. まとめ” では各章で述べた内容につき総括的に述べられている。

II. 凝縮を利用したガス吸収法

1. ガス吸収機構

物理的ガス吸収は、溶質ガスが気相中を界面へ移動し、界面で液相に溶解し、引き続き液相中を移動していく物質移動現象である。したがって、ガス吸収速度は、各相中での拡散速度と界面抵抗により決定される。しかし、一般に液相中の拡散速度は気相中に比してはるかに遅く（拡散係数で4オーダーの差）、また界面抵抗は小さな値と考えられており、ガス吸収速度は液相内の拡散速度に支配される。

図2-1に、本研究で提案する凝縮過程を利用したガス吸収法（以下 "凝縮液膜法" と称する）を流下液膜法と比較して示す。図(a)の流下液膜法は上述した拡散速度の違いにより、ガス吸収は液相内拡散律速となる。これに対して図(b)の凝縮液膜法は、ガスと凝縮性気体を含む高温の混合気を冷却面と接触させ、水蒸気分子により凝縮液膜を形成し、同時に気流と液膜表面間のガス濃度差をポテンシャルとしてガス分子を液膜表面へ拡散輸送により吸収させる。この時、液膜表面のガス濃度は凝縮によって常に更新されるため、高いガス濃度ポテンシャルが維持されることになる。また、ガス吸収と凝縮の速度比が一定で液膜内のガス濃度は一様分布となるため、液膜内の拡散輸送は無視できる。その結果、ガス吸収は気相内ガス拡散律速となり、大幅な促進が期待される。

また、凝縮過程においては気相中に温度と蒸気濃度場が共存し、条件によっては蒸気濃度が温度に対する平衡蒸気濃度を上回る熱力学的に不安定な領域が出現する。この領域では、安定系への移行過程として、気流中に含まれる塵、埃などを核としたミストの発生が可能となり、これはガス吸収に対する二次的効果、即ち、吸収表面積の増加とガス分子の拡散距離の短縮をもたらす。

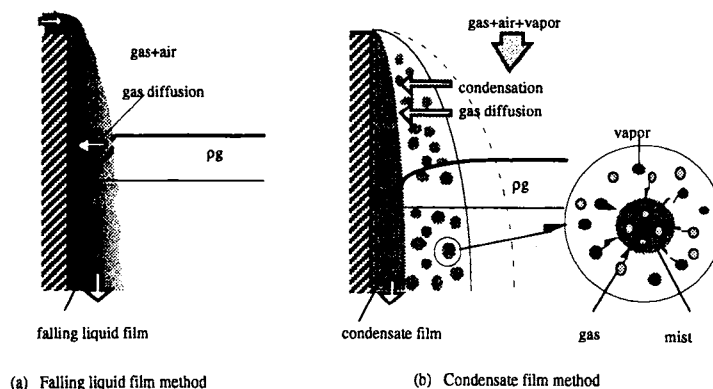


図2-1 凝縮液膜法概念

2. ミストの発生・成長とガス吸収

塵、埃などを核としたミストの発生は、蒸気濃度 ρ_v が核表面の平衡蒸気濃度 ρ_{vs} より高くなる場合に起こる。したがって、ミスト発生条件は次式で与えられる。

$$\frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = 1 \quad (2-1)$$

この条件は、凝縮過程を伴う流れ場においては、壁面での蒸気濃度勾配が平衡蒸気濃度勾配と一致する条件、すなわち

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial r} = \frac{\partial \rho_{vsat}}{\partial r} \quad (2-2)$$

で表される。

ミスト発生後、ミスト滴は過飽和状態が存在する限り成長を続ける。また、図2-2に示すように気流中に可溶性ガスが存在する場合には、ミスト滴の成長と同時にミスト滴へのガス吸収が起こる。液滴への物質移動は、ミスト発生直後のように滴径が各分子の平均自由行程に比して無視できない場合には、液滴表面への衝突が支配的であり、その後、ミスト滴が成長するにしたがい各分子の拡散移動が支配的になると考えられる。

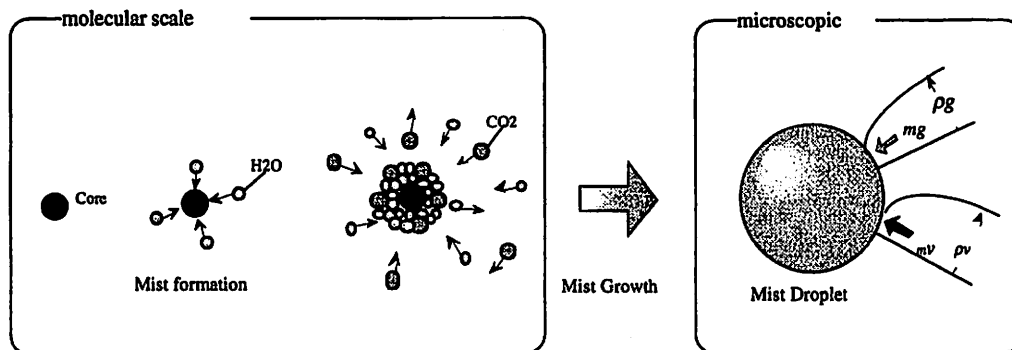


図2-2 ミスト成長とガス吸収

このような連続過程におけるミスト滴の成長速度 ρ_v^+ は、図2-3に示す単一液滴モデルにより、ミスト滴径の時間変化 (dr/dq) と関係づけて次のように表される。

$$\rho_v^+ = 4\pi r_d^2 \rho_l f_n \left(\frac{dr_d}{d\theta} \right) \quad (2-3)$$

$$\frac{dr_d}{d\theta} = \frac{1}{\rho_l R_v T} \frac{D_v (p_{v\infty} - p_{vs})}{\left\{ \frac{D_v}{\xi} \left(\frac{2\pi}{R_v T} \right)^{1/2} + \frac{r_d}{1 + \frac{l}{r_d}} \right\}} \quad (2-4)$$

ここで、 D_v は蒸気の拡散係数 (m^2/s)、 f_n は外部核数 ($\text{個}/\text{m}^3$)、 l は蒸気分子の平均自由行程 (m)、 p_{vs} は液滴表面での蒸気圧 (Pa) である。

$$l = 0.709 \nu \left(\frac{\pi}{R_v T} \right)^{1/2} \quad (2-5)$$

$$p_{vs} = p_{vsat}(T) \exp\left(\frac{2\sigma}{\rho_l r_d R_v T}\right) \quad (2-6)$$

また、 n は、動粘性係数、 p_{vsat} は飽和蒸気圧 (Pa)、 ρ_l は水の密度 (kg/m^3)、 R_v は蒸気の気体定数 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)、 ξ は凝縮係数 ($=1$)、 σ は表面張力 (N/m) である。

一方、ミスト滴へのガス吸収は、凝縮液膜へのガス吸収と同様に液相内の拡散輸送を無視でき、気相側拡散支配となる。従って、ミスト滴の成長モデルのような考え方もできるが、本研究では、ミスト滴へのガス吸収速度の解析に際し以下の仮定をおき、ガス吸収は分子拡散によって行われると考える。

(1) 液滴界面でHenryの法則が成立する。

(2) 可溶性ガスの分子衝突による移動は考えない。

この場合のガス吸収は、固体球まわりの熱移動と同様に扱うことができる。図2-4に示す単一ミスト滴へのガス吸収を考える場合、溶質ガスについての物質保存式は定常状態で次のように与えられる。

$$\frac{D_g}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \rho_g}{\partial r} \right) = 0 \quad (2-7)$$

境界条件は、次のように与えられる。

$$r = r_d \quad ; \quad \rho_g = \rho_{gi} \quad (2-8-1)$$

$$r \rightarrow \infty \quad ; \quad \rho_g = \rho_{g\infty} \quad (2-8-2)$$

式(2-7)を積分し、境界条件より積分定数を求めると液滴まわりの濃度分布は次式で与えられる。

$$\frac{\rho_g - \rho_{g\infty}}{\rho_{gi} - \rho_{g\infty}} = \frac{r_d}{r} \quad (2-9)$$

一方、ミストへの単位時間、単位体積当たりのガス吸収速度 ρ_g^+ は、物質伝達率を h_{DM} とし次式で表される。

$$\rho_g^+ = 4\pi r_d^2 f_n \left(-D_g \frac{\partial \rho_g}{\partial r} \right)_{r=r_d} = 4\pi r_d^2 f_n h_{DM} (\rho_{g\infty} - \rho_{gi}) \quad (2-10)$$

h_{DM} は式(2-9)と式(2-10)より、

$$\alpha_M = \frac{D_g}{r_d} \quad (2-11)$$

となる。さらに ρ_{gi} は、気液界面でのヘンリーの法則から次式で与えられる。

$$\rho_{gGi} = \frac{1}{R_g T} H \frac{\rho_g^+ / M_{CO_2}}{\rho_g^+ / M_{CO_2} + \rho_v^+ / M_{H_2O}} \quad (2-12)$$

ここで、 H はヘンリー一定数 (Pa)、 M は各成分の分子量 (kg)、 R_g は二酸化炭素のガス定数 (J/kgK) であり、式(2-12)を式(2-10)に代入し、 ρ_g^+ について整理すると、

$$\frac{1}{4 \pi r_d^2 f_n M_{CO_2} h_{DM}} \rho_g^{+2} + \left(\frac{\rho_v^+}{4 \pi r_d^2 f_n M_{H_2O} h_{DM}} - \frac{\rho_{g\infty}}{M_{CO_2}} + \frac{H}{M_{CO_2} R_g T} \right) \rho_g^+ - \frac{\rho_{g\infty} \rho_v^+}{M_{H_2O}} = 0 \quad (2-13)$$

となる。よって、二次方程式の解の公式より、 ρ_g^+ は次式で与えられることになる。

$$\rho_g^+ = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2-14)$$

$$A = \frac{1}{4 \pi r_d^2 f_n M_{CO_2} h_{DM}} \quad (2-15-1)$$

$$B = \frac{\rho_v^+}{4 \pi r_d^2 f_n M_{H_2O} h_{DM}} - \frac{\rho_{g\infty}}{M_{CO_2}} + \frac{H}{M_{CO_2} R_g T} \quad (2-15-2)$$

$$C = -\frac{\rho_{g\infty} \rho_v^+}{M_{H_2O}} \quad (2-15-3)$$

ここで $A \sim C$ の定数より、 ρ_g^+ が正の値になるためには、式(2-14)の平方根の前の符号がプラスにならなくてはならないので、 ρ_g^+ は次式で算出されることになる。

$$\rho_g^+ = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (2-16)$$

3. 理論解析

(1) 基礎方程式

鉛直冷却円管内の空気・水蒸気・ CO_2 からなる混合気流を対象に，管内での壁面凝縮およびミスト生成とそれに伴うガス吸収について解析を行う．図2-5に解析の対象となる物理・座標系を示す．

解析に際し，以下の仮定をおく．

(1)流れは非圧縮性定常流で，境界層近似が成り立つ．

(2)物性値は管内で一定である．（流入温度と壁面温度の算術平均を代表温度とする．）

(3)気体の濃度は気液界面における蒸気濃度およびガス濃度を除いて，温度による影響を受けない．

(4)冷却管入口で，流れは一樣な温度，濃度（未飽和）であり，速度は十分に達してる．

(5)冷却管壁温は一樣かつ一定である．

(6)壁面での凝縮層は，熱・流体力学的に気流に影響を及ぼさないものとし，その存在を無視する．

(7)ミスト滴は合体・消滅しない．

(8)ミスト滴を含む気流は分散体と見なし，気流に対するミスト滴の相対運動はない．

(9)ミスト滴の温度は気流と同一である．

(10)外部核は管入口において球形表面が薄い液膜で覆われた微小液滴として流入する．

(11)各位置の気液界面は，その断面の圧力における飽和状態にある．

(12)気液界面においてHenryの法則が成立する．

(13)簡単化のために多成分拡散効果は無視する．

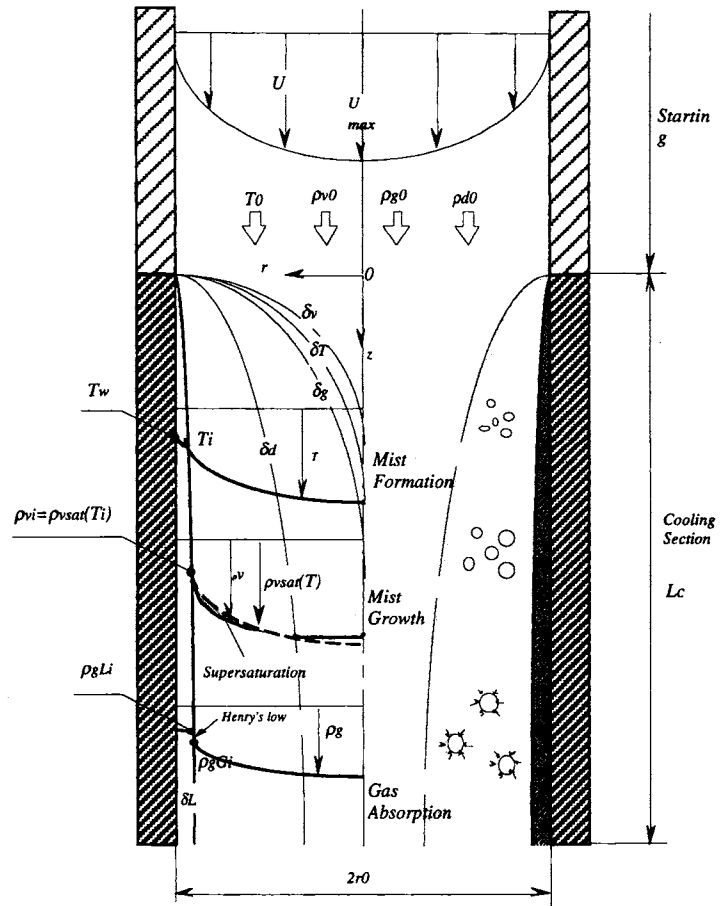


図2-5 物理および座標系

以上の仮定のもと，連続の式，エネルギー収支式および物質収支式が以下のように与えられる

【混合気体についての連続の式】

$$u \frac{\partial \rho_G}{\partial z} = -\rho_v^+ - \rho_g^+ \quad (2-17)$$

【エネルギー収支式】

$$(\rho_G C_{pG} + \rho_d C_{pd}) u \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Lv \rho_v^+ + T (C_{pG} - C_{pd}) (\rho_v^+ + \rho_g^+) \quad (2-18)$$

【物質収支式】

蒸気：
$$\rho_G u \frac{\partial w_v}{\partial z} = \frac{D_v}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_G \frac{\partial w_v}{\partial r} \right) - \rho_v^+ + (\rho_v^+ + \rho_g^+) w_v \quad (2-19)$$

可溶性ガス (CO₂)：
$$\rho_G u \frac{\partial w_g}{\partial z} = \frac{D_g}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \rho_G \frac{\partial w_g}{\partial r} \right) - \rho_g^+ + (\rho_v^+ + \rho_g^+) w_g \quad (2-20)$$

ミスト：
$$u \frac{\partial \rho_d}{\partial z} = \rho_v^+ + \rho_g^+ \quad (2-21)$$

ここで流速は，

$$u = 2 u_m \left(1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right) \quad (2-22)$$

【単位体積あたりのミスト質量 r_d とミスト滴径 r_d との関係】

$$\rho_d = \frac{4}{3} \pi (r_d - r_{d0})^3 f_n \rho_L \quad (2-23)$$

【ミスト成長速度】

$$\rho_v^+ = 4 \pi r_d^2 f_n \frac{\rho_G D_v (w_v - w_{vs})}{\left\{ \frac{D_v}{\xi} \left(\frac{2 \pi}{R_v T} \right)^{1/2} + \frac{r_d}{1 + l/r_d} \right\}} \quad (2-24)$$

【ミストへのガス吸収速度】

$$\rho_g^+ = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 A C}}{2 A} \quad (2-25)$$

ここで，

$$A = \frac{1}{4 \pi r_d^2 f_n M_{CO_2} h_{DM}} \quad (2-26-a)$$

$$B = \frac{\rho_v^+}{4 \pi r_d^2 f_n M_{H_2O} h_{DM}} - \frac{\rho_G w_g}{M_{CO_2}} + \frac{H}{M_{CO_2} R_g T} \quad (2-26-b)$$

$$C = - \frac{\rho_G \rho_v^+ w_g}{M_{H_2O}} \quad (2-26-c)$$

【各質量の関係】

各成分濃度と混合気体および流体の濃度との関係：

$$\rho_G = \rho_a + \rho_v + \rho_g, \quad \rho = \rho_G + \rho_d \quad (2-27), (2-28)$$

質量分率の定義：

$$w_v = \frac{\rho_v}{\rho_G}, \quad w_g = \frac{\rho_g}{\rho_G} \quad (2-29), (2-30)$$

(2) 境界条件

$$z=0, 0 < r < r_0 \quad ; \quad T=T_0, w_v=w_{v0} < w_{vsat}(T_0), w_g=w_{g0}, \rho_d=0, \rho_G=\rho_0, r_d=r_{d0} \quad (2-31)$$

$$r=0, 0 \leq z \leq L_c \quad ; \quad \frac{\partial T}{\partial r}=0, \frac{\partial w_v}{\partial r}=0, \frac{\partial w_g}{\partial r}=0, \frac{\partial \rho_G}{\partial r}=0, \frac{\partial \rho_d}{\partial r}=0 \quad (2-32)$$

$$r=r_0, 0 \leq z \leq L_c \quad ; \quad T=T_w, \rho_d=0, \rho_G=\rho_{Gw}=\rho_0$$

$$w_v = \frac{\rho_{vsat}(T_w)}{\rho_{Gw}}, \quad w_g = w_{gi} = \frac{1}{\rho_{Gw} R_{CO2} T_w} H \frac{m_{gcz} / M_{CO2}}{m_{gcz} / M_{CO2} + m_{vcz} / M_{H2O}} \quad (2-33)$$

(3) 管中心($r=0$)の場合

【エネルギー収支式】

管中心では、式(1-18)の $1/r$ を含む項が特異点をもつので、別個に考えなければならない。そこで、 (dT/dr) を r について Maclaurin 展開し、 $(dT/dr)=0$ の条件を用いると、

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \quad (2-34)$$

となる。したがって、式(1-18)は $r=0$ で、

$$\left(\rho_G C_{pG} + \rho_d C_{pd} \right) u \frac{\partial T}{\partial z} = 2k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + Lv \rho_v^+ + T \left(C_{pG} - C_{pd} \right) \left(\rho_v^+ + \rho_g^+ \right) \quad (2-35)$$

となる。

【物質収支式】

式(2-19)を変形すると以下のようになる

$$\rho_G u \frac{\partial w_v}{\partial z} = D_v \left(\frac{\rho_G}{r} + \frac{\partial \rho_G}{\partial r} \right) \frac{\partial w_v}{\partial r} + D_v \rho_G \frac{\partial^2 w_v}{\partial r^2} - \rho_v^+ + \left(\rho_v^+ + \rho_g^+ \right) w_v \quad (2-36)$$

境界条件より $\partial r_G / \partial r = 0$ 、式(2-34)より式(2-36)は $r=0$ で

$$\rho_G u \frac{\partial w_v}{\partial z} = 2 D_v \rho_G \frac{\partial^2 w_v}{\partial r^2} - \rho_v^+ + \left(\rho_v^+ + \rho_g^+ \right) w_v \quad (2-37)$$

となる。式(2-20)についても同様。

(4) 全伝熱量、凝縮速度、ガス吸収速度

冷却壁面への伝熱量は、管内の温度勾配による顕熱移動と蒸気の壁面凝縮に伴う潜熱移動の和となり、局所熱流束 q_z は次式で表される。

$$q_z = -k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} + L_v m_{vz} \quad (2-38)$$

ここで L_v , m_{vcz} は凝縮潜熱および壁面への局所凝縮速度である。壁面への局所凝縮速度 m_{vcz} および凝縮液への局所ガス吸収速度 m_{gcz} については、物質移動速度が小さいので、熱と物質移動のアナロジーが成立するものと考え、それぞれ次のように表される。

$$m_{vcz} = -\rho_{Gw} D_v \left(\frac{\partial w_v}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad m_{gcz} = -\rho_{Gw} D_g \left(\frac{\partial w_g}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (2-39), (2-40)$$

したがって、半径 r_0 、冷却長さ L_c の鉛直冷却円管内壁面への全伝熱量 Q_w 、全凝縮速度 M_{vc} および凝縮液膜への全ガス吸収速度 M_{gcf} は次式で算出される。

$$Q_w = \int_0^{L_c} 2\pi r_0 q_z dz \quad (2-41)$$

$$M_{vc} = \int_0^{L_c} 2\pi r_0 m_{vcz} dz \quad (2-42)$$

$$M_{gcf} = \int_0^{L_c} 2\pi r_0 m_{gcz} dz \quad (2-43)$$

一方、管内での局所的なミスト発生速度 m_{vmz} およびミストへのガス吸収速度 m_{gmz} は、局所値としてそれぞれ次のように表され、

$$m_{vmz} = \int_0^{r_0} 2\pi r \rho_v^+ dr \quad (2-44)$$

$$m_{gmz} = \int_0^{r_0} 2\pi r \rho_g^+ dr \quad (2-45)$$

よって、管内での全ミスト発生速度 M_{vm} 及びミストへの全ガス吸収速度 M_{gm} は次式で算出される。

$$M_{vm} = \int_0^{L_c} m_{vmz} dz \quad (2-46)$$

$$M_{gm} = \int_0^{L_c} m_{gmz} dz \quad (2-47)$$

4. 数値解析

(1) 差分近似

前節の基礎式について、図2-6に示す差分座標系のもと陰的差分法を用いた数値解析を行う。差分格子は、計算精度の向上と計算時間の短縮のため、 r 方向については壁面近傍ほど細かく分割された不等間隔格子を、 z 方向については先端ほど細かく分割された不等間隔格子を用いる。

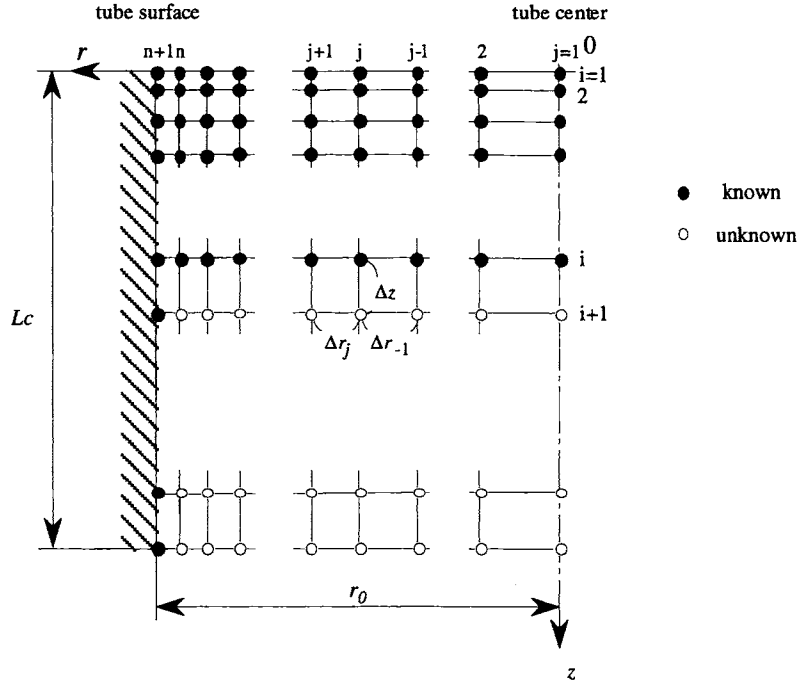


図2-6 差分座標系

差分近似には、 z 方向に前進差分、 r 方向に中心差分を用いる。すなわち、 f が各変数に対応するとし、各微分項は次のように表される。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\Phi_{i+1,j} - \Phi_{i,j}}{\Delta z} \quad (2-48-1)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} = \Delta R_A \Phi_{i+1,j+1} - \Delta R_B \Phi_{i+1,j-1} + \Delta R_C \Phi_{i+1,j} \quad (2-48-2)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} = \Delta R_D \Phi_{i+1,j+1} + \Delta R_E \Phi_{i+1,j-1} - \Delta R_F \Phi_{i+1,j} \quad (2-48-3)$$

ここで、

$$\Delta R_A = \frac{\Delta r_{j-1}}{\Delta r_j (\Delta r_j + \Delta r_{j-1})}, \quad \Delta R_B = \frac{\Delta r_j}{\Delta r_{j-1} (\Delta r_j + \Delta r_{j-1})}, \quad \Delta R_C = \frac{\Delta r_j - \Delta r_{j-1}}{\Delta r_j \Delta r_{j-1}} \quad (2-49-1), (2-49-2), (2-49-3)$$

$$\Delta R_D = \frac{2}{\Delta r_j (\Delta r_j + \Delta r_{j-1})}, \quad \Delta R_E = \frac{2}{\Delta r_{j-1} (\Delta r_j + \Delta r_{j-1})}, \quad \Delta R_F = \frac{2}{\Delta r_j \Delta r_{j-1}} \quad (2-50-1), (2-50-2), (2-50-3)$$

(2)差分近似式

【混合気体についての連続の式】

式(2-17)に式(2-48-1)を適用して,

$$u_j \frac{\rho_{G i+1, j} - \rho_{G i, j}}{\Delta Z} = -\rho_{v i+1, j}^+ - \rho_{g i+1, j}^+ \quad (2-51)$$

上式から $\rho_{G i+1, j}$ が算出される.

【エネルギー収支式】

式(2-18)に式(2-48-1)～式(2-48-3)を適用すると次のようになる.

$$\begin{aligned} & (\rho_{G i+1, j} C_{pG} + \rho_{d i+1, j} C_{pd}) u_j \frac{T_{i+1, j} - T_{i, j}}{\Delta Z} = \frac{k}{r_j} (\Delta R_A T_{i+1, j+1} - \Delta R_B T_{i+1, j-1} + \Delta R_C T_{i+1, j}) \\ & + k (\Delta R_D T_{i+1, j+1} + \Delta R_E T_{i+1, j-1} - \Delta R_F T_{i+1, j}) + Lv \rho_{v i+1, j}^+ + T_{i+1, j} (C_{pG} - C_{pd}) (\rho_{v i+1, j}^+ + \rho_{g i+1, j}^+) \end{aligned} \quad (2-52)$$

管中心($j=1$)の場合は,

$$\begin{aligned} & (\rho_{G i+1, 1} C_{pG} + \rho_{d i+1, 1} C_{pd}) u_1 \frac{T_{i+1, 1} - T_{i, 1}}{\Delta Z} \\ & = 2k (\Delta R_D T_{i+1, 2} + \Delta R_E T_{i+1, 0} - \Delta R_F T_{i+1, 1}) + Lv \rho_{v i+1, 1}^+ + T_{i+1, 1} (C_{pG} - C_{pd}) (\rho_{v i+1, 1}^+ + \rho_{g i+1, 1}^+) \end{aligned} \quad (2-53)$$

ここで境界条件より, $T_{i+1, 2} = T_{i+1, 0}$, $Dr_1 = Dr_0$ ($\nabla DR_D = DR_E = 1/(Dr_1)^2$) となり, したがって式(2-53)

は以下のようになる.

$$\begin{aligned} & (\rho_{G i+1, 1} C_{pG} + \rho_{d i+1, 1} C_{pd}) u_1 \frac{T_{i+1, 1} - T_{i, 1}}{\Delta Z} \\ & = \frac{4k}{\Delta r_1^2} (T_{i+1, 2} - T_{i+1, 1}) + Lv \rho_{v i+1, 1}^+ + T_{i+1, 1} (C_{pG} - C_{pd}) (\rho_{v i+1, 1}^+ + \rho_{g i+1, 1}^+) \end{aligned} \quad (2-54)$$

次に式(2-52)および式(2-54)を T について整理する.

$$A_j T_{i+1, j+1} + B_j T_{i+1, j} + C_j T_{i+1, j-1} = D_j \quad (2-55)$$

ここで,

$$A_j = k \left(\frac{\Delta R_B}{r_j} - \Delta R_E \right) \quad (2-56-1)$$

$$B_j = (\rho_{G i+1, j} C_{pG} + \rho_{d i+1, j} C_{pd}) \frac{u_j}{\Delta Z} + k \left(\Delta R_F - \frac{\Delta R_C}{r_j} \right) \quad (2-56-2)$$

$$C_j = -k \left(\frac{\Delta R_A}{r_j} + \Delta R_D \right) \quad (2-56-3)$$

$$D_j = (\rho_{G i+1, j} C_p + \rho_{d i+1, j} C_{pd}) \frac{u_j}{\Delta Z} T_{i, j} + Lv \rho_{v i+1, j}^+ + (C_{pG} - C_{pd}) (\rho_{v i+1, j}^+ + \rho_{g i+1, j}^+) T_{i, j} \quad (2-56-4)$$

ただし, $j=1$ (管中心) の場合は,

$$A_1 = 0 \quad (2-57-1)$$

$$B_1 = \left(\rho_{G i+1,1} C_{pG} + \rho_{d i+1,1} C_{pd} \right) \frac{u_1}{\Delta z} + \frac{4k}{\Delta r_1^2} \quad (2-57-2)$$

$$C_1 = -\frac{4k}{\Delta r_1^2} \quad (2-57-3)$$

$$D_1 = \left(\rho_{G i+1,1} C_{pG} + \rho_{d i+1,1} C_{pd} \right) \frac{u_1}{\Delta z} T_{i,1} + Lv \rho_{v i+1,1}^+ + (C_{pG} - C_{pd}) (\rho_{v i+1,1}^+ + \rho_{g i+1,1}^+) T_{i,1} \quad (2-57-4)$$

また、境界条件より、

$$T_{i+1,n+1} = T_w \quad (2-58)$$

いま、未知数は $T_1 \sim T_n$ までの n 個であるのに対し、格子点 $j = 1 \sim n$ について、式 (2-55) より n 個の式が得られる。これらをマトリックスを用いて表すと次のようになる。

$$\begin{bmatrix} B & C_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ A & B & C_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A_{-1} & B_{-1} & C_{n-1} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i+1,1} \\ T_{i+1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_{i+1,n-1} \\ T_{i+1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ D \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ D_{-1} \\ D - C_n T_{i+1,n+1} \end{bmatrix} \quad (2-59)$$

式 (2-59) を解くことにより、 $T_{i+1,j}$ の値が求められる。

【物質収支】

(蒸気)

式(2-19)に式(2-48-1)～式(2-48-3)を適用すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \rho_{G i+1,j} u_j \frac{w_{v i+1,j} - w_{v i,j}}{\Delta z} = \\ D_v \left(\frac{\rho_{G i+1,j}}{r_j} + \Delta R_A \rho_{G i+1,j+1} - \Delta R_B \rho_{G i+1,j-1} + \Delta R_C \rho_{G i+1,j} \right) \left(\Delta R_A w_{v i+1,j+1} - \Delta R_B w_{v i+1,j-1} + \Delta R_C w_{v i+1,j} \right) \\ + D_v \left(\Delta R_D w_{v i+1,j+1} + \Delta R_E w_{v i+1,j-1} - \Delta R_F w_{v i+1,j} \right) - \rho_{v i+1,j}^+ + (\rho_{v i+1,j}^+ + \rho_{g i+1,j}^+) w_{v i,j} \end{aligned} \quad (2-60)$$

また、管中心($j=1$)の場合は、

$$\begin{aligned} \rho_{G i+1,1} u_1 \frac{w_{v i+1,1} - w_{v i,1}}{\Delta z} = \\ 2 D_v \rho_{G i+1,1} \left(\Delta R_D w_{v i+1,2} + \Delta R_E w_{v i+1,0} - \Delta R_F w_{v i+1,1} \right) - \rho_{v i+1,1}^+ + (\rho_{v i+1,1}^+ + \rho_{g i+1,1}^+) w_{v i,1} \end{aligned} \quad (2-61)$$

となる。ここで境界条件より、 $w_{v i+1,2} = w_{v i+1,0}$ 、 $Dr_1 = Dr_0$ ($\nabla DR_D = DR_E = 1/(Dr_1)^2$) となり、した

がって式(2-61)は次のように書き換えられる。

$$\rho_{G i+1,1} u_1 \frac{w_{v i+1,1} - w_{v i,1}}{\Delta z} = \frac{4 D_v \rho_{G i+1,1}}{\Delta r_1^2} (w_{v i+1,2} - w_{v i+1,1}) - \rho_{v i+1,1}^+ + (\rho_{v i+1,1}^+ + \rho_{g i+1,1}^+) w_{v i,1} \quad (2-62)$$

次に式(2-60)および式(2-62)を w_v について整理する。

$$A_j w_{v i+1,j-1} + B_j w_{v i+1,j} + C_j w_{v i+1,j+1} = D_j \quad (2-63)$$

ここで,

$$A_j = D_v (X_j \Delta R_B - \rho_{G i+1,j} \Delta R_E) \quad (2-64-1)$$

$$B_j = \frac{\rho_{G i+1,j} u_j}{\Delta z} - D_v (X_j \Delta R_C - \rho_{G i+1,j} \Delta R_F) \quad (2-64-2)$$

$$C_j = -D_v (X_j \Delta R_A + \rho_{G i+1,j} \Delta R_D) \quad (2-64-3)$$

$$D_j = \frac{\rho_{G i+1,j} u_j}{\Delta z} w_{v i,j} - \rho_{v i+1,j}^+ + (\rho_{v i+1,j}^+ + \rho_{g i+1,j}^+) w_{v i,j} \quad (2-64-4)$$

$$X_j = \frac{\rho_{G i+1,j}}{r_j} + \Delta R_A \rho_{G i+1,j+1} - \Delta R_B \rho_{G i+1,j-1} + \Delta R_C \rho_{G i+1,j} \quad (2-64-5)$$

ただし, $j=1$ (管中心) では,

$$A_1 = 0 \quad (2-65-1)$$

$$B_1 = \frac{\rho_{G i+1,1} u_1}{\Delta z} + \frac{4 D_v \rho_{G i+1,1}}{\Delta r_1^2} \quad (2-65-2)$$

$$C_1 = -\frac{4 D_v \rho_{G i+1,1}}{\Delta r_1^2} \quad (2-65-3)$$

$$D_1 = \frac{\rho_{G i+1,1} u_1}{\Delta z} w_{v i,1} - \rho_{v i+1,1}^+ + (\rho_{v i+1,1}^+ + \rho_{g i+1,1}^+) w_{v i,1} \quad (2-65-4)$$

また, 境界条件より,

$$w_{v i+1,n+1} = w_{vw} \quad (2-66)$$

温度場の場合と同様に, 式(2-63)より n 個の式が得られる。これらをマトリックスを用いて表すと次式
のようになる。

$$\begin{bmatrix} B & C_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ A & B & C_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \vdots & & & & & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A_{-1} & B_{-1} & C_{n-1} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{v i+1,1} \\ w_{v i+1,2} \\ \vdots \\ \vdots \\ w_{v i+1,n-1} \\ w_{v i+1,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D \\ D \\ \vdots \\ \vdots \\ D_{-1} \\ D - C_n w_{v i+1,n+1} \end{bmatrix} \quad (2-67)$$

式(2-67を解くことにより, $w_{vi+1,j}$ の値が求められる。

(可溶性ガス)

蒸気の場合と同様。

(ミスト)

混合気体の場合と同様。

【壁面熱・物質流束】

$$q_z = -k \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{(\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)^2 T_{i+1,n} - \Delta r_n^2 T_{i+1,n-1}}{\Delta r_{n-1} \Delta r_n (\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)} - \frac{(2 \Delta r_n + \Delta r_{n-1}) T_{i+1,n+1}}{\Delta r_n (\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)} \quad (2-68-1)$$

$$m_{vz} = -\rho_G D_v \left(\frac{\partial w_v}{\partial r} \right) = \rho_{G i+1,n+1} D_v \left(\frac{(\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)^2 w_{vi+1,n} - \Delta r_n^2 w_{vi+1,n-1}}{\Delta r_{n-1} \Delta r_n (\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)} - \frac{(2 \Delta r_n + \Delta r_{n-1}) w_{vi+1,n+1}}{\Delta r_n (\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)} \right) \quad (2-68-2)$$

$$m_{gz} = -\rho_G D_g \left(\frac{\partial \rho_g}{\partial r} \right) = \rho_{G i+1,n+1} D_g \left(\frac{(\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)^2 w_{gi+1,n} - \Delta r_n^2 w_{gi+1,n-1}}{\Delta r_{n-1} \Delta r_n (\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)} - \frac{(2 \Delta r_n + \Delta r_{n-1}) w_{gi+1,n+1}}{\Delta r_n (\Delta r_{n-1} + \Delta r_n)} \right) \quad (2-68-3)$$

(3)解法

数値解法の手順を図2-7のフローチャートと併せて示す。計算は, $z = 0$ の境界条件を設定し, z 方向に Dz 進んだ位置において反復計算を開始する。反復計算は以下に示す手順で行う。

1) $r_{vA}^+ = 0, r_{gA}^+ = 0$ とする。

2)式(2-51)および同様な式から, r_G, r_d を求め, 式(2-23)より r_d を算出する。

3)温度, 蒸気濃度およびガス濃度場を解く。

4) $w_v - w_{vs} > 0$ のミスト発生域において, 式(2-24)および式(2-25)から r_{vB}^+, r_{gB}^+ を算出する。

5) r_v^+, r_g^+ が収束しているか判定する。

$$\text{収束条件 } Dr_v = |(r_{vA}^+ - r_{vB}^+) / r_{vA}^+| < 10^{-4} \quad (2-69-1)$$

$$Dr_g = |(r_{gA}^+ - r_{gB}^+) / r_{gA}^+| < 10^{-4} \quad (2-69-2)$$

6)収束していれば(7)へ進み、そうでなければ r_{vA}^+ , r_{gA}^+ を次のように設定し直し, (2)へ戻る.

$\rho_{vB}^+ > \rho_{vA}^+$ の場合:

$$\rho_{vA}^+ = (\rho_{vB}^+ - \rho_{vA}^+) \times 0.5 + \rho_{vA}^+ \quad (2-70-1)$$

$\rho_{vB}^+ < \rho_{vA}^+$ の場合:

$$\rho_{vA}^+ = (\rho_{vB}^+ - \rho_{vA}^+) \times 0.1 + \rho_{vA}^+ \quad (2-70-2)$$

ρ_{gA}^+ についても同様.

(7) 局所熱流束 q_z , 局所物質流束 m_{vcz} , m_{gcZ} , 局所ミスト発生速度 m_{vmz} およびミストへのガス吸収量の局所値 m_{gmz} を求める.

(8) z が出口に達するまで, z を Dz 進めて(1)へ戻る.

以上のように $z(i)$ レベルの既知量を用い, $z+Dz(i+1)$ レベルの値を z が出口に達するまで前進的に求めていく.

計算は, 管直径 $d = 9.09$ mm, 壁面温度 $T_w = 3$ °C, 外部核数 $f_n = 10^8$ 個/m³の一定もとで寸法形状(Lc)および操作条件 (T_0 , u_m , r_{v0} , r_{g0}) を種々変化させて行った. なお外部核数については, 実験装置空気溜まり部内において, パーティクルカウンターを用いて測定した平均的な値である.

また, 格子間隔については, r 方向は 50 分割の不等間隔格子とし, 各間隔は公比が 1.01 の等比数列となるようにした. すなわち, 最も壁面寄りの格子間隔を Δr_n とすると, 各格子間隔は次式で算出される.

$$\Delta r_j = \Delta r_n 1.01^{(n-j)} \quad (2-71)$$

一方, z 方向は, 管入口直後の初期値 $Dz_1 = 10^{-7}$ mm から $Dz = 5.0$ mm までは次式より算出される不等間隔格子とし, その後は $Dz = 5.0$ mm の等間隔格子とした.

$$\Delta z_{i+1} = 1.01 \Delta z_i \quad (2-72)$$

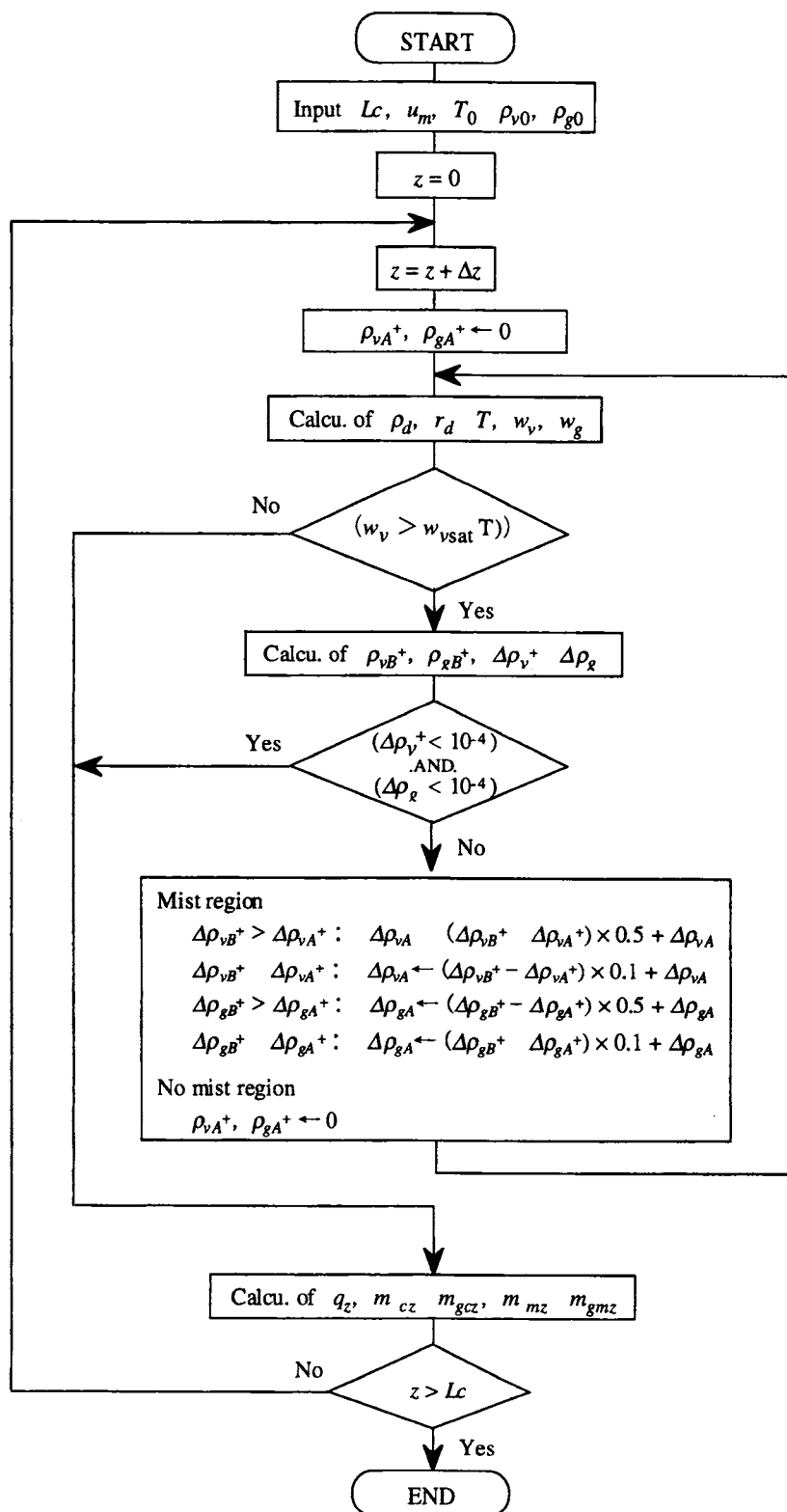


図2-6 フローチャート

5. 解析結果

本解析の妥当性を検討するために、ミスト未発生時の解析結果を従来の管内層流熱伝達についての結果と比較した。十分に流れが発達した層流で壁温が一定の場合に円管内の平均熱伝達率を与える近似式として、次の Hausen の式が挙げられる。

$$\text{Nu}_{dm} = \frac{\alpha_m d}{k} = 3.66 + \frac{0.0668 \text{Re}_d \text{Pr}(d/z)}{1 + 0.04 \{\text{Re}_d \text{Pr}(d/z)\}^{2/3}} \quad (2-73)$$

ここで α_m は対数平均温度差による平均熱伝達率で次式で与えられる。

$$\alpha_m = \frac{Q}{A \frac{(T_{b1} - T_w) - (T_{b2} - T_w)}{\ln[(T_{b1} - T_w)/(T_{b2} - T_w)]}} \quad (2-74)$$

ここで、 A は伝熱面積 (m^2)、 Q は伝熱量 (W)、 T_{b1} は管入口での混合平均温度 ($= T_0$)、 T_{b2} は入口からの距離 z での混合平均温度である。

また、熱伝達と物質伝達の相似性より、物質伝達率についても同様な式が考えられる。すなわち、対数平均濃度差による平均物質伝達率を h_{Dm} 、拡散係数を D とするとシャーウッド数 Sh_{dm} は次式で与えられる。

$$\text{Sh}_{dm} = \frac{h_{Dm} d}{D} = 3.66 + \frac{0.0668 \text{Re}_d \text{Sc}(d/z)}{1 + 0.04 \{\text{Re}_d \text{Sc}(d/z)\}^{2/3}} \quad (2-75)$$

図2-7にミスト未発生時の解析結果と Hausen の式を比較した結果を示す。本解析結果は、管入口直後では Hausen の式よりも若干低い値になっているが、その後はよく一致しており、本解析の妥当性が確認できる。また、熱・物質収支については、次式で定義される冷却管内での熱・物質収支が、全計算範囲において各々 $100 \pm 5\%$ 以内で一致しており、本解析は十分な精度を有すると考えられる。

$$Y_Q = \frac{\text{冷却管内でのエネルギー損失量}}{\text{壁面への移動量 [式(2-41)]}} \times 100 [\%] \quad (2-76)$$

$$Y_{Mv} = \frac{\text{冷却管内での物質損失量}}{\text{壁面への凝縮量 [式(2-42)] + ミスト発生量 [式(2-46)]}} \times 100 [\%] \quad (2-77)$$

$$Y_{Mg} = \frac{\text{冷却管内での物質損失量}}{\text{壁面凝縮液への吸収量 [式(2-43)] + ミストへの吸収量 [式(2-47)]}} \times 100 [\%] \quad (2-78)$$

図2-8, 2-9に冷却管内で発生するミストの成長速度 ρ_v^+ および単位体積当たりのミストへのガス吸収速度 ρ_g^+ の分布および流れ方向変化を示す。ミスト成長速度は管壁付近でピークを有する分布を示し、流れ方向に対して最大値を示す。すなわち、最初は、温度場と蒸気濃度場の発達に関係する過飽和状態の増大速度が、ミスト発生による緩和速度よりも速いためにミスト発生速度は増加し、その後ミスト滴の成長に伴い過飽和状態が緩和されていく結果、ミスト発生速度が減少していくもの推察される。また、単位体積当たりのミストへのガス吸収速度は、ミスト成長速度と同様な分布および流れ方向の変化を示し、これより、両者が相似的な関係にあることがわかる。

図2-10, 2-11にミスト質量濃度 ρ_d およびミスト滴径 dp の分布を示す。ミスト成長速度と単位体積当たりのミストへのガス吸収速度の積分値であるミスト質量濃度は、壁面近傍で最大値になる分布を示し、ミストの成長に伴い流れ方向に増加している。これより壁面近傍ほどミスト発生量が多いことになるが、これは外部核数を一定として解析を行っているためであり、必ずしも現実的なものではない。一般に、外部核数 f_n は管壁近傍ほど粗になると考えられ、したがって、壁面近傍のミスト成長速度は外部核数一定と考えた場合よりも小さくなり、その積分値であるミスト質量濃度も低くなると考えられる。よって、実際には、ミスト質量濃度分布は壁面付近でピークをもつ分布になると推測される。また、滴径分布は、滴径が式(2-23)より与えられるため、ミスト質量濃度分布と同様な分布になる。

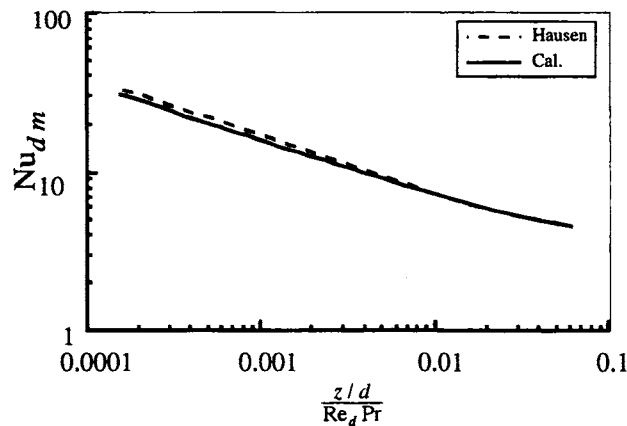
図2-12～14にミスト発生時の温度 T 、蒸気濃度 ρ_v およびガス濃度 ρ_g の分布を未発生時（破線）と比較して示す。ミスト発生の影響としては、温度および蒸気濃度分布については、ミスト発生に伴う凝縮潜熱の放出と蒸気の液滴化により、若干の温度上昇と濃度減少が現れている。また、ガス濃度分布については、絶対濃度は管壁付近で大きく減少し、管中心付近で増加する分布となり、質量分率は管壁付近で高くなる分布を示すようになっている。これは、管壁付近ではミスト発生量が多く、ミストへのガス吸収により絶対ガス濃度は減少するが、混合気体の濃度も減少するため質量分率は増加し、それによって管中心方向への拡散が起り、管中心付近の絶対濃度が増加するものと考えられる。

なお、壁面への凝縮速度、ミスト発生速度、ガス吸収速度等は、実験結果とともにIVに示す。

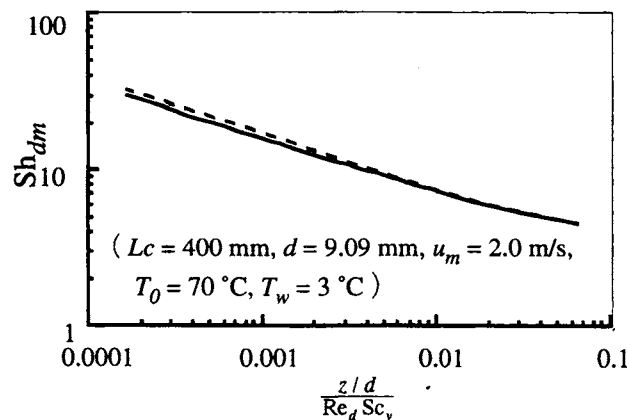
本方式の有効性を検討するために、従来法の一つである流下液膜法との比較を行った。比較に際しては、凝縮液膜法の凝縮速度（ミスト発生速度を含む）と流下液膜法の液膜流量を同一とし、流下液膜温度に凝縮液膜法の流入温度と壁面温度の算術平均値を用いた。

図2-13に、ガス吸収速度と入口ガス濃度の関係を示す。ガス吸収速度は入口ガス濃度の増加に伴い増加

し、凝縮液膜法 M_{gc} が流下液膜法 M_{gf} に比して流入ガス濃度に無関係に約2.2倍大きいものとなっている。これより、本方式の有効性が明らかと言える。なお、ガス吸収の気相拡散律速化による大幅な促進効果が凝縮液膜法に現れていないのは、液膜流量（＝凝縮液膜法における凝縮量）が少ないために形成液膜厚さが薄く、流下液膜法においても液相内の拡散をほとんど無視できるようになるためと考えられる。次に、図2-14(a)～(f)に、冷却円管寸法および各種操作パラメータに対する凝縮液膜法のガス吸収の促進効果について、凝縮液膜法と流下液膜法とのガス吸収速度比として示す。この結果より吸収速度比は、入口温度の増加に伴い大きくなり、その他のパラメータに対しては無関係であることがわかる。なお、温度の上昇による吸収速度比の増大は、温度上昇により流下液膜法の溶解度が低下する結果、流下液膜法の吸収速度が低下するためである。また、その他のパラメータの影響を受けない理由は、前述したように気相拡散律速化による吸収促進効果が凝縮液膜法に現れていないためである。



(a) 熱伝達率 ($\rho_{v0} = \rho_{g0} = 0 \text{ kg/m}^3$)



(b) 物質伝達率 ($\rho_{v0} = 0.02 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{g0} = 0.1 \text{ kg/m}^3$)

図2-7 Hausen の式との比較

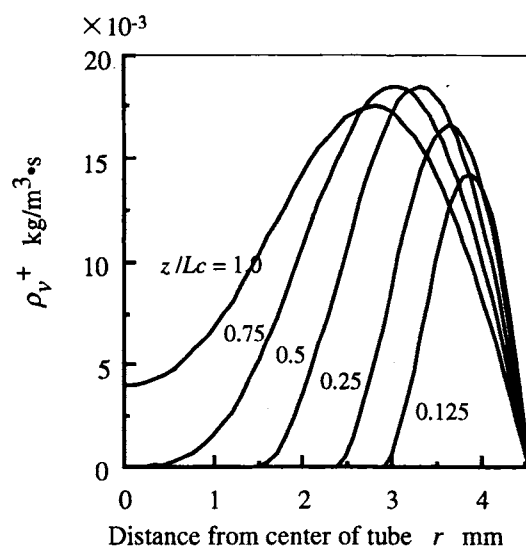


図2-8 ミスト成長速度
 $(Lc = 400 \text{ mm}, d = 9.09 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 70$
 $^\circ\text{C}, T_w = 3^\circ\text{C}, \rho_{v0} = 0.15 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.1 \text{ kg/m}^3)$

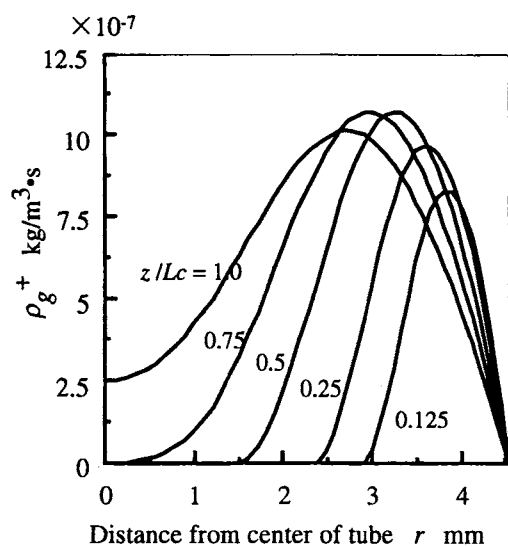


図2-9 単位体積当たりのミストへのガス吸収速度
 $(Lc = 400 \text{ mm}, d = 9.09 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 70$
 $^\circ\text{C}, T_w = 3^\circ\text{C}, \rho_{v0} = 0.15 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.1 \text{ kg/m}^3)$

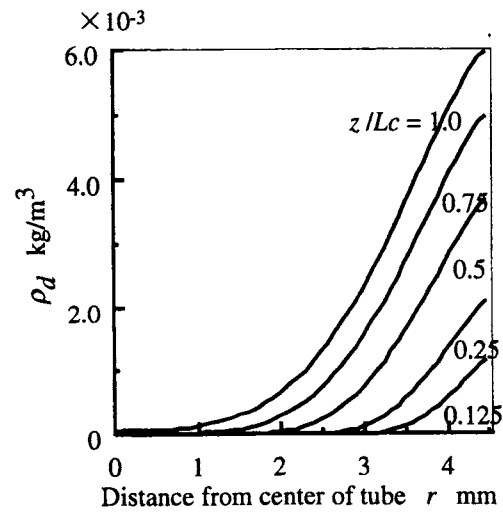


図2-10 ミスト質量濃度分布

($Lc = 400 \text{ mm}$, $d = 9.09 \text{ mm}$, $u_m = 2.0 \text{ m/s}$, $T_0 = 70$
 $^{\circ}\text{C}$, $T_w = 3^{\circ}\text{C}$, $\rho_{v0} = 0.15 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{g0} = 0.1 \text{ kg/m}^3$)

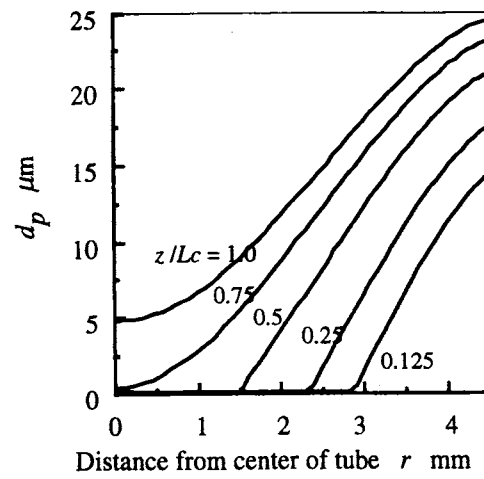
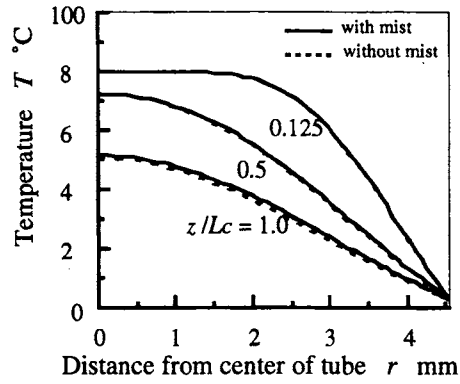
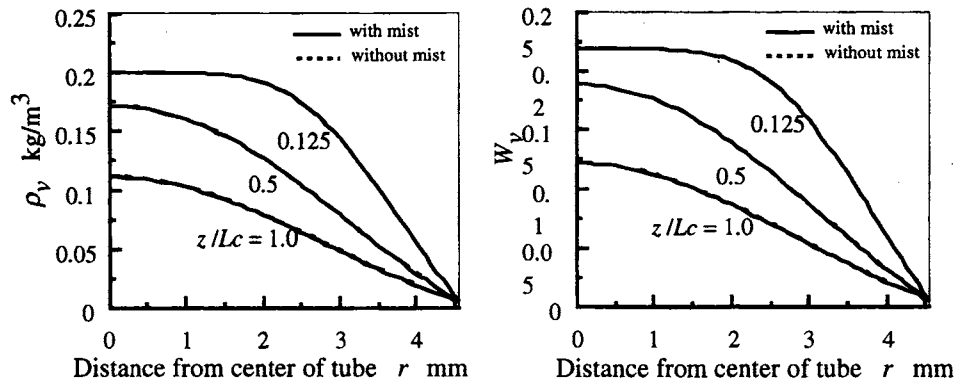


図2-11 ミスト滴径分布

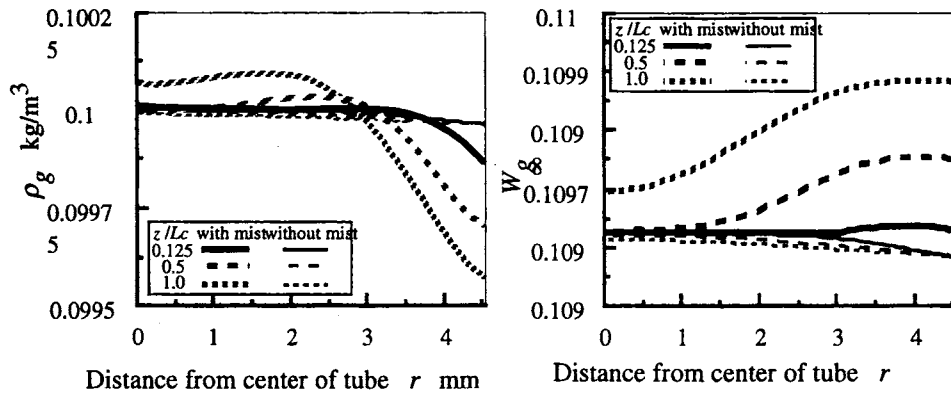
($Lc = 400 \text{ mm}$, $d = 9.09 \text{ mm}$, $u_m = 2.0 \text{ m/s}$, $T_0 = 70$
 $^{\circ}\text{C}$, $T_w = 3^{\circ}\text{C}$, $\rho_{v0} = 0.15 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{g0} = 0.1 \text{ kg/m}^3$)



(a) 温度分布



(b) 蒸気濃度分布



(c) ガス濃度分布

図2-12 温度分布，蒸気濃度分布およびガス濃度分布

($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $u_m = 2.0$ m/s, $T_0 = 70$ °C, $T_w = 3$ °C, $\rho_{v0} = 0.15$ kg/m³, $\rho_{g0} = 0.1$ kg/m³)

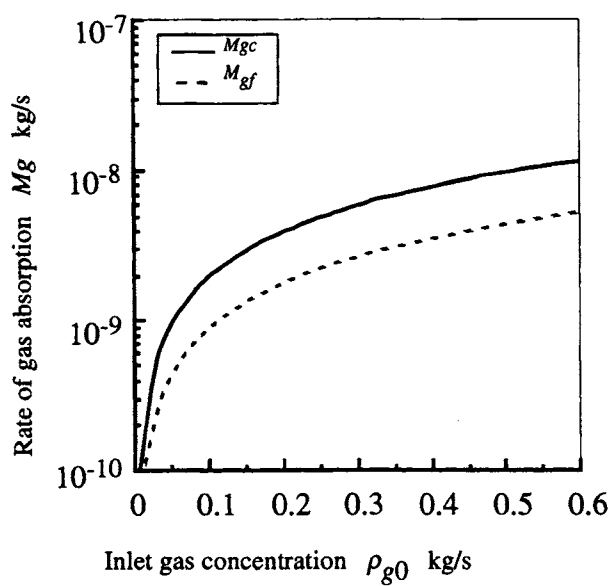


図2-13 ガス吸収速度（流下液膜法との比較）

($L = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $u_m = 2.0$ m/s, $T_0 = 70$ °C, $T_w = 3$ °C, $\rho_{v0} = 0.15$ kg/m³)

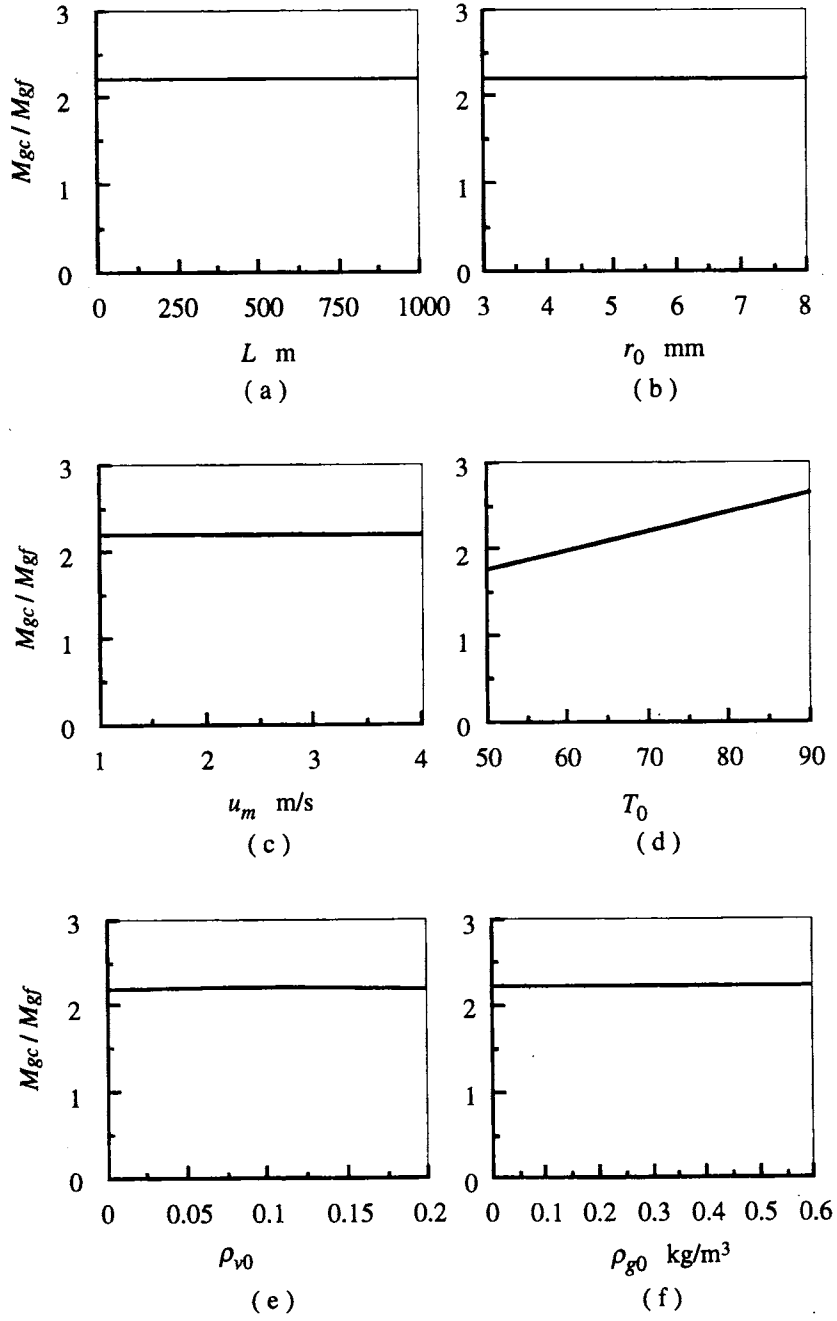


図2-14 各種パラメータに対する吸収速度比の変化
 $\left(Lc = 400 \text{ mm}, r = 4.545 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 70 \text{ }^\circ\text{C}, T_w = 3 \text{ }^\circ\text{C} \right)$
 $\left(\rho_{v0} = 0.075 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.3 \text{ kg/m}^3 \right)$

III. 実験装置と方法

1. 実験装置概要

実験装置の概要図を図3-1に示す。装置は、混合ガス中の水蒸気を壁面凝縮させることによってガス吸収を行う実験主要部、所定の流速、温度、蒸気濃度、CO₂濃度をもつ混合ガスを実験主要部に供給する空気系、低温の熱交換流体（ブライン）を供給する冷却系、および各種測定系に大別される。以下、各部について詳述する。

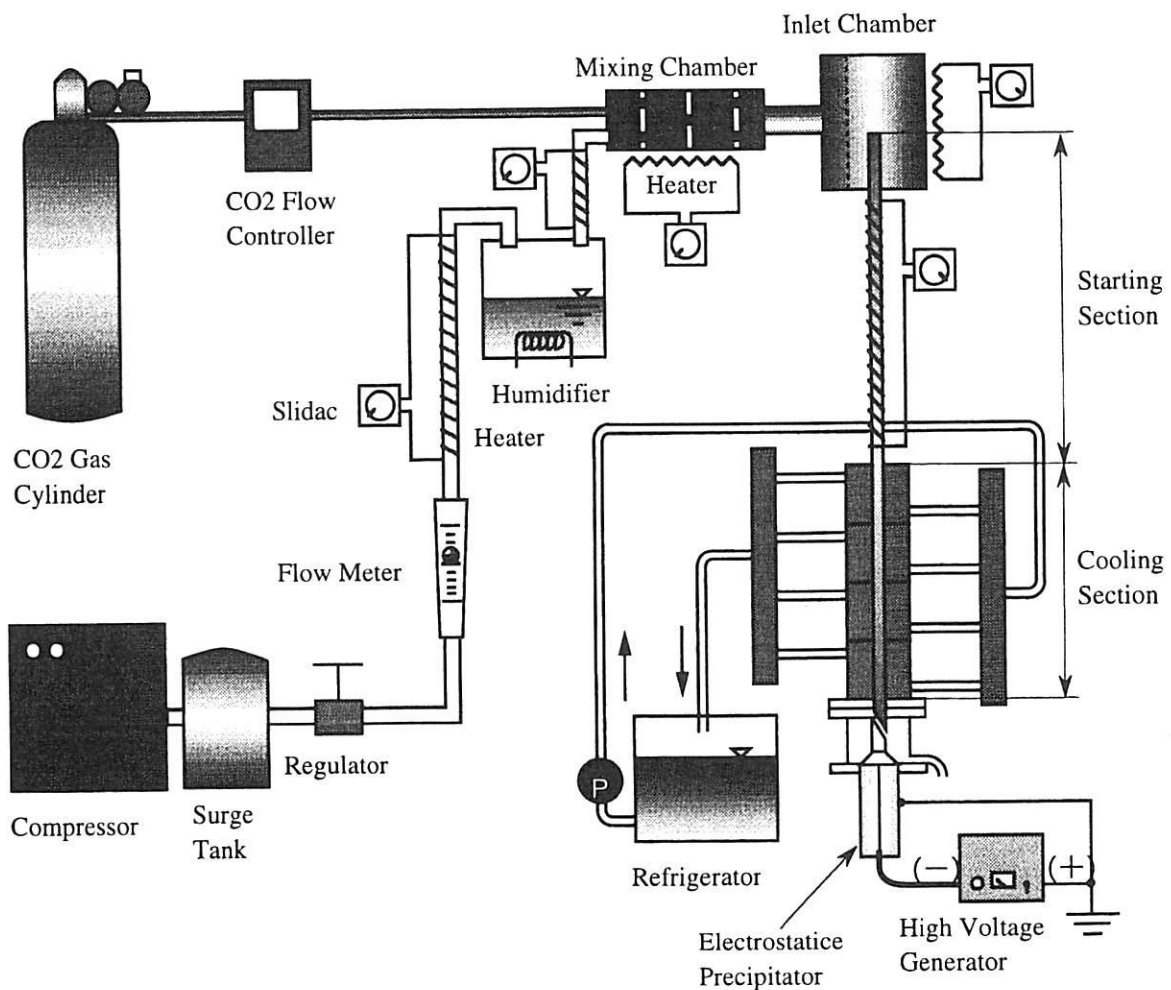


図3-1 実験装置概要

実験主要部の概略を図3-2に示す。実験主要部は、混合ガスの流れを発達させた後、冷却により凝縮およびガス吸収を行わせる試験部を中心として、試験部入口に設置された空気溜まり部および発生したミストを回収する電気集塵部から構成されている。空気溜まり部は、両端にフランジ機構を有する内径65 mm、外径 75 mm、長さ 140 mm の銅管、アクリル製の上板および銅製の下板より形成されており、高温の混合ガスを安定して供給するために外部にテープヒーター（坂口電熱株式会社“クレイボンテープヒーター”）が巻き付けられている。また、混合ガスを整流するために内部に整流板が設置されている。試験部は、内径 8.8 mm、外径 9.5 mm、長さ 686 mm の銅管と長さ 540 mm のらせん溝付銅管（図3-3）が、内径 9.5 mm、外径 13 mm、長さ 48 mm の銅管により接合されて形成されており、試験部入口から 758 mm を助走部、その後 424 mm を冷却部とする。助走部銅管外壁には入口から 92, 232, 372, 512, 652 mm の位置に $\phi 0.1$ mm T 型熱電対が設置されており、また管内流の温度を一定に保つために外壁にテープヒーターが巻き付けられている。冷却部は、外壁に沿って設置された長さ 100 mm のアクリル製ブロック内を冷却系より流れてくるブラインが通過することによって熱交換が行われる。各ブロック内には冷却壁面温度を測定するために、ブロックの上端から 10, 50, 90 mm の位置に $\phi 0.2$ mm T 型熱電対が設置されている。また、各ブロックは取り外しが可能となっており、ブロックの数（最大4つ）を変えることにより冷却長さを変化できるようになっている。電気集塵部は円筒型の電気集塵装置であり、上部フランジにより冷却部出口に取り付けられるようになっている。本装置の放電極は、長さ 130 mm、直径 0.2 mm のニッケル線で、負極性直流型の高電圧電源のマイナス端子に高電圧リード線を経て接続されている。一方、集塵極は内径 23.5 mm、外径 25.5 mm、長さ160 mm の銅管で、高電圧電源のプラス端子とともにアース設置されている。また、集塵極には、温度調節器（OMRON製“TEMPERATURE CONTROLLER E5AX”）に接続されたテープヒーターが巻き付けられており、壁面を一定一様な温度に加熱できるようになっている。

空気系はコンプレッサー、サージタンク、減圧弁、流量調節バルブ、流量計、加湿器、CO₂ ポンペ、CO₂流量コントローラ、混合室などから構成される。コンプレッサーから吐出された供試空気は、サージタンクおよび減圧弁を経たあと、フロート式流量計および流量調整バルブにより流量が調整される。その後、供試空気はヒーター・加湿器により加熱・調湿され混合室へ流入する。一方、供試ガスとしてのCO₂は、CO₂ポンベから供給されたガスがレギュレータにより減圧され、その後CO₂流量コントローラ（STEC 製 “MASS FLOW CONTROLLER “SEC-400 MARK2”, “STEC MASS FLOW SYSTEM PAC-3E”）により流量調節され混合室へ流入する。混合室に流入した供試空気と供試ガスは、3枚の邪魔板を通過することにより混合され空気たまり部へ流入する。

冷却系は、冷凍機、冷却部の両側に設置されたヘッダー、冷却部まわりに設けられたアクリル製ブロックおよび流量調整バルブなどから構成される。冷凍機（タイテック株式会社製“COOLNIT BATH EL-15F”）により冷却されたブラインは、冷却部の両側に設置された流入側のヘッダーに供給された後、冷却長さに応じて分岐し、実験主要部の冷却部まわりに設けられたアクリル製ブロックに流入する。そして、冷却部で熱交換を終えたブラインは流出側のヘッダーを介して冷凍機に回収される。なお、熱交換の方式は、ブラインが管内流と反対方向に流れる向流式を用いた。冷却部壁面の温度調節は、冷凍機の設定と各ブロック入口に設けられたバルブの開閉により行った。

測定は、供試空気の流量、主流の温度、蒸気濃度、空気溜まり部の外部核数、試験部の壁面温度、試験部出口での速度・温度分布、凝縮量、ミスト発生量、ミスト滴径、ミスト発生条件、および凝縮液中のCO₂濃度について行った。測定機器として、供試空気の流量測定には草野科学器械製作所製“フロートメーター FT-1400, FT-1600”を、外部核数の測定には RION 製“パーティクルカウンター KC-01C”を、試験部出口での速度分布測定にはピトー管および日立製“デジタルマノメーターDMS-4”を用いた。次に、凝縮液の質量測定には島津製作所製“電子上皿天秤 ED-H60”を、凝縮液内のCO₂濃度測定には島津製作所製“全有機体炭素計 TOC-5000A”を用いた。冷却管内で発生するミストの測定に関するものとしては、捕集したミスト滴の拡大撮影には、OLYMPUS製“オリンパスシステム顕微鏡 BHSM-363MD”，ソニー製“CCDカラービデオカメラDXC-151”，および三菱電気製“SVHSビデオカセットレコーダーHV-S62”を、ミスト流の可視化には日本科学エンジニアリング製“光ファイバー式レーザーマーキングNAL-15F”を用いた。

また、各部の温度測定にはT型熱電対を使用し、各熱電対の温度測定には横河北辰電機製“3088形ハイブリッドレコーダー”およびタケダ理研工業株式会社製“トレンド・ロガー TR2723”を用いた。

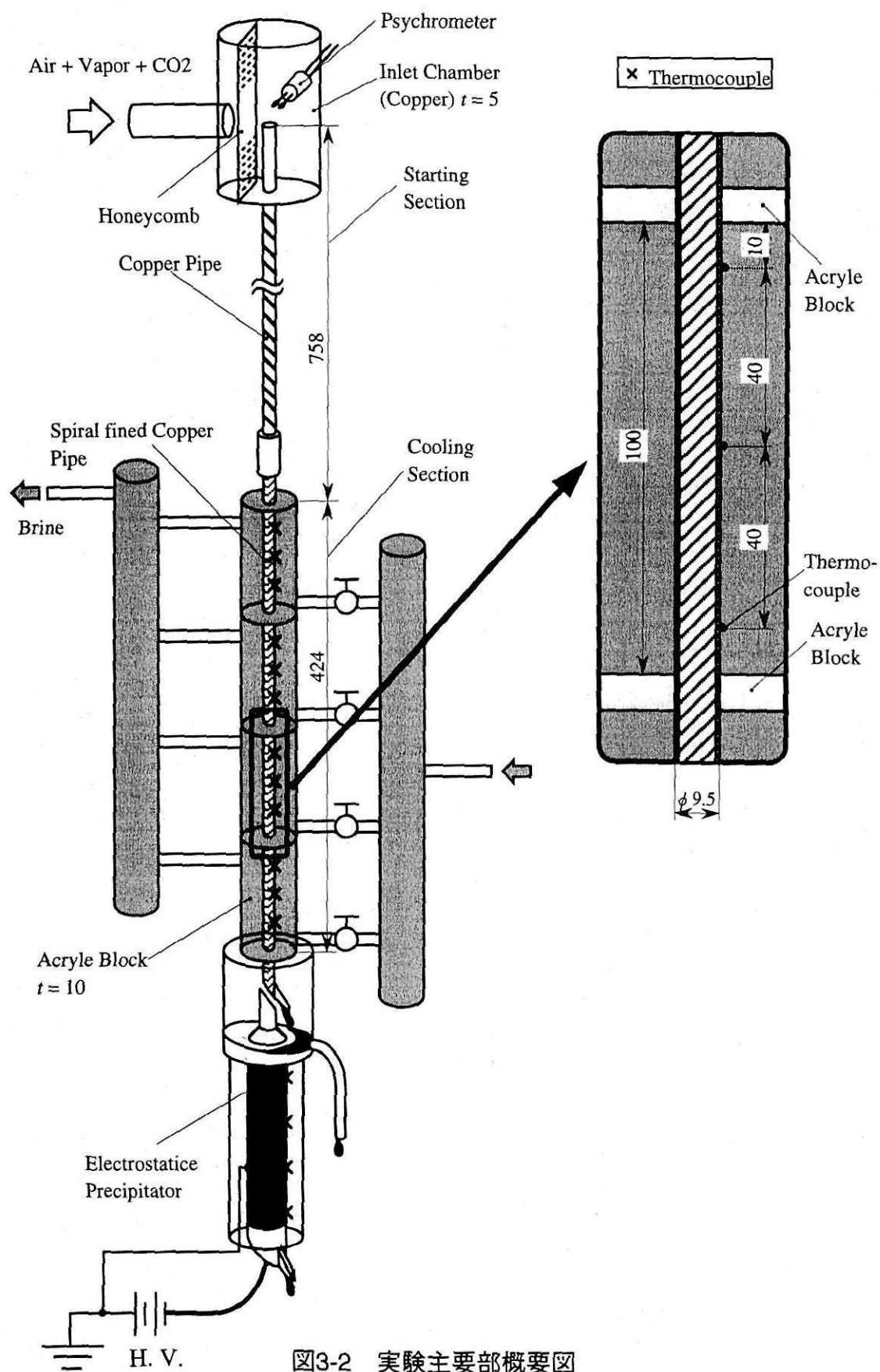
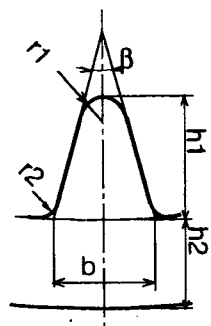
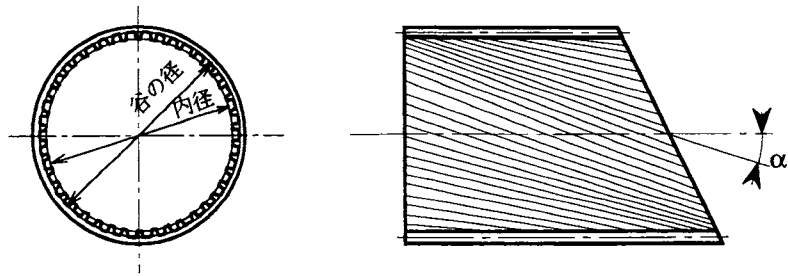


図3-2 実験主要部概要図



溝直角断面

表3-1 溝付き管の形状寸法 単位 [mm]

外径	9.5
山の数 n	60
内径 d1	8.82
最大内径(谷の径) d2	9.09
ねじれ角 a	18
リード L (=d2*π*tana)	87.9
ピッチ p (=L/n)	1.46
h1	0.137
h2	0.205
r1	0.04
r2	0.12
β	75
b	0.26

図3-3 らせん溝付管形状

2. 実験方法

実験は、供試ガスとして二酸化炭素を用い、冷却壁面温度 $T_w = 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 一定のもと、気流速度、入口温度、入口蒸気濃度、入口ガス濃度、冷却部長さを表3-1に示す実験条件内で種々変化させ、定常状態のもと、凝縮量およびガス吸収量、ならびに管内で発生するミストの性状について測定・観察を行ったものである。

表3-2 実験条件

項目			範囲
平均流速	u	m/s	2.0 ~ 3.0
入口温度	T_0	$^{\circ}\text{C}$	50 ~ 80
壁面温度	T_w	$^{\circ}\text{C}$	3
入口蒸気濃度	ρ_0	kg/m ³	$T_0 = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 0.02 ~ 0.075 (24 ~ 91 %RH) $T_0 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$; 0.04 ~ 0.125 (31 ~ 96 %RH) $T_0 = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 0.075 ~ 0.175 (38 ~ 89 %RH) $T_0 = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 0.075 ~ 0.2 (26 ~ 69 %RH)
入口ガス濃度	ρ	kg/m ³	0.1 ~ 0.5 (約 6 ~ 30 Vol%)
冷却部長さ	L_c	m	0.1 ~ 0.4

具体的には、冷却部長さに応じてアクリル製ブロックを設置し、気流速度、入口温度、入口蒸気濃度、入口ガス濃度について、流量計、流量調節バルブ、空気系に取り付けられたヒーター、加湿器、CO2 流量コントローラーの調整によりそれぞれ所定の条件を整え、助走部の壁温をヒーターの調整により入口温度とほぼ同一になるようにし、冷却部の壁温がほぼ $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ になるようにブラインの温度と流量を調整した。以上の状態を各種測定器で監視し、定常状態を確認した後、実験および測定を開始した。

測定は、まず実験装置の流れと温度場の基礎データとして、試験部出口の速度・温度分布および冷却区間の壁面温度について行った。その後、凝縮量、凝縮液中ガス濃度、ミスト発生条件、ミスト滴径分布、ミスト発生量および回収されたミスト中のガス濃度についての測定を行った。

以下、各測定法およびデータ整理法について次節で詳述する。

3. 各種測定法およびデータ整理法

(1) 入口温度および入口蒸気濃度

入口温度は、空気溜まり部内の助走円管入口付近に設置した乾湿球湿度計の乾球温度測定用熱電対（ ϕ 0.2 mm, T型熱電対）により測定した。入口蒸気濃度は空気溜まり部内の助走円管入口付近において乾湿球湿度計および電子式湿度計（神栄株式会社“デジタル温湿度計 TRH-CA”）により測定した。乾湿球湿度計を用いる場合には、次式により蒸気濃度を算出した⁽³⁻¹⁾。

$$e = e_w - A B (1 + \theta_w/610) (\theta - \theta_w) \quad (3-1)$$

ここで、

e : 気体の水蒸気圧 mmHg e_w : 湿球温度における飽和水蒸気圧 mmHg

θ : 乾球温度 °C θ_w : 湿球温度 °C

A : 湿球付近の風速により決まる定数($A = 0.0012$) B : 気体の圧力 mmHg

式(3-1)中の飽和水蒸気圧 $p_{vsat}(T)$ Pa は次式より求めた⁽³⁻²⁾。

$$\ln p_{vsat} = -5.8002206 \times 10^3/T + 1.3914993 - 4.8640239 \times 10^{-2} T \\ + 4.1764768 \times 10^{-5} T^2 - 1.4452093 \times 10^{-8} T^3 + 6.5459673 \ln T \quad (3-2)$$

(2) 試験部出口の速度分布

ピトー管を読み取り顕微鏡の摺動部に取り付け、管出口において流れと直角方向に微動させ、ピトー管の静圧と全圧をデジタルマノメータにより測定し、次式により流速を算出した。

$$u = C \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (3-3)$$

ここで、 u : 流速 m/s C : ピトー管係数 (=1)

ρ : 空気の密度 kg/m³ Δp : 動圧 ($=p_T - p_S$) Pa

p_T : 全圧 Pa p_S : 静圧 Pa

(3) 試験部出口の温度分布

先端に ϕ 25 mm T 型熱電対のついたプローブを試験部出口に挿入し、読み取り顕微鏡で流れと直角方向に微動させて各点の温度をトレンド・ロガーにより読み取り、試験部出口の温度分布とした。

(4) 冷却壁面温度分布

アクリル製ブロックの上端から 10, 50, 90 mm の位置の銅管外壁に ϕ 0.2 mm T 型熱電対を取り付け、各点の温度をハイブリッドレコーダーで読み取り、冷却壁面温度とした。

(5) ミスト発生条件

He-Neレーザーのスリット光を試験部出口より流出してくる気流に照射し、流速、管入口温度および壁

面温度を一定に保ちながら徐々に混合ガス中の蒸気濃度を上昇させ、ミストの発生が観察された条件をミスト発生条件とした。

(6) ミスト滴径分布

シャッター機構を用いた液浸法により、冷却管出口においてミスト滴を捕集し、ミストの滴径分布を測定した。シャッター機構は、アクリル円管（内径 60 mm，外径 80 mm，長さ 870 mm），スライドガラスを乗せるためのステージ，およびカメラのレリーズに接続されたプラスチック板（17mm×30mm）より構成されており、レリーズを操作することにより、任意の露出時間を与えられるようになっている。また、ステージには温度調節器に接続されたヒーターが埋め込まれており、スライドガラスを乗せる銅板の温度を調節できるようになっている。スライドガラスは、カバーガラスを被せた際のミスト滴の移動および破損を防ぐために、表面に 0.1 mm の細線が 2 本接着されている。

測定の手順は以下の通りである。

- (a) シャッター機構を試験部出口に設置し、実験条件を整える。
- (b) シリコンオイルを塗布したスライドガラスをステージに乗せ、シャッターにより任意時間の露出を与えてミスト滴をシリコンオイル内に捕獲する。
- (c) スライドガラスを取り出しカバーガラスを被せ、顕微鏡により拡大しビデオ撮影する。
- (d) ビデオプリンターによりビデオ画像をプリントし、さらにそれをコピー機により拡大し、滴径を測定する。

測定された滴径分布のデータ整理法については、まず、個数基準の頻度分布を求め、次いで、次式より体面積平均径 d_s mm を算出した。

$$d_s = \frac{\sum_{i=1}^k (n_i d_i^3)}{\sum_{i=1}^k (n_i d_i^2)} \quad (3-4)$$

ここで

d_i : 代表径 mm

n_i : ある階級 C_i ($d_i - Dd_i/2 \sim d_i + Dd_i/2$) に属する個数

(7-a) 凝縮液の回収

凝縮液の回収は、氷水に浸された試験管を、試験部出口からの流出気体が試験管内に流入しないような位置に設置して行った。その際、ストップウォッチを用いて採取時間 t_s を測定した。採取された凝縮液の質量 W_v kg は電子上皿天秤を用いて測定した。

(7-b) 壁面凝縮速度

測定された凝縮液質量と採取時間より、壁面凝縮速度 M_{vc} kg/s および単位面積当たりの壁面への平均凝縮速度 m_{vc} kg/m²・s をそれぞれ次式より算出した。

$$M_{vc} = \frac{W_v}{t} \quad (3-5)$$

$$m_{vc} = \frac{W_v}{A_s t} = \frac{M_{vc}}{A_s} \quad (3-6)$$

ここで、

A_s : らせん溝付管内面の伝熱面積 m² ($A_s = \pi d L_c$)

d_i : らせん溝付管の最大内径 m ($d_i = 9.09$ mm)

L_c : 冷却距離 m

(7-c) 凝縮液中ガス濃度

採取された凝縮液を全有機体炭素計により分析し、計測された凝縮液中の無機体炭素（以下 IC と略記）濃度を二酸化炭素に換算して凝縮液中ガス濃度 X_{gc} kg/kgH₂O を求めた。すなわち、全有機体炭素計で測定された IC 濃度を C_{ppm} とすると、凝縮液中ガス濃度は次式より算出される。

$$X_g = \frac{C}{1000000} \times \frac{44.01}{12.01} \quad (3-7)$$

(7-d) ガス吸収速度

凝縮液中ガス濃度 X_{gc} と凝縮速度 M_{vc} および単位面積当たりの壁面への平均凝縮速度 m_{vc} から、液膜へのガス吸収速度 M_{gcf} kg/s および単位面積当たりの液膜への平均ガス吸収速度 m_{gcf} kg/m²・s がそれぞれ次式より算出される。

$$M_{gcf} = X_{gc} M_{vc} \quad (3-8)$$

$$m_{gcf} = X_{gc} m_{vc} \quad (3-9)$$

(8-a) ミストの回収

ミストの回収は、試験部出口に取り付けられた電気集塵装置により行った。回収の手順は以下の通りである。

- (a) 内部を乾燥させた電気集塵装置を冷却管出口に取り付ける。
- (b) 所定の電圧（7 kV）をかける。
- (c) 電気集塵部より流出してくる回収液を採取し、その際の採取時間 t_1 s をストップウォッチを用い

て測する。

(d) 電子上皿天秤を用いて、採取した回収液の質量 W_{m1} kg を測定する。

以上の手順で測定された質量には、回収されたミストの他に電気集塵装置内での壁面凝縮液の質量も含まれているので、電気集塵終了後約30分間、実験装置を同じ状態のまま放置したあと、電圧を掛けない状態で電気集塵装置から流出してくる凝縮液を回収し、その際の採取時間 t_2 s および凝縮液の質量 W_{m2} kg を測定した。

(8-b) ミスト発生速度

測定された回収液の質量 W_{m1} 、電気集塵装置内の凝縮液の質量 W_{m2} 、およびそれぞれの場合の採取時間 t_1, t_2 から、ミスト発生速度 M_{vm} kg/s を次式より求めた。

$$M_{vm} = \frac{W_{m1}}{t_1} - \frac{W_{m2}}{t_2} \quad (3-10)$$

(9-a) ミスト滴中ガス濃度の測定

前述したように、電気集塵を行う際には、気流と集塵極壁面との温度差により壁面への凝縮が起こり、同時に凝縮液へのガス吸収が起こる。したがって、回収された液中には、ミストに吸収されたガスと凝縮液に吸収されたガスが混在することになる。これでは、ミスト滴中のガス濃度のみを測定することができないので、本研究では、電気集塵装置の集塵極の壁面温度を上昇させて壁面凝縮を防ぎ、その状態でミストの回収を行って回収液中のガス濃度を全有機体炭素計により測定し、ミスト滴中のガス濃度 X_{gm} kg/kg_{H2O} とした。なお、その際の壁面温度は以下のようにして決定した。

- (a) ミストの回収を行う条件で実際に電気集塵を行い、その時の壁面温度を記録する。
- (b) 電気集塵装置内を乾燥させ、(a)で得られた温度より約 2.5 °C 高い温度に壁面温度を保つ。
- (c) 電気集塵装置を取り付け、約 15 分間放置する。
- (d) その後、電気集塵装置を取り外し、内部で凝縮が起こっていないかどうか確認する。
- (e) 凝縮が起こっていないければ、その温度をミスト滴中ガス濃度の測定を行う際の集塵極壁面温度とする。凝縮が起こっていれば、再び電気集塵装置内を乾燥させ、温度をさらに上昇させて(c)へ戻る。

(9-b) ミストへのガス吸収速度

測定されたミスト滴中ガス濃度 X_{gm} およびミスト発生速度 M_{vm} から、冷却管内でのミストへのガス吸収速度 M_{gm} kg/s を次式より算出した。

$$M_{gm} = X_{gm} M_{vm} \quad (3-11)$$

(10) 凝縮効率・ミスト発生率

凝縮効率 h_f % およびミスト発生率 h_m % をそれぞれ次式で定義する.

$$\eta_f = \frac{M_{vc}}{G_{vin}} \times 100 \quad (\text{凝縮効率}) \quad (3-12)$$

$$\eta_m = \frac{M_{vm}}{G_{vin}} \times 100 \quad (\text{ミスト発生率}) \quad (3-13)$$

ここで

G_{vin} : 流入蒸気量 kg/s

(11) ガス回収率

凝縮液膜によるガス回収率 h_{fg} % およびミストによるガス回収率 h_{mg} % をそれぞれ次式で定義する.

$$\eta_{fg} = \frac{M_{gef}}{G_{gin}} \times 100 \quad (\text{凝縮液膜}) \quad (3-14)$$

$$\eta_{mg} = \frac{M_{gm}}{G_{gin}} \times 100 \quad (\text{ミスト}) \quad (3-15)$$

ここで,

G_{gin} : 流入ガス量 kg/s

IV. 結果および考察

1. 基礎データ

本節では、試験部出口での速度・温度分布、および試験部壁面の温度分布を示し、試験円管内の流れと温度場について検討する。

(1) 試験部出口の速度分布

管内平均流速が1.5～3.5 m/s となる流量を試験部に供給し、試験部出口での速度分布を測定した結果を図4-1に示す。なお、供試流体には室温の空気を用いた。実験結果は、実線で表される理論値とほぼ一致しており、管内の流れが十分に発達していることが確認された。

(2) 試験部の壁面温度分布

入口温度、平均流速、および入口蒸気濃度を変化させ、試験部壁面の温度を測定した結果を、冷却部長さ別に図4-2(a)～(d)に示す。縦軸は試験円管入口からの距離であり、図中網掛けの部分が冷却部である。助走部（加熱部）は入口温度から±5℃以内に保たれているが、冷却部は助走部の影響を受けるため、冷却開始点直後ほど温度が高くなっている。また蒸気濃度が増加した場合にも、凝縮に伴う潜熱の放出により、冷却壁面温度が上昇している。これら壁面温度の上昇は、加熱壁面との温度差および流入蒸気量が多量なことから致し方ないものと考え、このような壁面温度状態のもとで実験を行った。

(3) 試験部出口の温度分布

平均流速、入口温度、および冷却部長さを変化させ、試験部出口において温度分布を測定した結果を、流速別に図4-3(a), (b)に示す。なお、供試流体には空気を用い、湿度は非常に乾いた状態 ($\rho_{v0} = 0.01$ kg/m³ 程度) であった。実験結果は実線で表される解析結果とほぼ一致しており、管内の温度場が理想的な層流強制対流場になっていることが確認された。

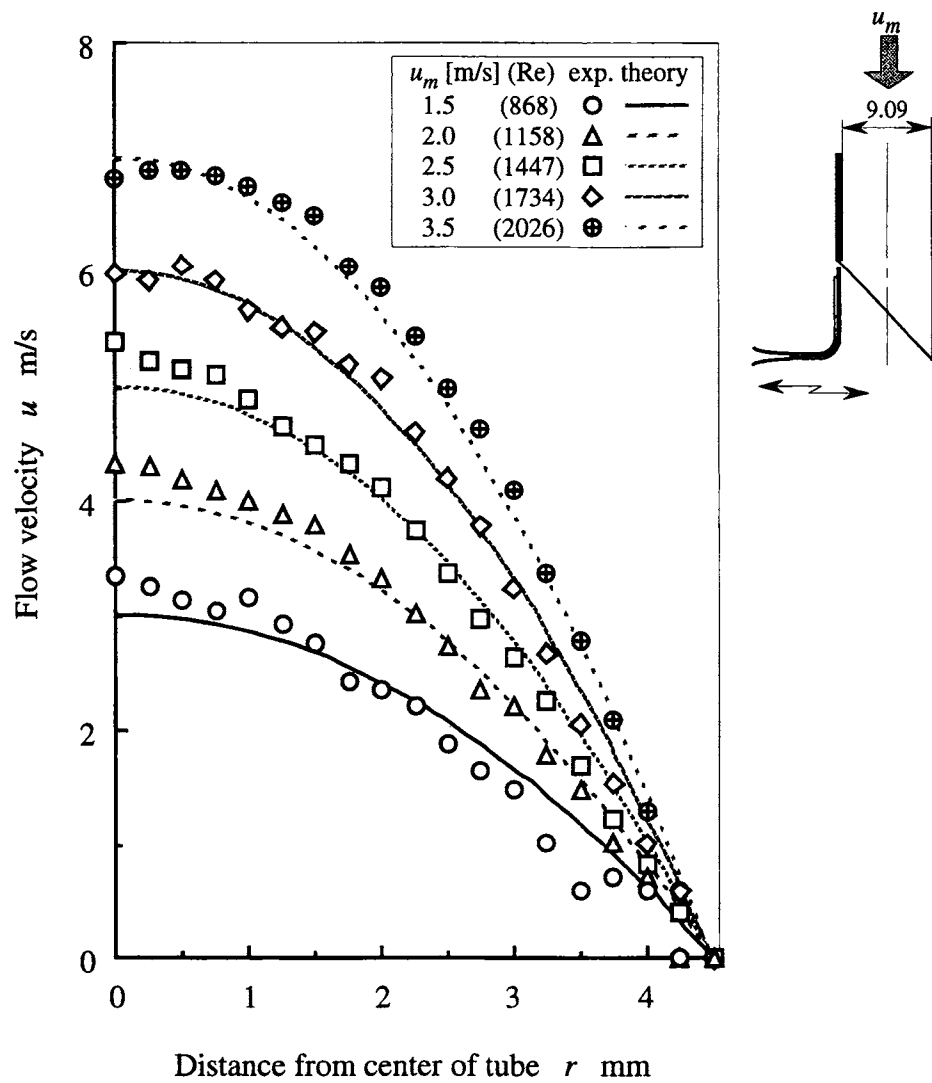


図4-1 試験部出口速度分布

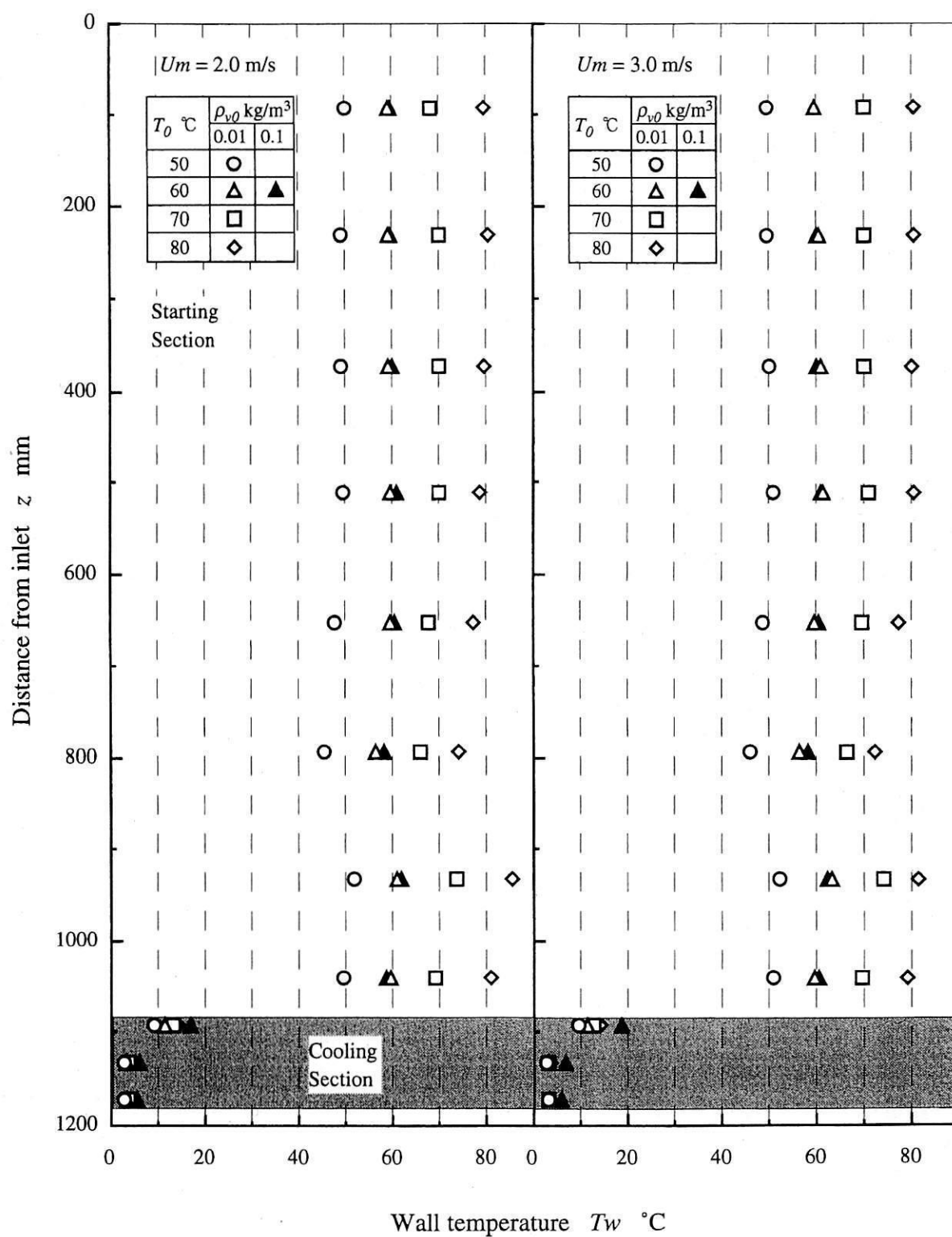


図4-2 (a) 試験部壁面温度分布 ($L_c = 100$ mm)

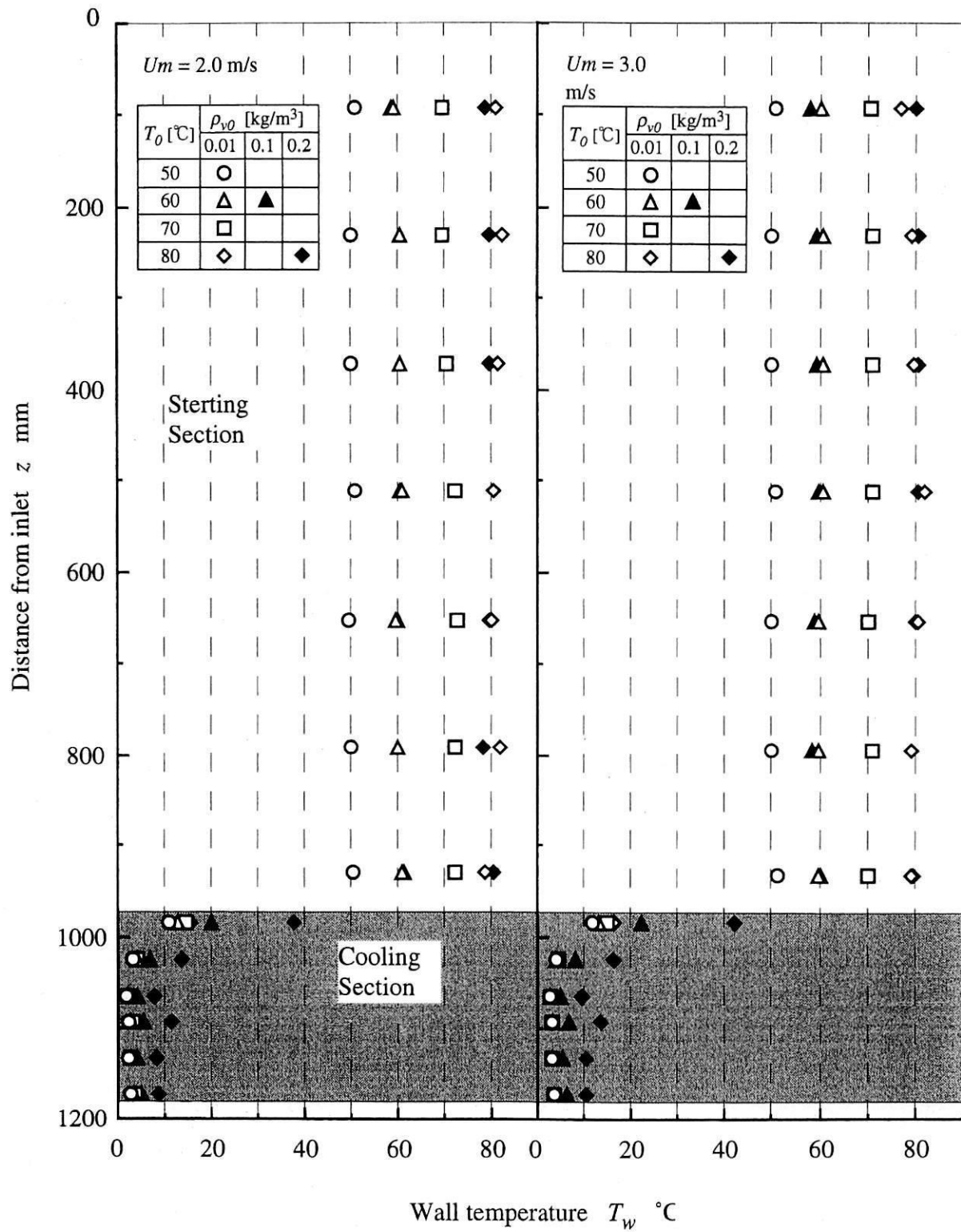


図4-2 (b) 試験部壁面温度分布 ($L_c = 200$ mm)

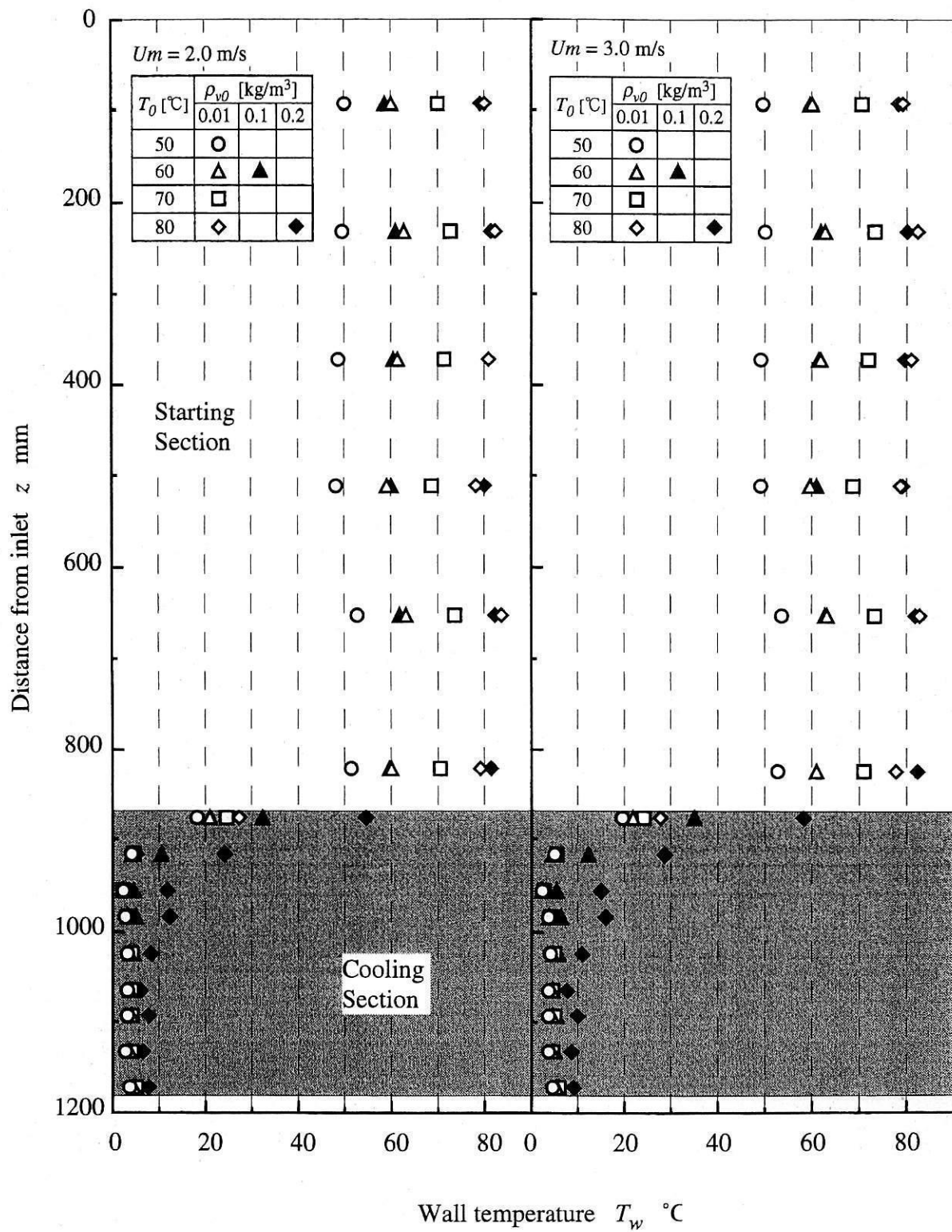


図4-2 (c) 試験部壁面温度分布 ($L_c = 300$ mm)

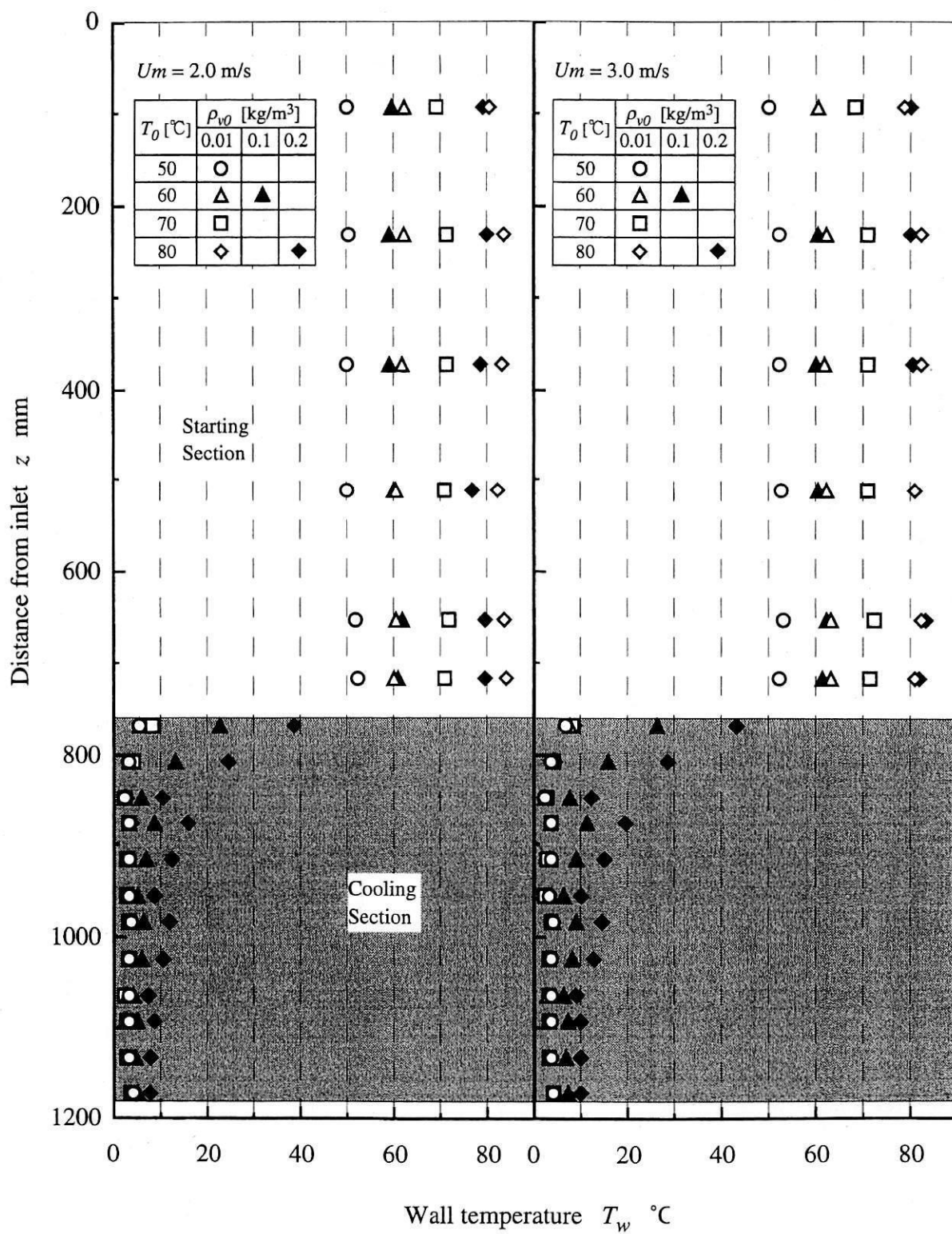


図4-2 (d) 試験部壁面温度分布 ($L_c = 400$ mm)

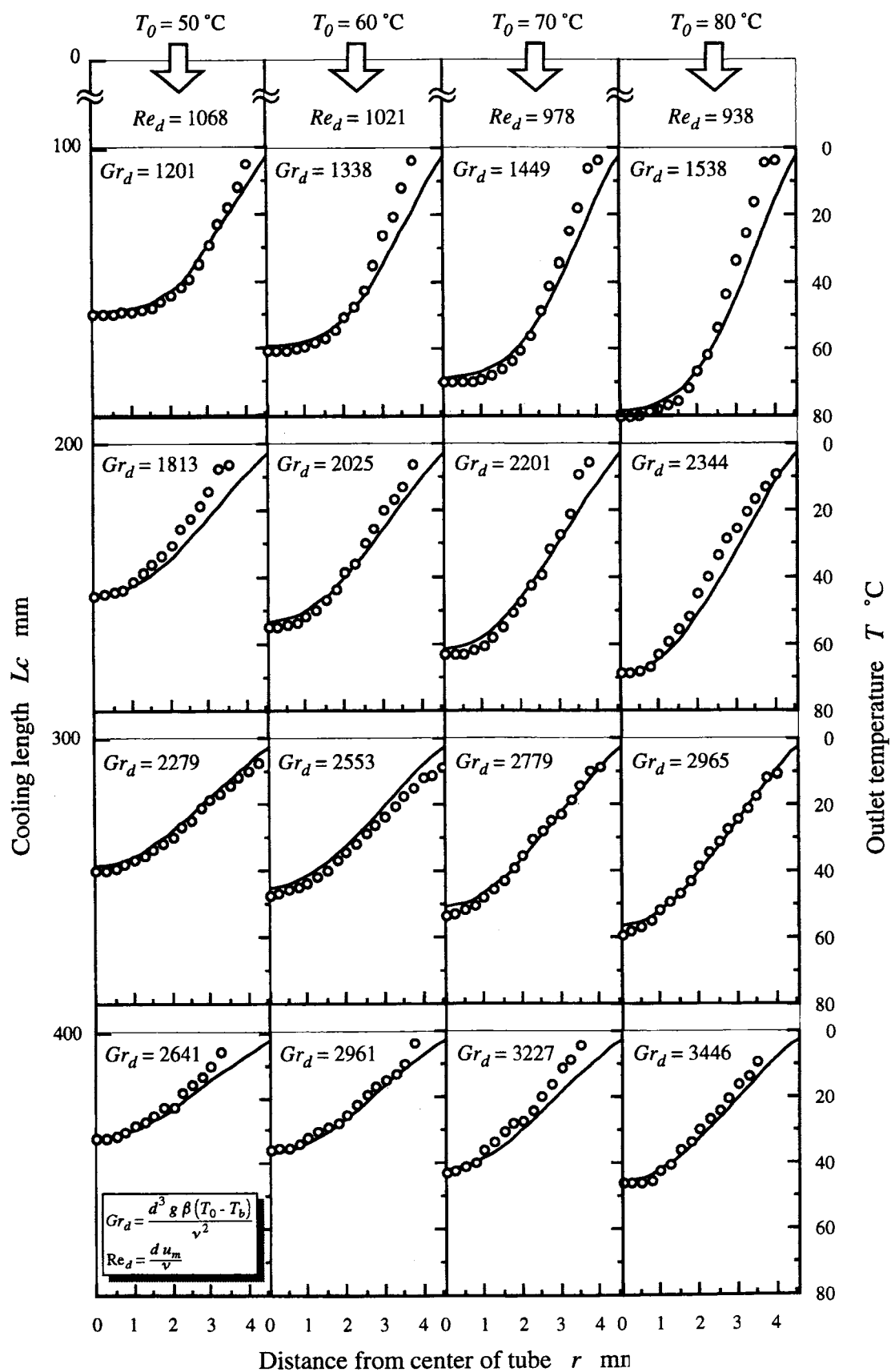


図4-3 (a) 試験部出口温度分布 ($u_m = 2.0$ m/s, $T_w = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

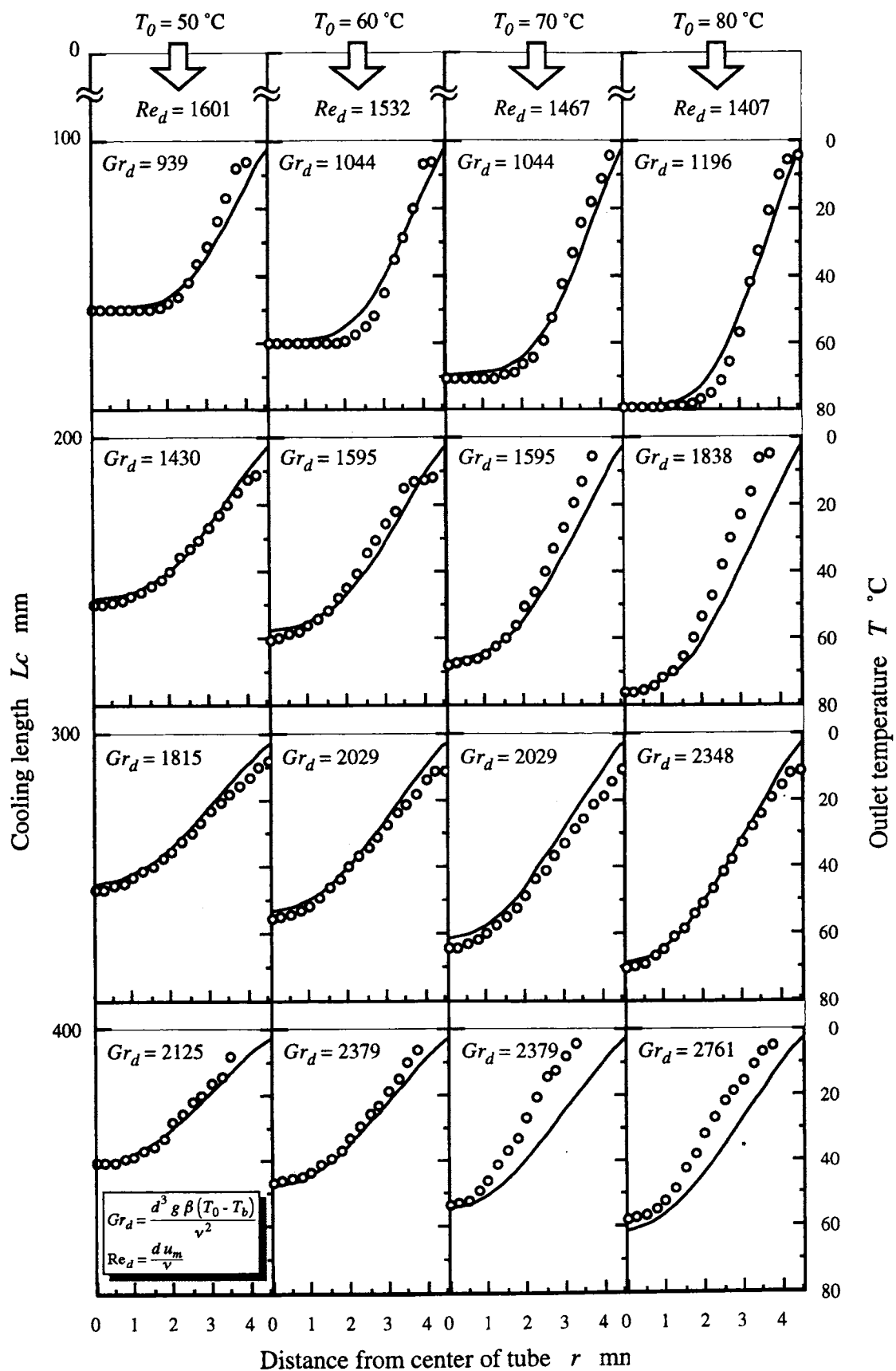


図4-3 (b) 試験部出口温度分布 ($u_m = 3.0$ m/s, $T_w = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

2. 冷却管内での凝縮およびミスト生成

本研究で提案する凝縮液膜法は、蒸気の凝縮によって形成される凝縮液膜およびミストに溶質ガス成分を吸収させるものである。よって、そのガス吸収速度は、凝縮速度およびミスト発生速度に大きな影響を受ける。本節では、冷却管内で発生するミストの性状、壁面凝縮速度およびミスト発生速度について、流速、入口温度、入口蒸気濃度および冷却部長さの影響を検討する。

(1) ミストの発生と性状

(a) ミスト発生条件 図4-4に、冷却部長さが 400 mm の場合のミスト発生条件を入口蒸気濃度と温度との関係で示す。図中の細線は入口温度に対する飽和蒸気濃度であり、細い破線および太い破線は管全体壁面近傍でのミスト発生（壁面発生条件）および管出口断面全域でのミスト発生条件（断面発生条件）をそれぞれ示す。図中網掛けの領域がミスト発生可能域である。これより、ミストの壁面発生条件は流速に無関係に温度と濃度の関係で与えられるが、断面発生条件は流速が速くなるほど、また入口温度が低くなるほど厳しくなる（飽和条件に近づく）ことがわかる。このことは流れと関係する管内温度・濃度境界層の発達によるものである。また、図中のプロット点は、レーザー法による観察結果であり、壁面発生条件とはほぼ一致している。

また、図中の写真は、平均流速が 3 m/s の場合のミスト流をレーザー法により可視化し、デジタルカメラ（Kodak “EOS・DCS 5”）により撮影したものであり、蒸気濃度の増加と入口温度の低下によりミストが濃くなっていく様相が見られる。

次に、ミスト発生条件の冷却部長さに対する関係を図4-5に示す。壁面発生条件は流れ方向に対して無関係であるが、断面発生条件は管内の温度・濃度境界層の発達に関係して冷却部長さが短くなるほど厳しくなる。また、観察結果はほぼ壁面発生条件と一致しているが、冷却部長さの減少に伴い壁面発生条件との差が若干大きくなる傾向が見られる。これについては、冷却部長さの減少に伴い、冷却管入口直後の壁面温度の高い領域の冷却壁面全体に占める割合が増加する結果、冷却壁面の平均温度が高くなることなどによるものと考えられる。また、図中の写真より、冷却部長さの増加に伴いミストが濃くなっていく様相が確認され、さらに流速に対しても、流速の低下によりミストが濃くなる様相が見られる。

なお、以後の実験におけるミスト発生の有無はこれらの実験で得られた結果を用いて判断することにした。

(b) ミスト滴径分布 図4-6(a), (b)に、入口温度が 60 °C の場合の個数基準ヒストグラムを示す。滴径はばらつきが大きく、大きな液滴と小さな液滴が混在していることが確認できる。しかしながら、全体

的には蒸気濃度の増加に伴い滴径が増加する傾向が窺える。

次に、滴径分布のデータから算出された体面積平均径 d_s と入口蒸気濃度の関係を入口温度をパラメータとして図4-7に示す。図中、破線で表される解析結果は、管出口での半径方向の滴径分布 $d_p(j)$ から次式により算出したものである。

$$d_s = \frac{\sum_{j=1}^n d_p(j)^3}{\sum_{j=1}^n d_p(j)^2} \quad (4-1)$$

同図よりミスト滴径は、入口温度の低下と入口蒸気濃度の増加に伴い肥大することがわかる。実験結果についても同様な傾向が見られるが、解析結果と比較した場合、蒸気濃度による変化がほとんど現れず、高い蒸気濃度範囲ではかなり小さな値を示している。この原因としては、(i) シリコンオイルの表面に付着した場合の液滴の蒸発、(ii) シリコンオイル内での液滴の合体および流動などのサンプリング時の誤差の他に、(iii) 管内の気流の乱れなどによる肥大化したミスト滴の液膜への捕集などが考えられる。また、解析で用いている外部核数 ($f_n = 10^8$ 個/m³) は、直径が 0.3 μm 以上の粒子の個数であるが、実際には 0.3 μm より小さい粒子が多数存在し、それらを外部核として核生成が起こると考えられる。したがって、解析結果は液滴径を大きく見積もっていることになる。

図4-8は、流速の影響を検討するために、図4-7の結果を同一グラフ上にプロットしたものである。滴径は流速の低下に伴い大きくなり、その傾向は同一温度であれば蒸気濃度が増加するほど顕著になることがわかる。これは、流速の低下によりミスト滴の冷却管内での滞在時間が長くなる結果、ミスト滴の成長時間が長くことによるものと考えられる。一方、実験結果については、解析結果からわかるように、流速の影響が比較的小さいことに加え、測定精度が低いことから、流速による差異は見られない。

次に、冷却部長さを変化させた場合の個数基準ヒストグラム図4-9(a), (b)に示す。滴径は、冷却部長さが 400 mm の場合と同様にばらつきが大きく、大きな液滴と小さな液滴が混在している。また、冷却部長さの増加に伴い滴径が肥大化する様子は見られず、反対に冷却部長さが短いほど液滴が大きくなる傾向が見られる。この傾向については、体面積平均径と冷却部長さとの関係を示した図4-10においても確認され、冷却部長さの増加に伴い肥大化する解析値に対して、実験値は若干小さくなる傾向を示す。この原因として、管出口に行くにしたがい肥大化したミスト滴が、ミスト滴の数密度に基づく拡散効果、あるいは管内が滴状凝縮化することによって生じる気流の乱れにより液膜に捕集されることなどが考えられる。

(2) 壁面凝縮速度とミスト発生速度

図4-11に、冷却部長さが400mmの場合の壁面凝縮速度およびミスト発生速度についての結果を示す。なお、図中のミスト発生速度についての実験結果および壁面凝縮速度とミスト発生速度についての解析結果は、供試流体中に可溶性ガスを含まない状態での結果であり、壁面凝縮速度の実験結果については、供試ガス濃度が 0.1, 0.3, 0.5 kg/m³ の場合の平均値である。壁面凝縮速度 M_{vc} については、入口蒸気濃度の増加に伴い増加するが、ミスト発生量が比較的少ないためミスト化による影響が現れず、入口ガス温度に対して無関係にはほぼ一本の線となっている。実験値は解析値より若干高い値を示しているが、ほぼ一致している。なお、両者の差異については、(i) 水の大きい表面張力ため凝縮形態が完全な膜状ではなく滴状化している。(ii) 液膜の存在により流れが加速される。(iii) 発生したミスト滴が液膜に捕集される。(iv) 解析では、拡散に基づく半径方向の流れによる蒸気の取り込みを考慮していない。ことなどによるものと考えられる。

一方、ミスト発生速度 M_{vm} は蒸気濃度の増加と入口温度の低下に伴い増加する傾向を示す。実験結果は、温度の低下により速度が増加する傾向は見られないが、蒸気濃度の増加により増加し、解析値とはほぼ一致している。

図4-12に、壁面凝縮速度およびミスト発生速度と平均流速との関係を入口蒸気濃度をパラメータとして示す。流速の増加に伴い壁面凝縮速度は増加し、ミスト発生速度は減少する。これは、前者については、流速の増加により物質伝達率が向上されるためであり、後者については、流速の増加により温度・濃度境界層の発達が遅くなり、管内のミスト発生領域が減少するためと考えられる。壁面凝縮速度についての実験値は、前述したように解析値より若干高い値を示すが、定性的には解析値とよく一致している。一方、ミスト発生速度についての実験値は、解析値のような傾向は見られないが、これは、発生するミスト量が微量であること、および測定精度上の問題によるものと考えられる。

次に、冷却部長さに対する、単位面積当たりの壁面への平均凝縮速度 m_{vc} およびミスト発生速度の変化を、各種パラメータを用いて図4-13, 4-14 に示す。単位面積当たりの壁面への平均凝縮速度についての実験結果は、解析結果と比較して傾向的によく一致しており、濃度境界相の発達により管入口から出口に向かって徐々に減少している。なお、両者の差異およびパラメータの影響については、冷却部長さが 400 mm の場合と同様である。また、ミスト発生速度は管入口から出口に向かって増加し、パラメータの影響として、速度の減少と蒸気濃度の増加に伴い各断面での発生速度が増加する。実験結果は多少のばらつきがあるものの、パラメータの影響も含めて解析結果とはほぼ一致している。

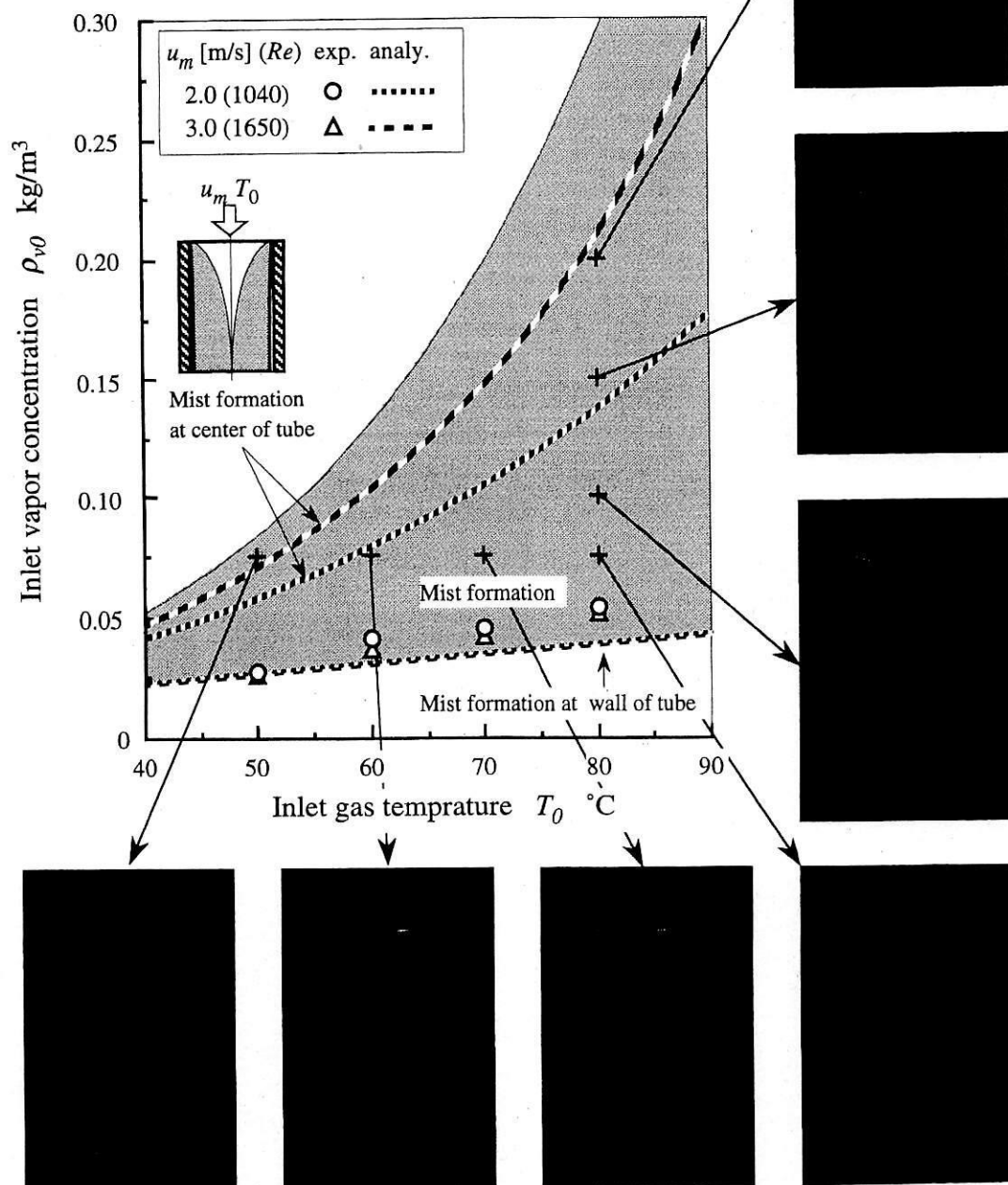


図4-4 ミスト発生条件
($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $T_w = 3$ °C)

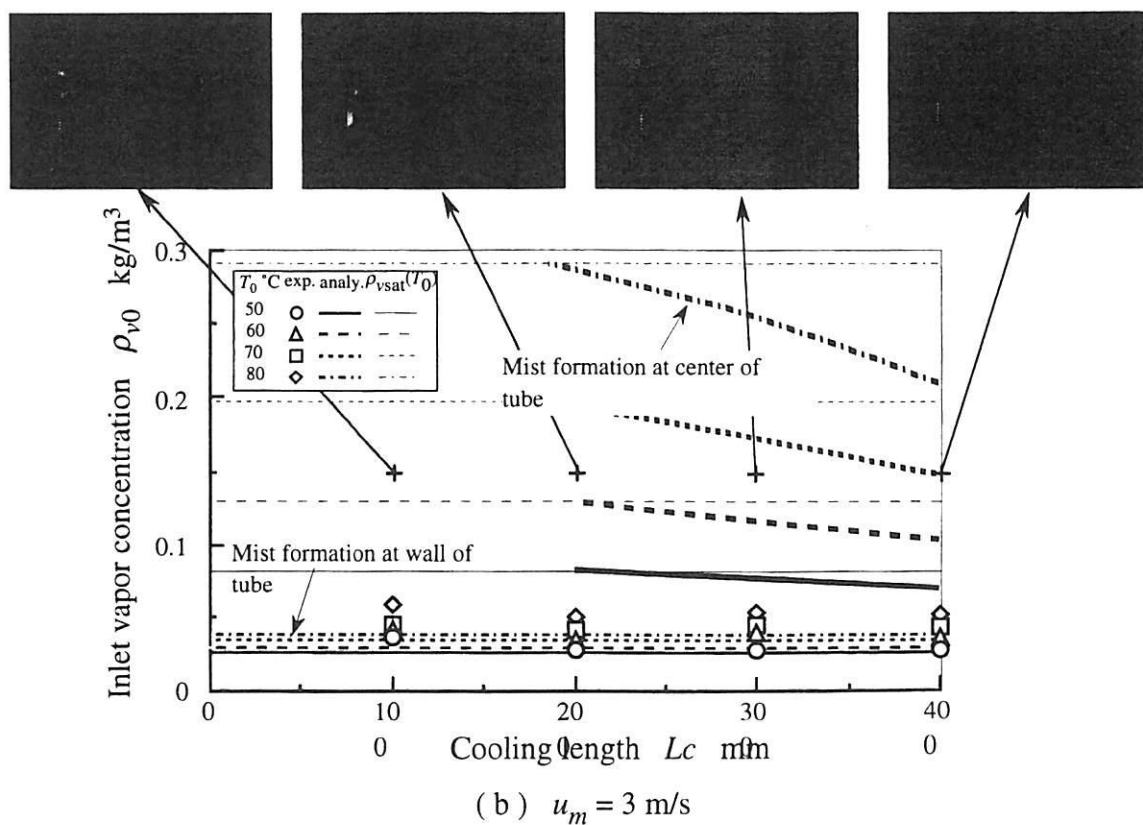
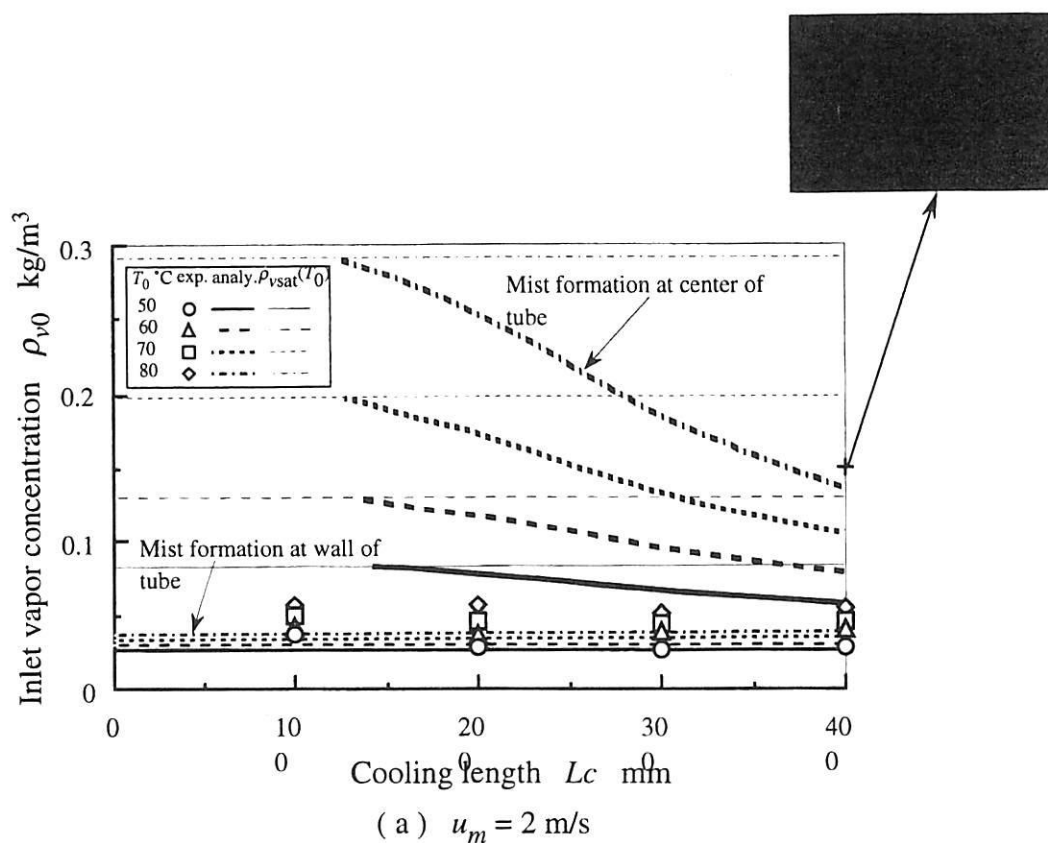


図4-5 ミスト発生条件の冷却部長さに対する変化

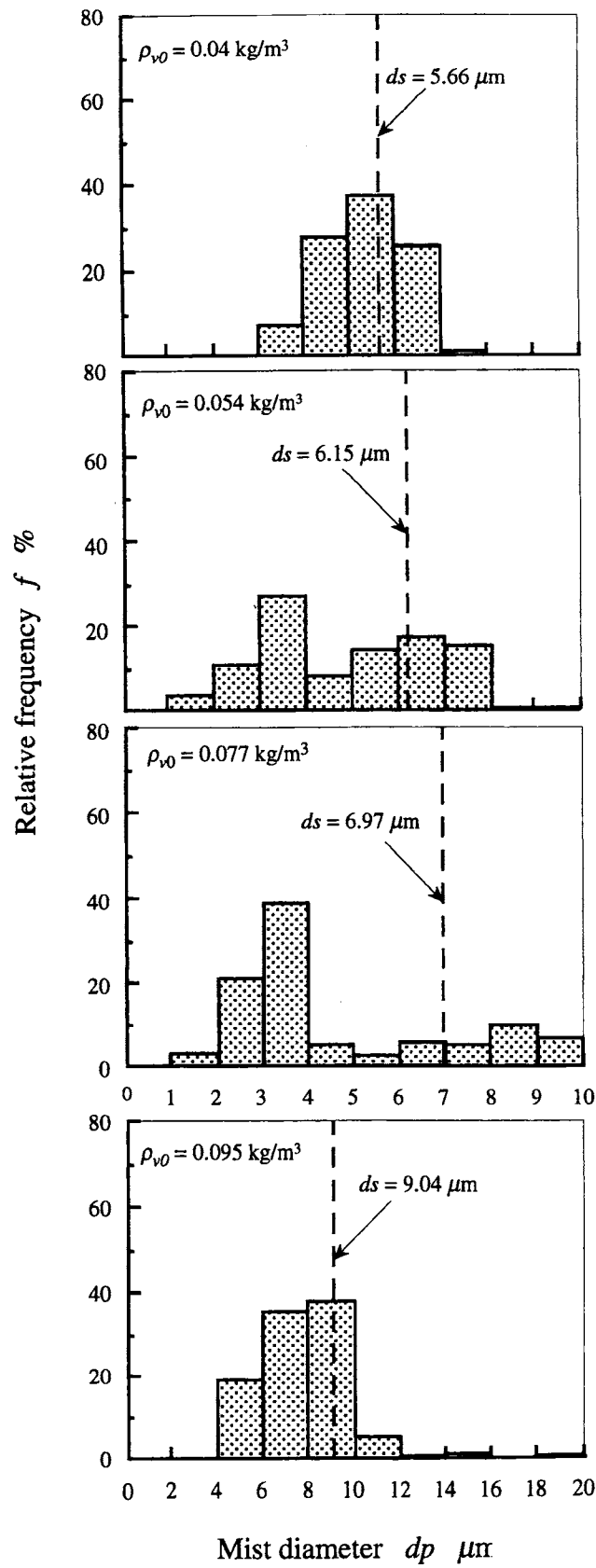


図4-6 (a) ミスト滴径分布 ($L_c = 400$ mm, $u_m = 2.0$ m/s, $T_0 = 60$ °C)

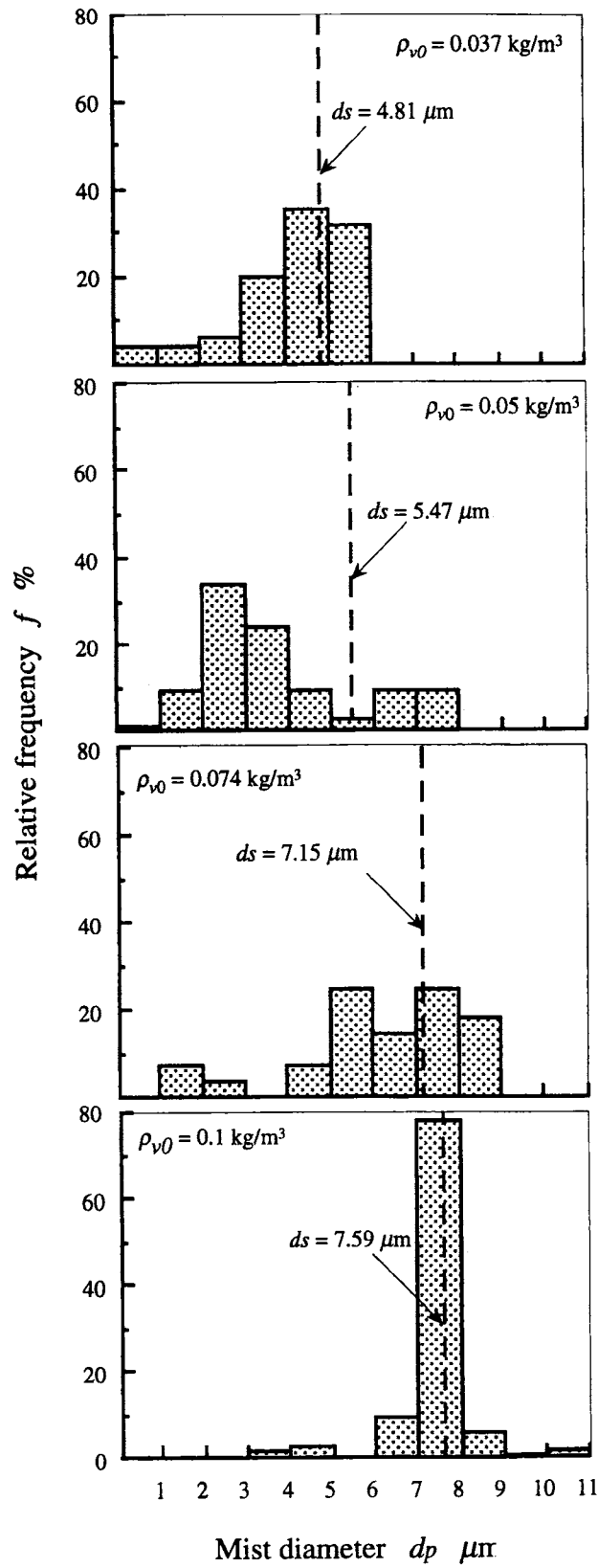


図4-6 (b) ミスト滴径分布 ($L_c = 400 \text{ mm}$, $u_m = 3.0 \text{ m/s}$, $T_0 = 60^\circ\text{C}$)

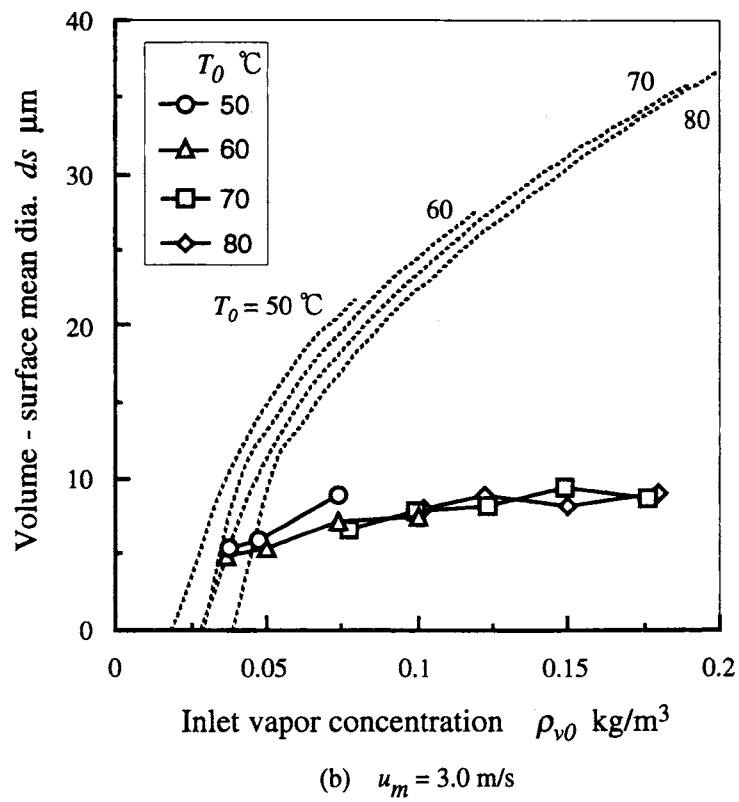
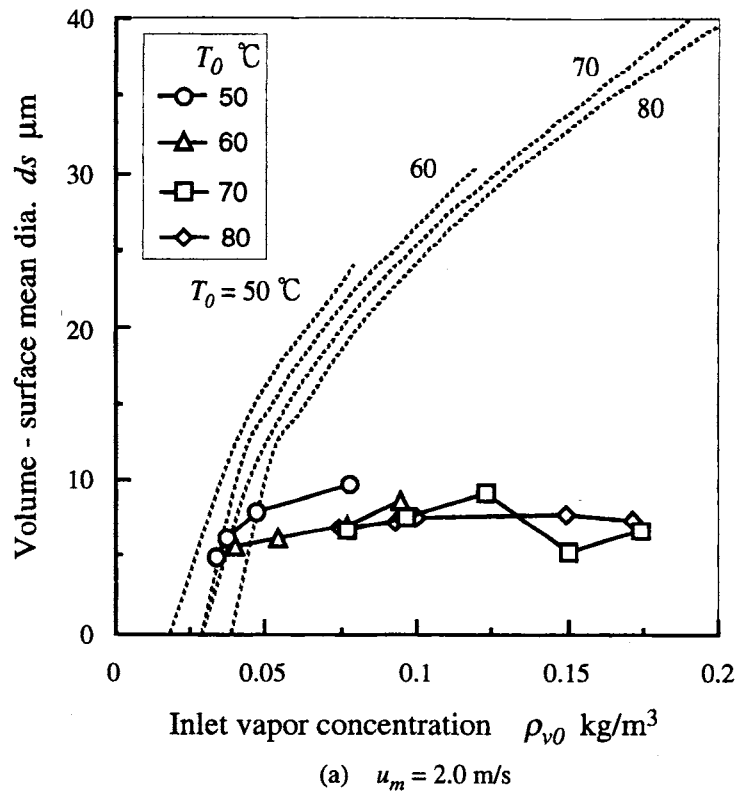


図4-7 入口蒸気濃度とミスト滴径の関係
($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $T_w = 3$ °C)

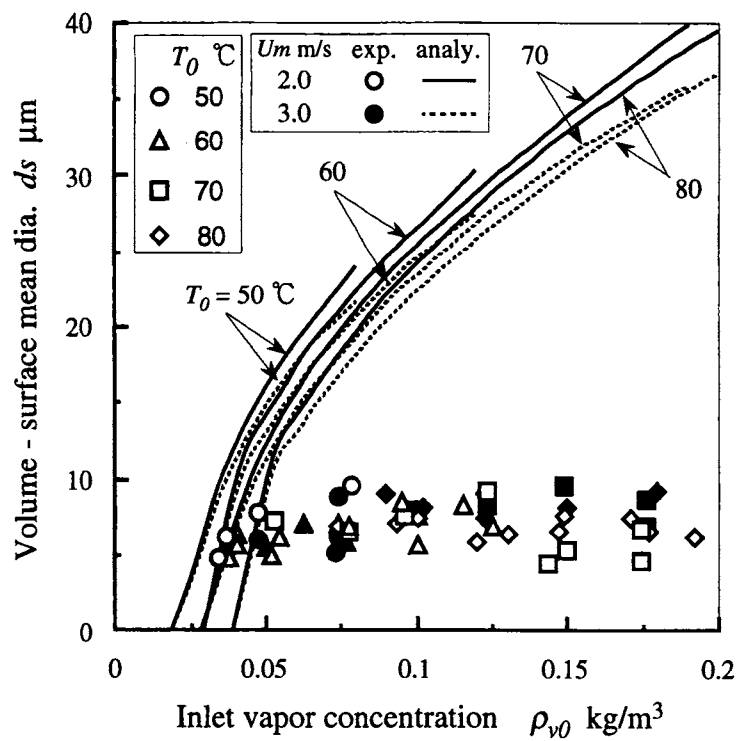


図4-8 入口蒸気濃度とミスト滴径の関係（流速の影響）
 ($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $T_w = 3^{\circ}\text{C}$)

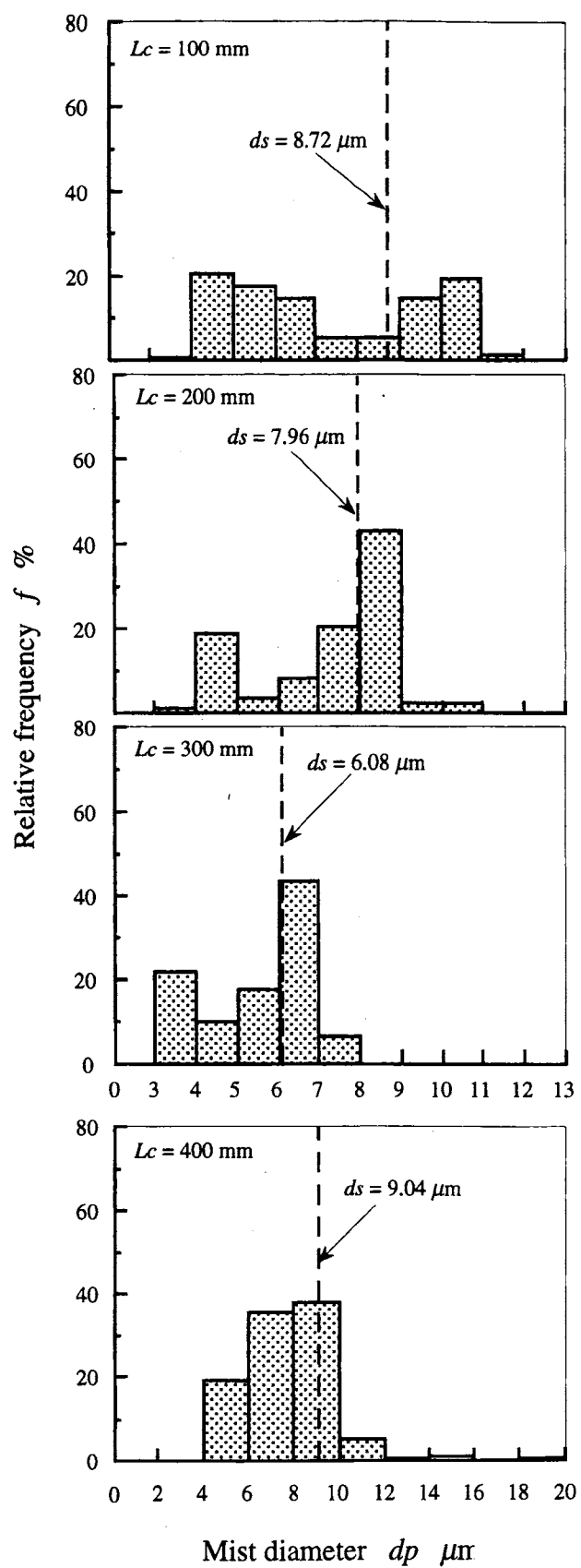


図4-9 (a) ミスト滴径分布 ($u_m = 2.0$ m/s, $T_0 = 60$ °C, $\rho_{v0} = 0.1$ kg/m³)

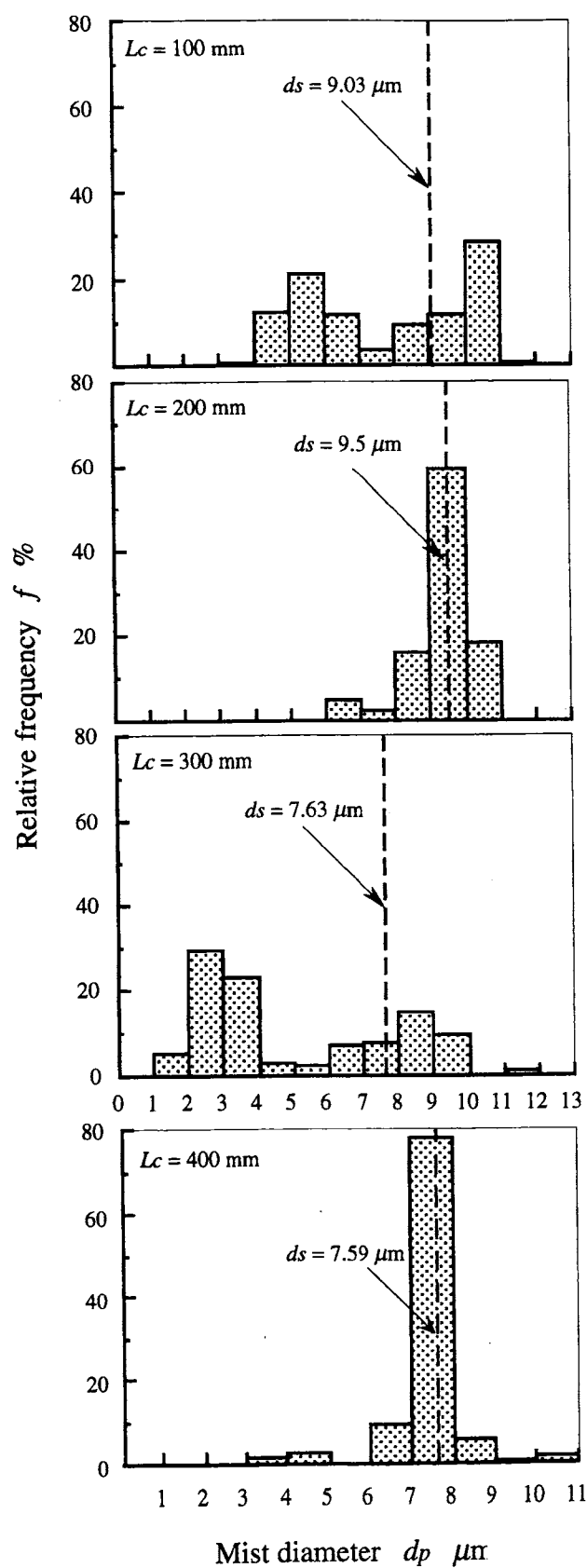


図4-9 (b) ミスト滴径分布 ($u_m = 3.0 \text{ m/s}$, $T_0 = 60^\circ\text{C}$, $\rho_{v0} = 0.1 \text{ kg/m}^3$)

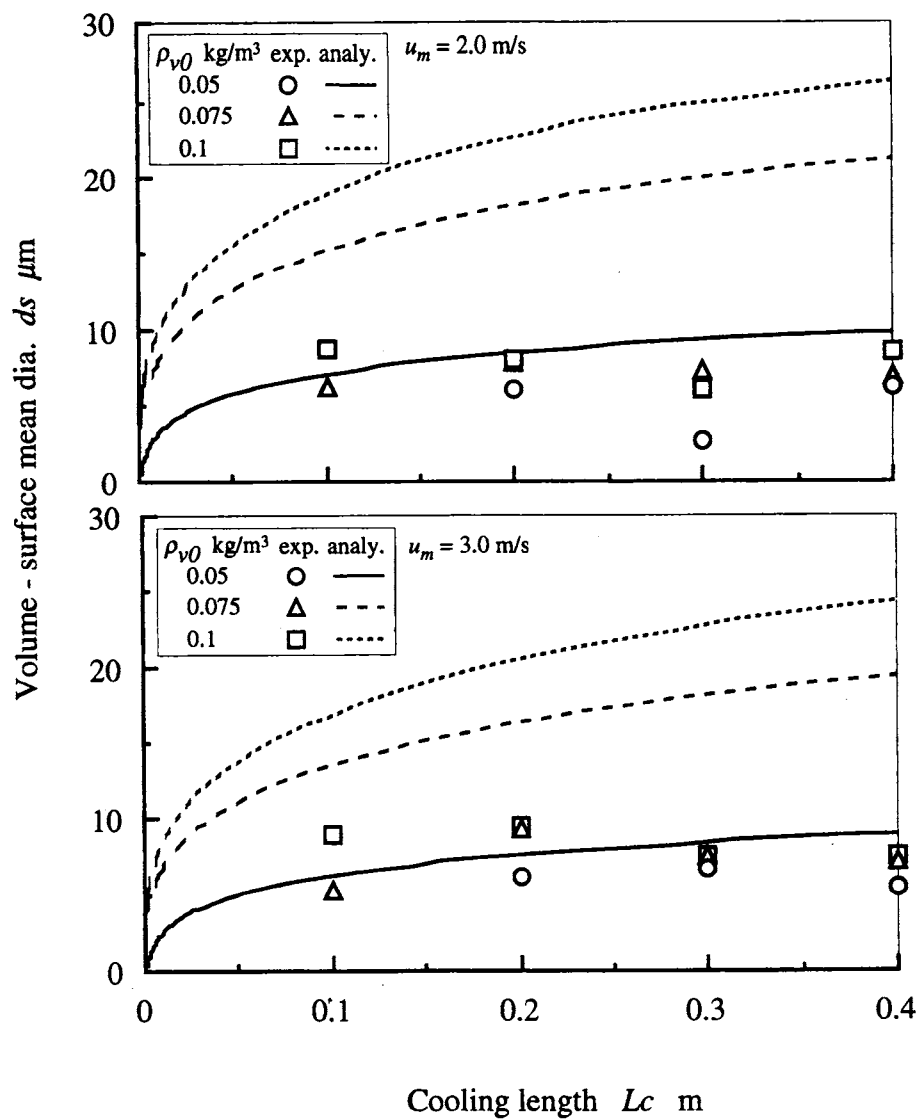


図4-10 ミスト滴径の冷却部長さに対する変化
($T_0 = 60^\circ\text{C}$, $T_w = 3^\circ\text{C}$)

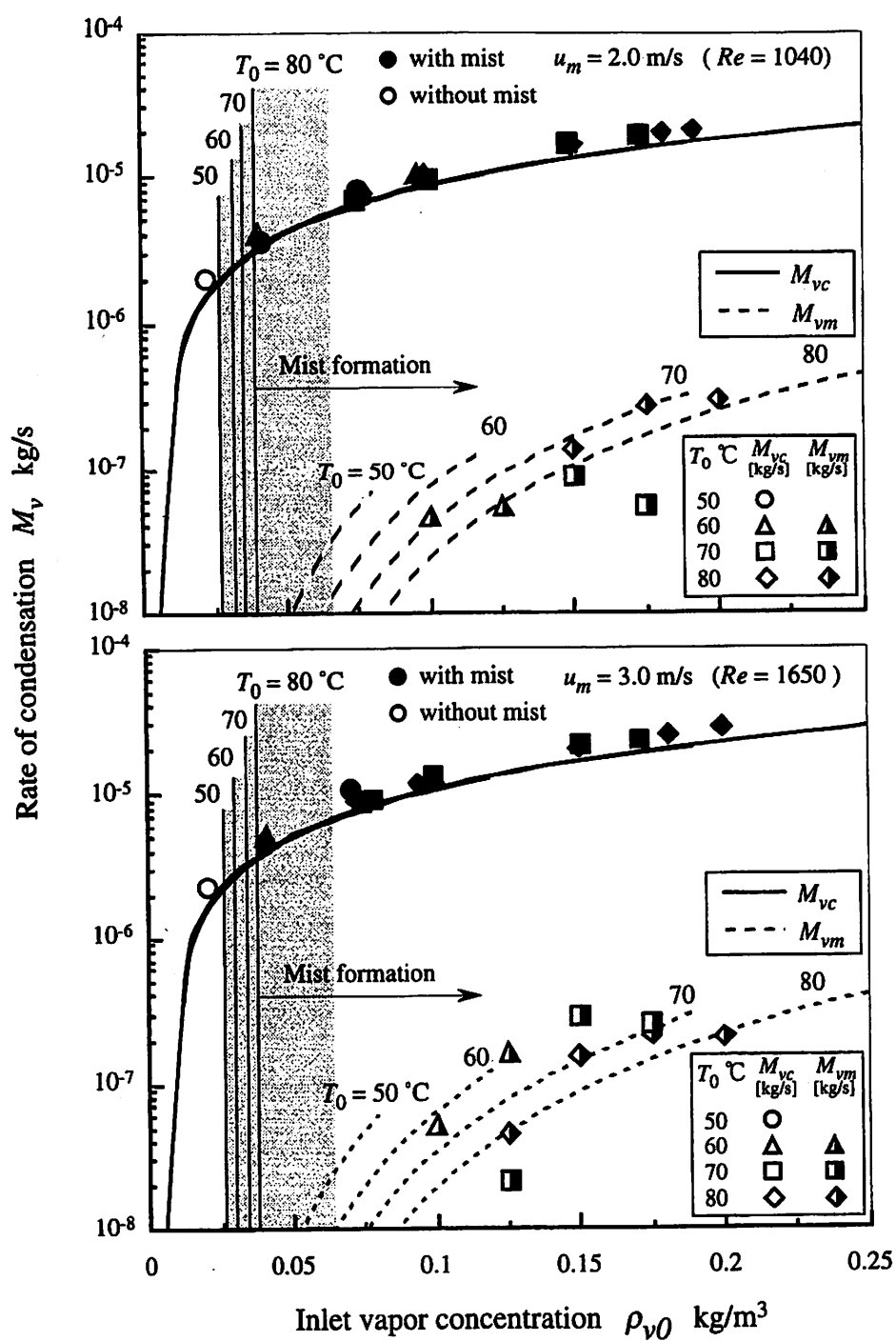


図4-11 冷却管内の壁面凝縮速度およびミスト発生速度
($L_c = 400\text{ mm}$, $d = 9.09\text{ mm}$)

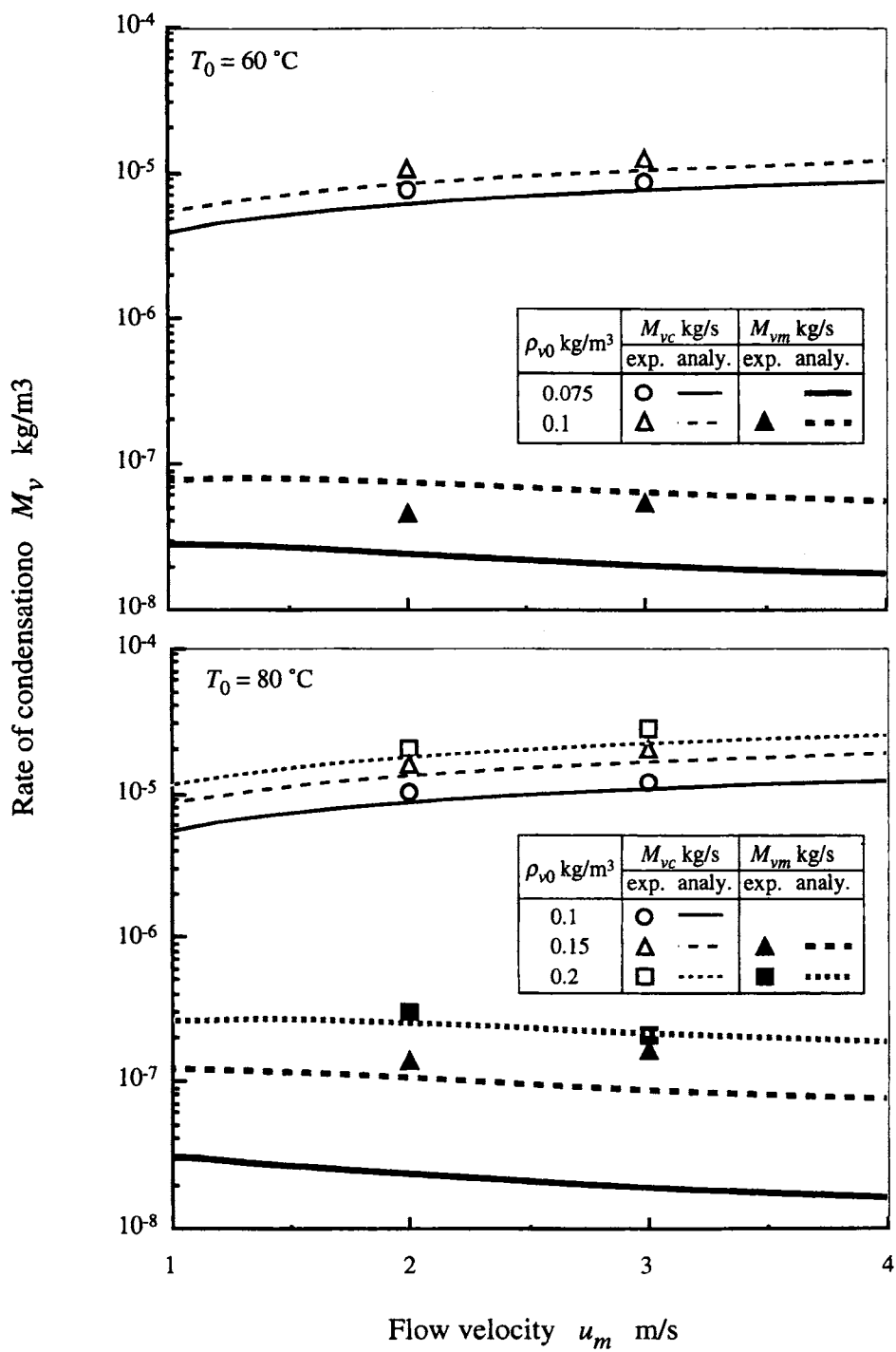


図4-12 流速と凝縮速度の関係 ($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm)

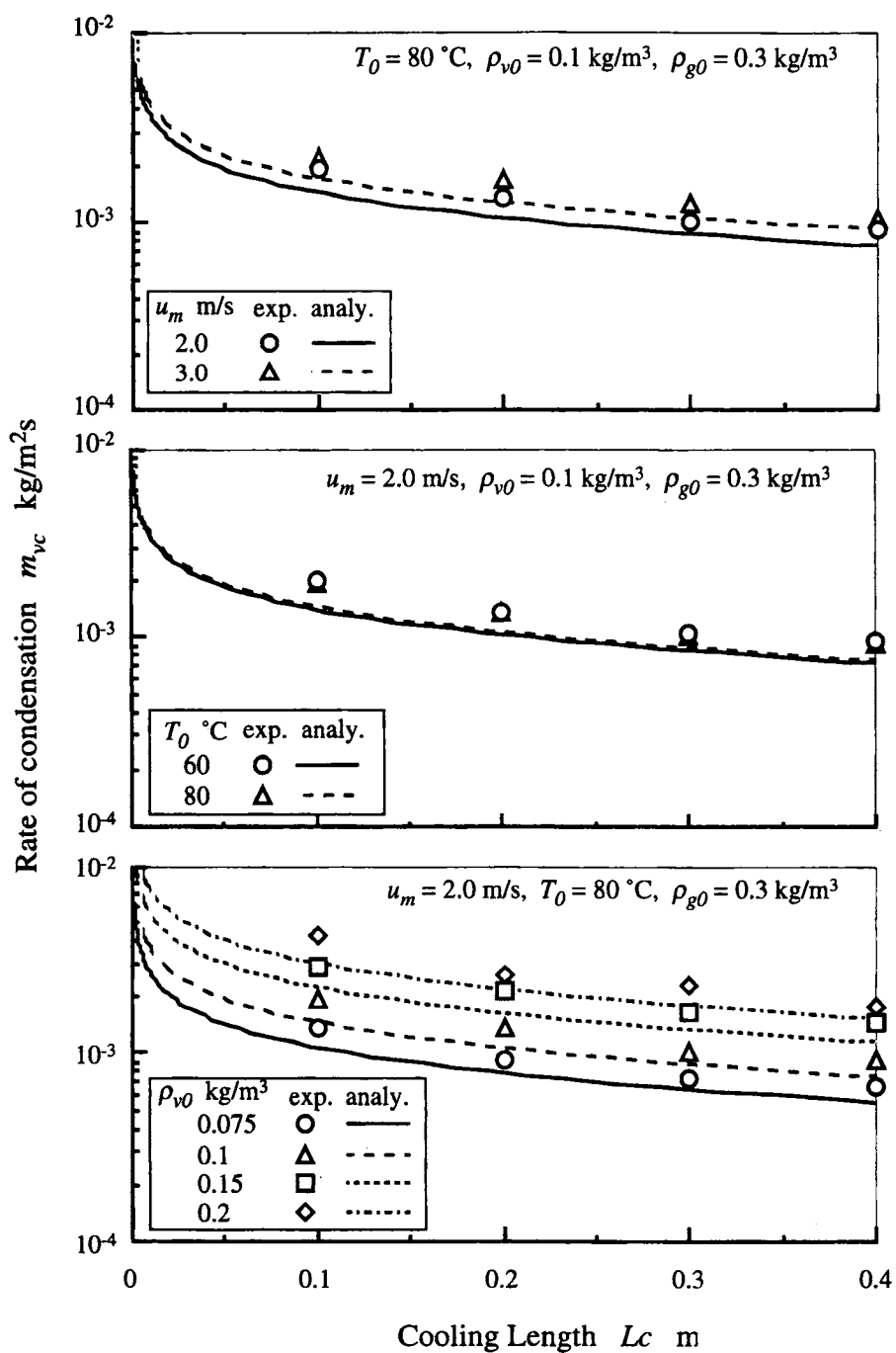


図4-13 単位面積当たりの平均凝縮速度の冷却部長さに対する変化

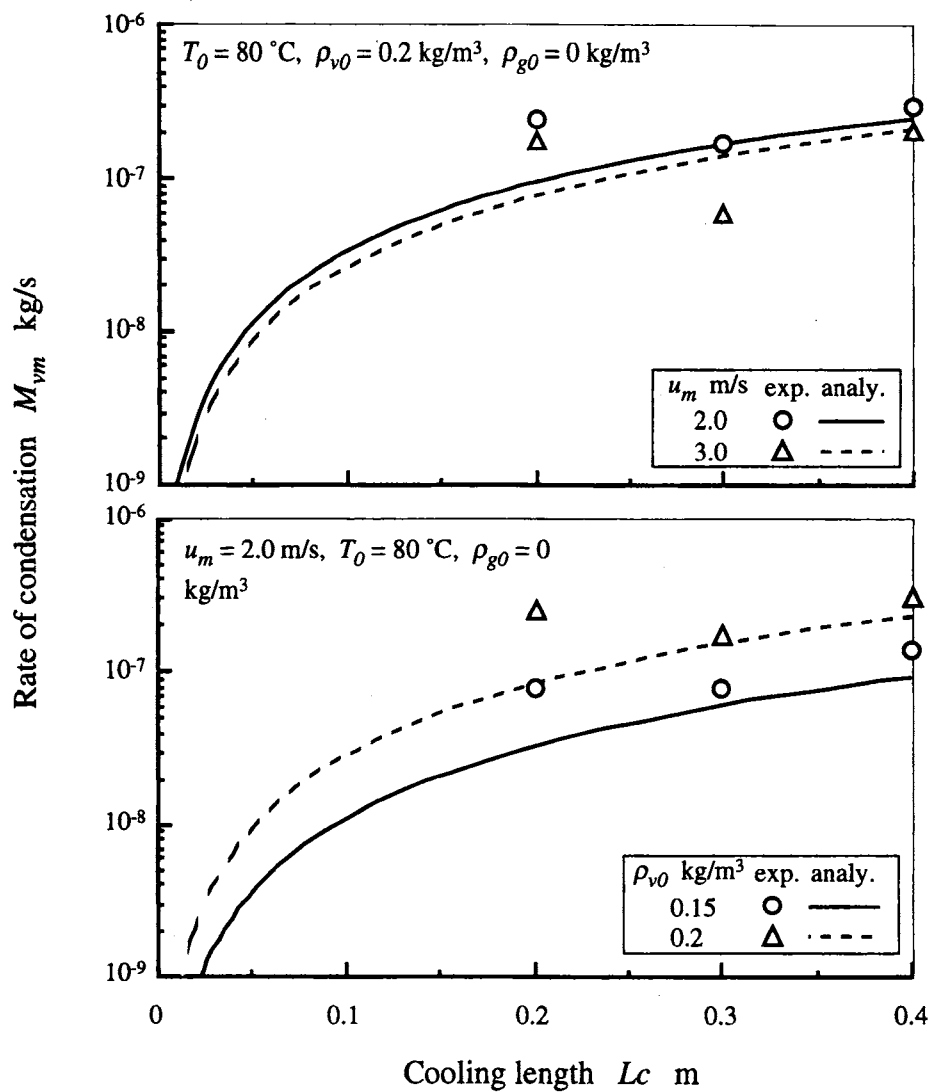


図4-14 ミスト発生速度の流れ方向に対する変化

4-3 ガス吸収速度

本節では、まず凝縮液中ガス濃度についての結果を示し、その後、壁面凝縮液膜およびミストへのガス吸収速度について、冷却部長さ、流速、入口温度、入口蒸気濃度および入口ガス濃度の影響を検討する。

(1) 凝縮液中ガス濃度

凝縮液膜およびミスト滴中のガス濃度と入口ガス濃度の関係について、入口温度ごとに入口蒸気濃度をパラメータとして、流速別に図4-15(a), (b)に示す。これより、凝縮液膜中のガス濃度は入口ガス濃度と比例関係にあることがわかる。実験結果は、解析結果よりも低い値を示しているが、入口ガス濃度に比例して増加する傾向が見られる。この解析値との差異については、凝縮潜熱の放出に伴う温度上昇により溶解度が低下することなどによるものと考えられる。また、解析結果は入口ガス濃度に関係であるが、実験結果は入口蒸気濃度の増加によっても濃度が増加する傾向が見られる。これは、解析では考慮していない半径方向の対流により、ガスが気液界面で濃縮されるためであると推測する。すなわち、蒸気濃度の増加に伴い壁面への凝縮速度が増加し、それによって誘起された半径方向の流れによりガス分子の半径方向の移動速度も増加するが、液膜に吸収されなかったガスは気液界面で濃縮され、それにより界面でのガス分圧が上昇するためと考えられる。

一方、ミスト滴中のガス濃度は、凝縮液膜中のガス濃度と同様に入口ガス濃度と比例関係にある。また、解析結果は入口蒸気濃度の増加に伴い若干高くなる傾向が見られるが、これは、入口蒸気濃度の増加により、ガス濃度の高い管中心付近でのミストの発生量が増加するためと考えられる。実験結果は、解析値よりも低い値を示すものの、入口ガス濃度の増加に伴い濃度が増加する傾向が見られる。なお、両者の差異については、(1) ミストの回収精度の問題（電気集塵装置内の凝縮液が含まれている可能性がある）、(2) 回収するミスト量が微量であること（蒸留水で希釈する際の誤差が大きくなる）などによるものと推測する。

図4-16に、凝縮液膜およびミスト滴中のガス濃度と平均流速の関係を、入口ガス濃度をパラメータとして示す。凝縮液膜中のガス濃度およびミスト滴中のガス濃度は流速に関係であることがわかる。これは、凝縮速度とガス吸収速度の変化が相似的であるためと考えられる。

図4-17に、凝縮液膜およびミスト滴中のガス濃度と入口温度の関係について、入口ガス濃度をパラメータとして示す。凝縮液膜中のガス濃度は入口温度に関係であり、実験結果においてもその傾向が見られる。ミスト滴中のガス濃度は、入口温度の上昇に伴い減少する傾向を示す。これは、気流温度の上昇

によりミスト滴の溶解度が低下するためである。実験結果は、解析値より低い値を示すが、傾向的に一致している。

次に、凝縮液膜およびミスト滴中のガス濃度の冷却部長さに対する関係について、各種パラメータを用いて図4-13、4-14 に示す。凝縮液膜中のガス濃度についての解析結果は、流れ方向に一定となっており、壁面への凝縮速度と凝縮液膜へのガス吸収速度が、流れ方向に対して同じ割合で減少することがわかる。実験結果は、前述した理由で溶解度が減少するため解析結果より低い値を示しているが、両者の差は冷却部長さが短くなるほど大きくなる傾向を示す。これについては、冷却部長さの減少に伴い、冷却管入口直後の壁面温度の高い領域の冷却壁面全体に占める割合が増加する結果、冷却壁面の平均温度が高くなり、それによって溶解度が小さくなるためと考えられる。

一方、ミスト滴中のガス濃度は、流れ方向に僅かに減少する傾向を示す。これは、下流へ行くにしたがって気流中のガス濃度が減少する結果、ミスト滴界面との濃度差が小さくなるためと考えられる。実験結果は、前述した測定精度上の問題から、解析結果よりかなり低く、定性的な傾向も得られていない。

(2) ガス吸収速度

凝縮液膜へのガス吸収速度と入口ガス濃度の関係について、入口温度ごとに入口蒸気濃度をパラメータとして図4-20(a),(b)に示す。ガス吸収速度は入口ガス濃度および蒸気濃度の増加に伴い増加する傾向を示す。実験値は解析値に比して若干小さいものの、ほぼ一致していると言える。なお、両者の差については、凝縮潜熱の放出による温度上昇により溶解度が低下することなどによるものと考えられる。

図4-21に、凝縮液膜へのガス吸収速度と平均流速の関係を、入口ガス濃度をパラメータとして示す。凝縮液膜へのガス吸収速度は、流速の増加に伴い増加する。これは、流速の増加により物質伝達率が向上するためである。

図4-22に、凝縮液膜へのガス吸収速度と入口温度の関係を、入口ガス濃度をパラメータとして示す。壁面凝縮速度と同様に、ガス吸収速度は入口ガス温度に無関係であることがわかる。

図4-23に、単位面積当たり凝縮液膜への平均ガス吸収速度の冷却部長さに対する関係を、各種パラメータを用いて示す。解析結果については、平均凝縮速度と同様に、濃度境界相の発達により管入口から出口に向かって徐々に減少しているが、実験結果については、冷却部長さが短くなるほど解析値との差が大きくなる傾向が見られる。この原因は、前述した理由で冷却部長さが短くなるほど凝縮液中のガス濃度が低下するためと考えられる。なお、パラメータの影響は冷却部長さが 400 mm の場合と同様であ

る。

次に、ミストへのガス吸収速度と入口ガス濃度の関係について、入口温度ごとに入口蒸気濃度をパラメータとして図4-24に示す。ミストへのガス吸収速度は、凝縮液膜へのガス吸収速度と同様に、入口ガス濃度および蒸気濃度の増加に伴い増加する傾向を示す。実験結果はばらつきがあるものの、解析値とはほぼ一致している。

図4-25に、ミストへのガス吸収速度と平均流速の関係を、入口ガス濃度をパラメータとして示す。4-2節で述べたように、流速の増加はミスト発生速度の減少を招き、したがってミストへのガス吸収速度も減少する。

図4-26に、ミストへのガス吸収速度と入口温度の関係を、入口ガス濃度をパラメータとして示す。ミストへのガス吸収速度は、温度の上昇に伴い減少する傾向を示す。これは、温度上昇によりミスト発生速度が減少することおよびミスト滴の溶解度が低下することによるものである。

図4-27に、ミストへのガス吸収速度の冷却部長さに対する関係を、各種パラメータを用いて示す。ミストへのガス吸収速度は、ミスト発生速度と同様に管入口から出口に向かって増加する。実験結果はばらつきがあるものの解析値とはほぼ一致している。

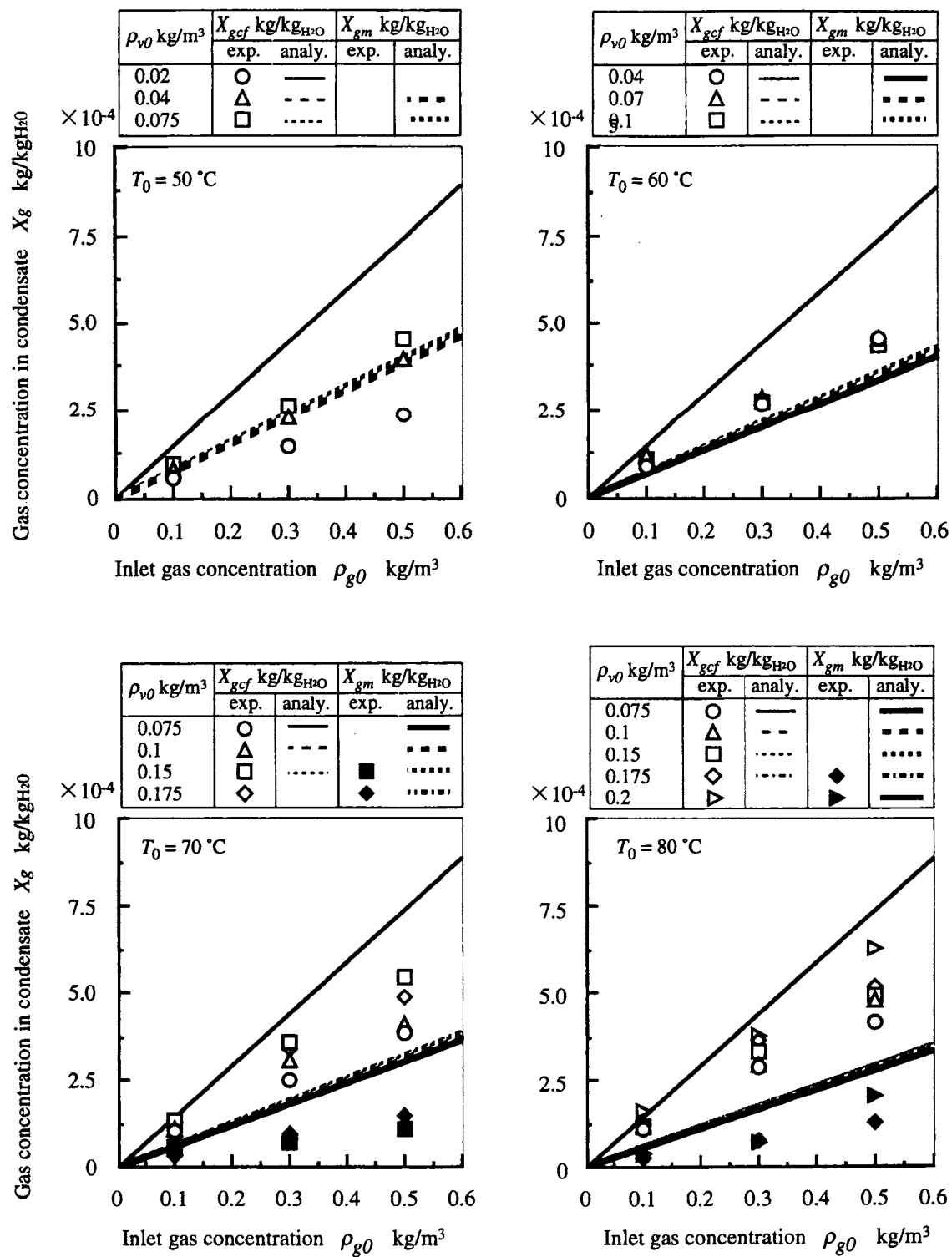


図4-15 (a) 凝縮液中ガス濃度
 ($L_c = 400\text{ mm}$, $d = 9.09\text{ mm}$, $T_w = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $u_m = 2\text{ m/s}$)

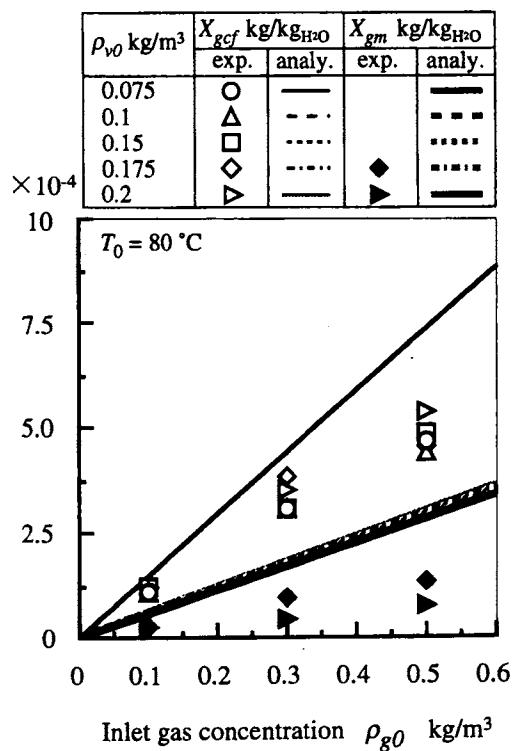
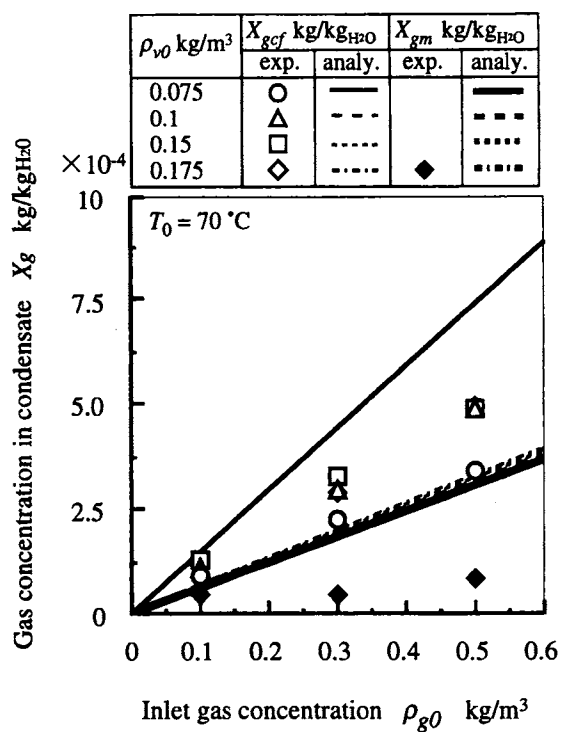
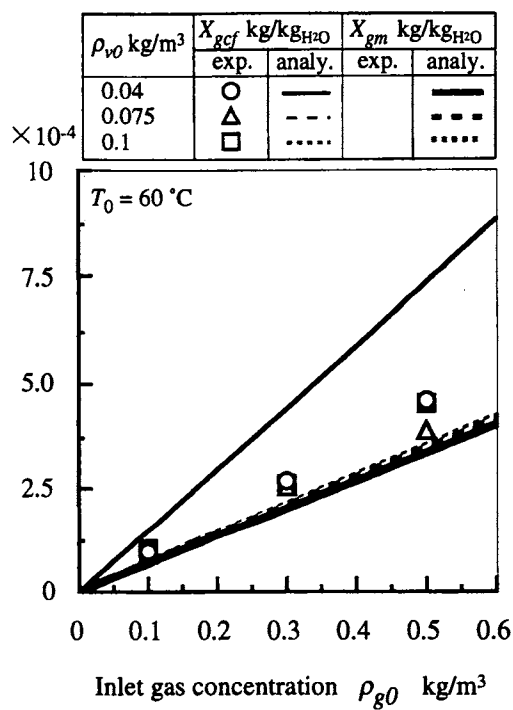
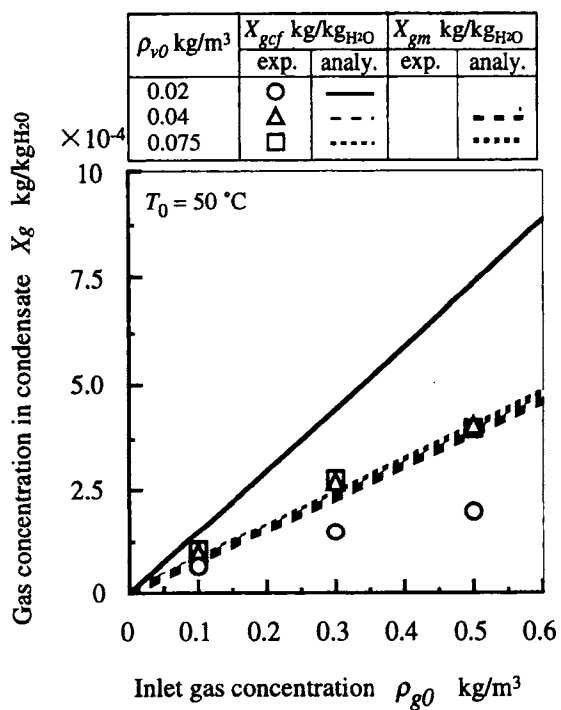


図4-15 (b) 凝縮液中ガス濃度
 ($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $T_w = 3^\circ\text{C}$, $u_m = 3$ m/s)

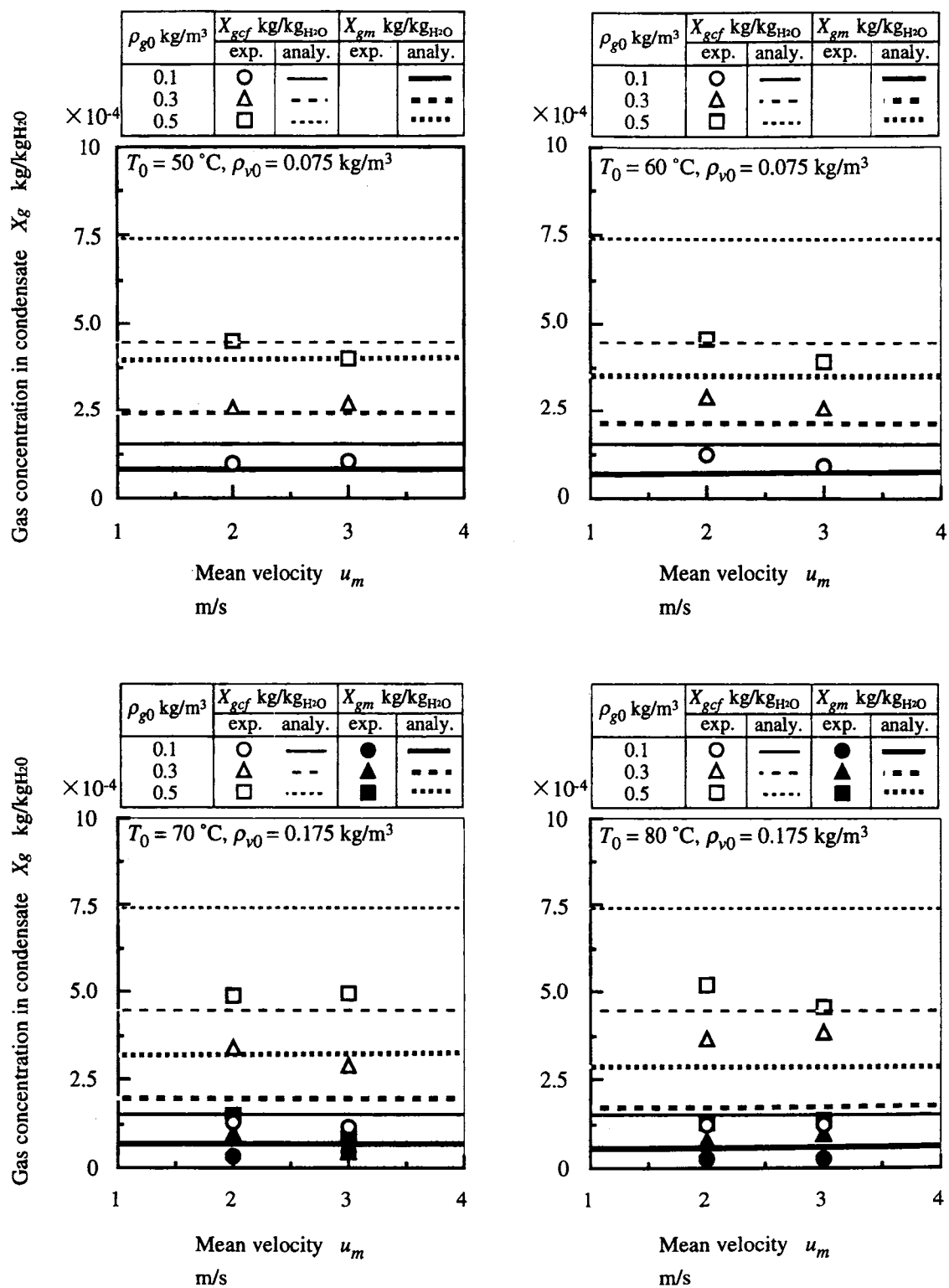


図4-16 凝縮液中ガス濃度と平均流速の関係
($L_c = 400 \text{ mm}$, $d = 9.09 \text{ mm}$, $T_w = 3^\circ\text{C}$)

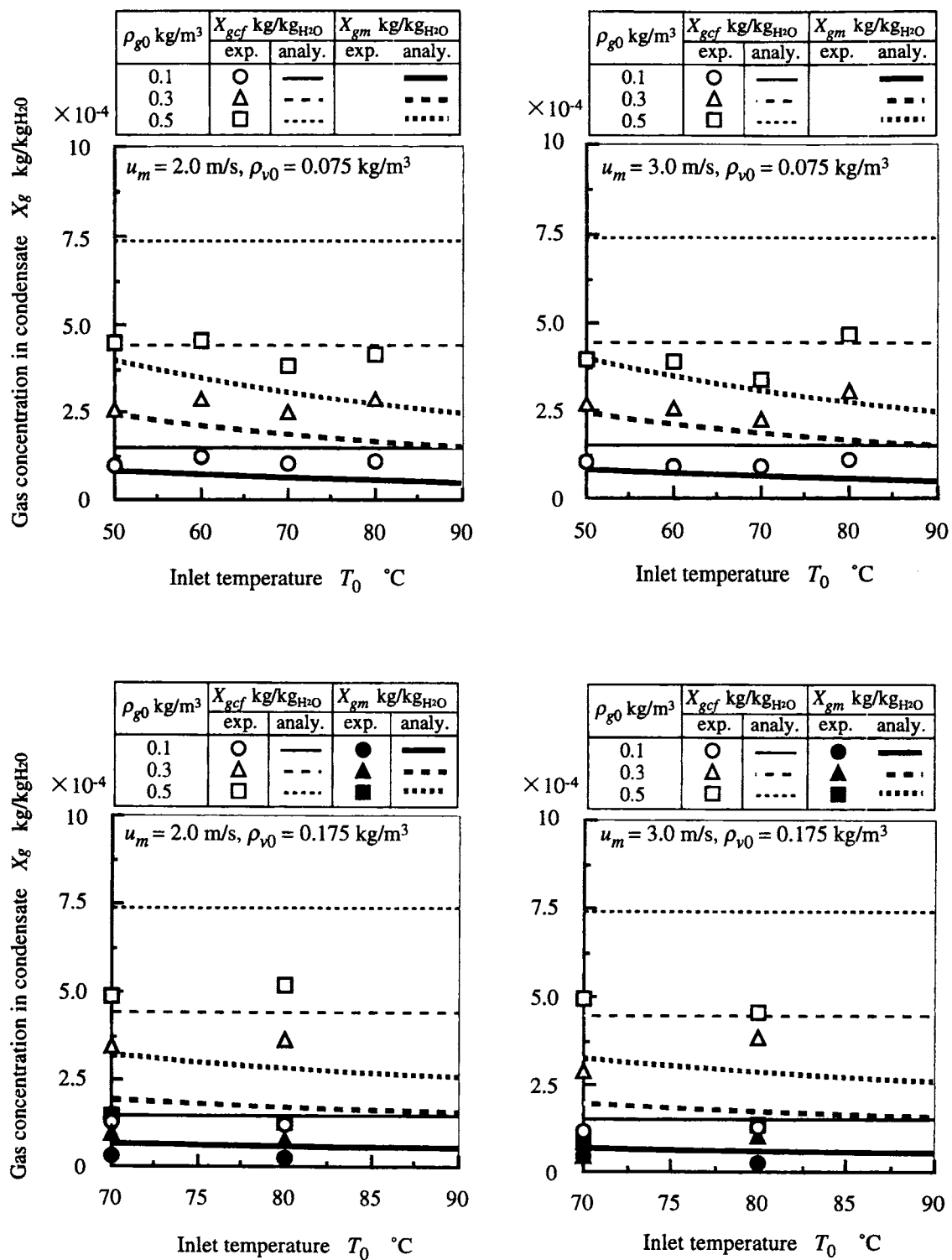


図4-17 凝縮液中ガス濃度と入口温度の関係
($L_c = 400 \text{ mm}$, $d = 9.09 \text{ mm}$, $T_w = 3^\circ\text{C}$, $u_m = 2 \text{ m/s}$)

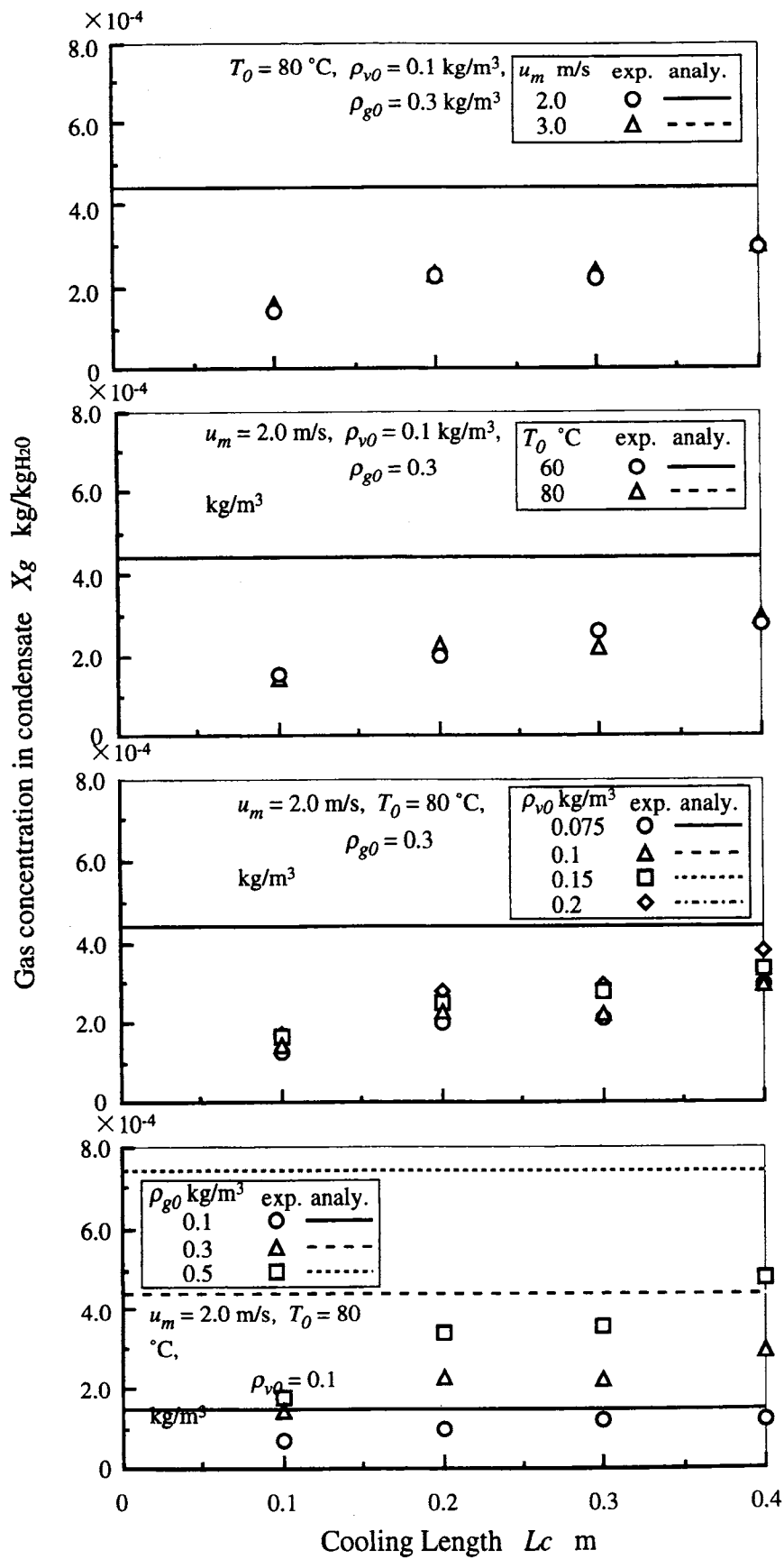


図4-18 凝縮液中ガス濃度の流れ方向変化

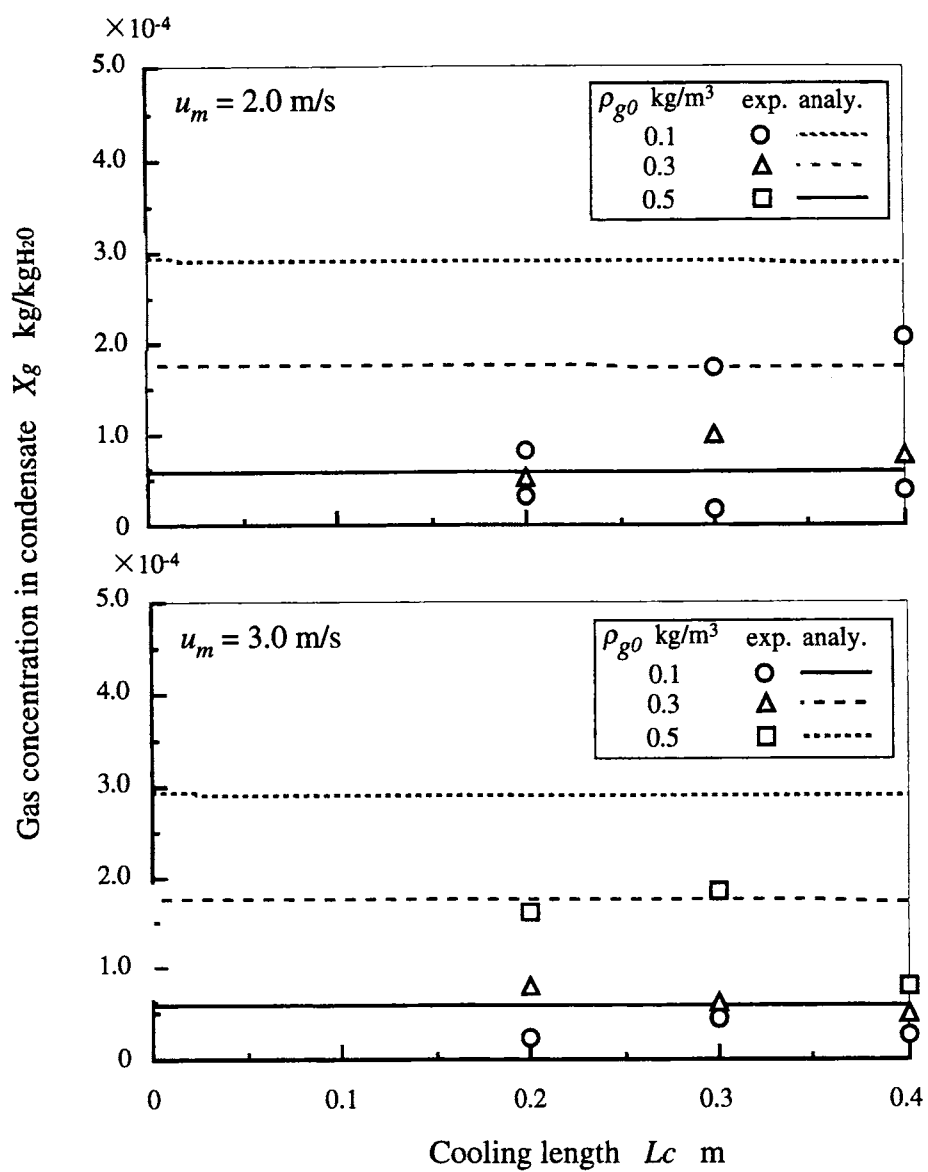


図4-19 ミスト滴中のガス濃度の冷却部長さに対する関係
($T_0 = 80^\circ\text{C}$, $T_w = 3^\circ\text{C}$)

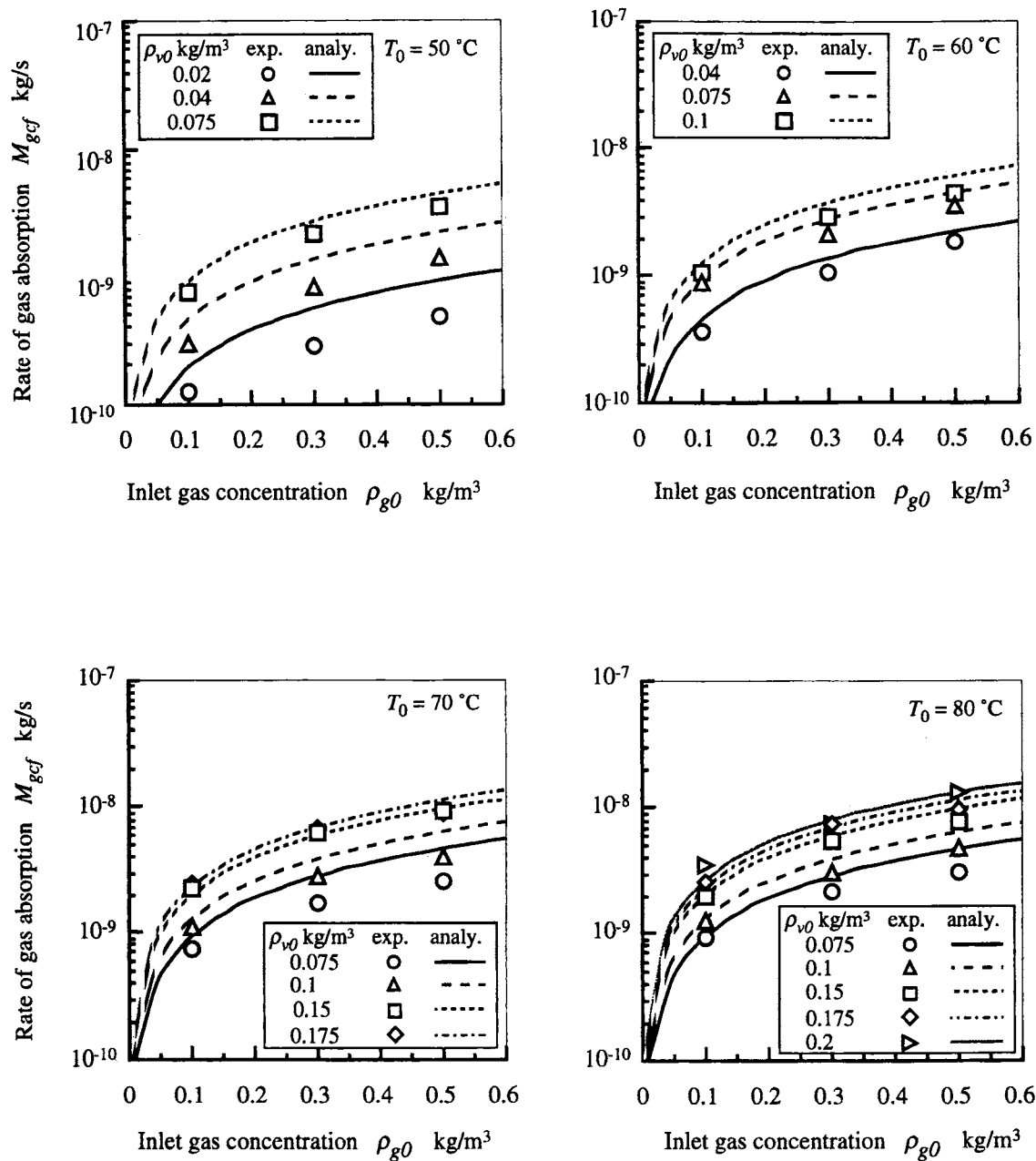


図4-20 (a) 凝縮液膜へのガス吸収速度
($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $T_w = 3^\circ\text{C}$, $u_m = 2.0$ m/s)

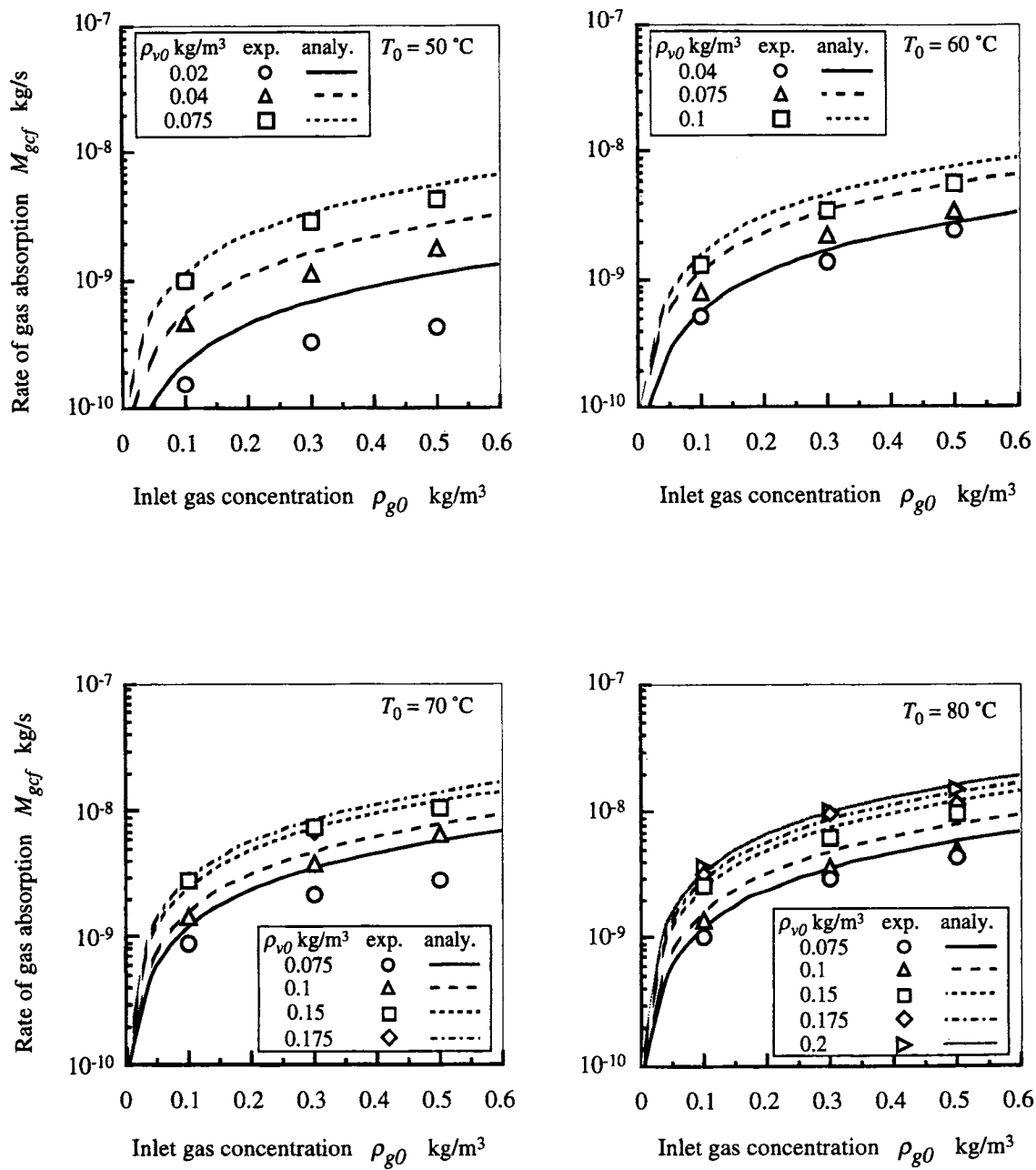


図4-20 (b) 凝縮液膜へのガス吸収速度
($L_c = 400$ mm, $d = 9.09$ mm, $T_w = 3^\circ\text{C}$, $u_m = 3.0$ m/s)

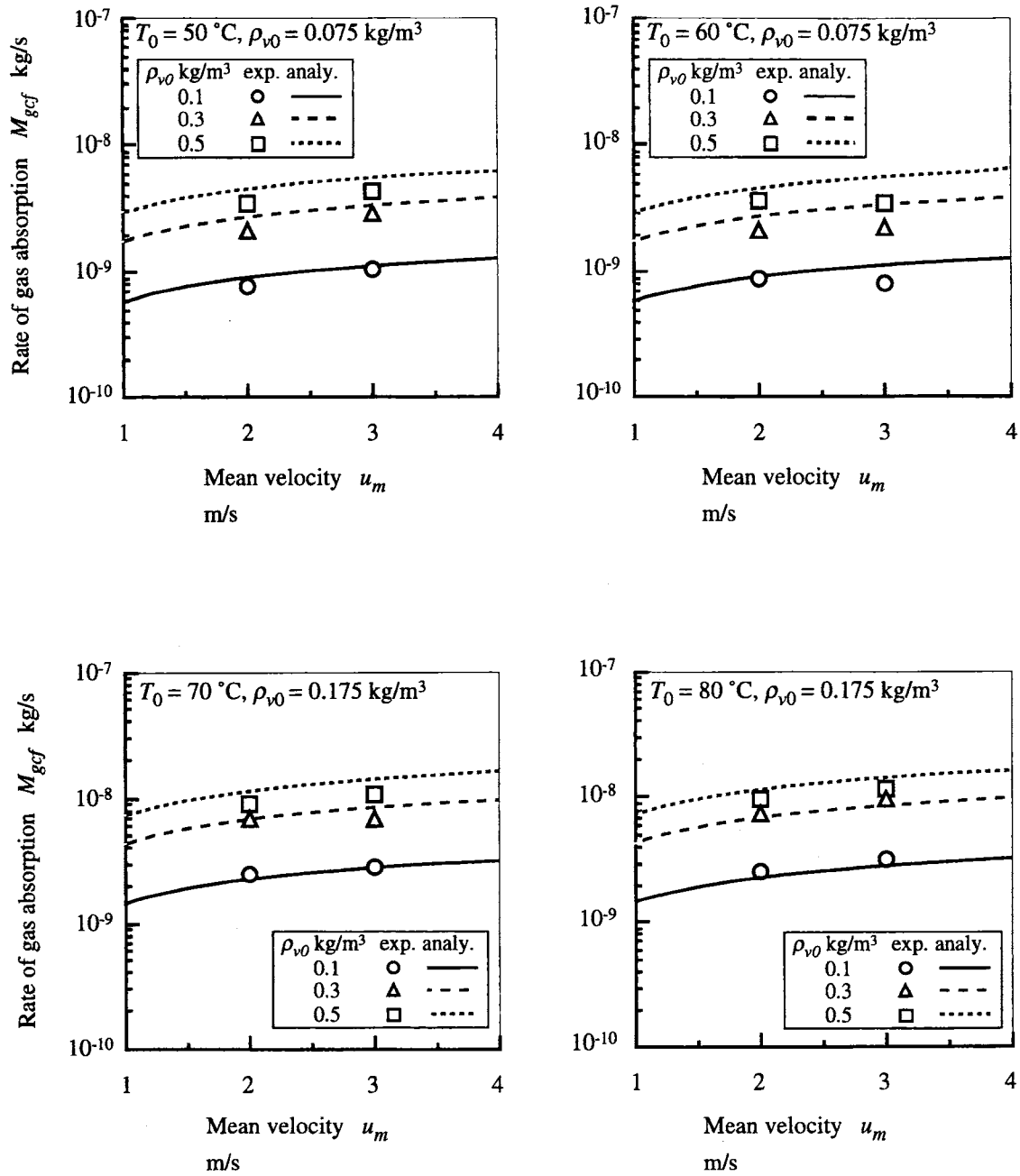


図4-21 凝縮液膜へのガス吸収速度と平均流速の関係
($L_c = 400 \text{ mm}$, $d = 9.09 \text{ mm}$, $T_w = 3^\circ\text{C}$)

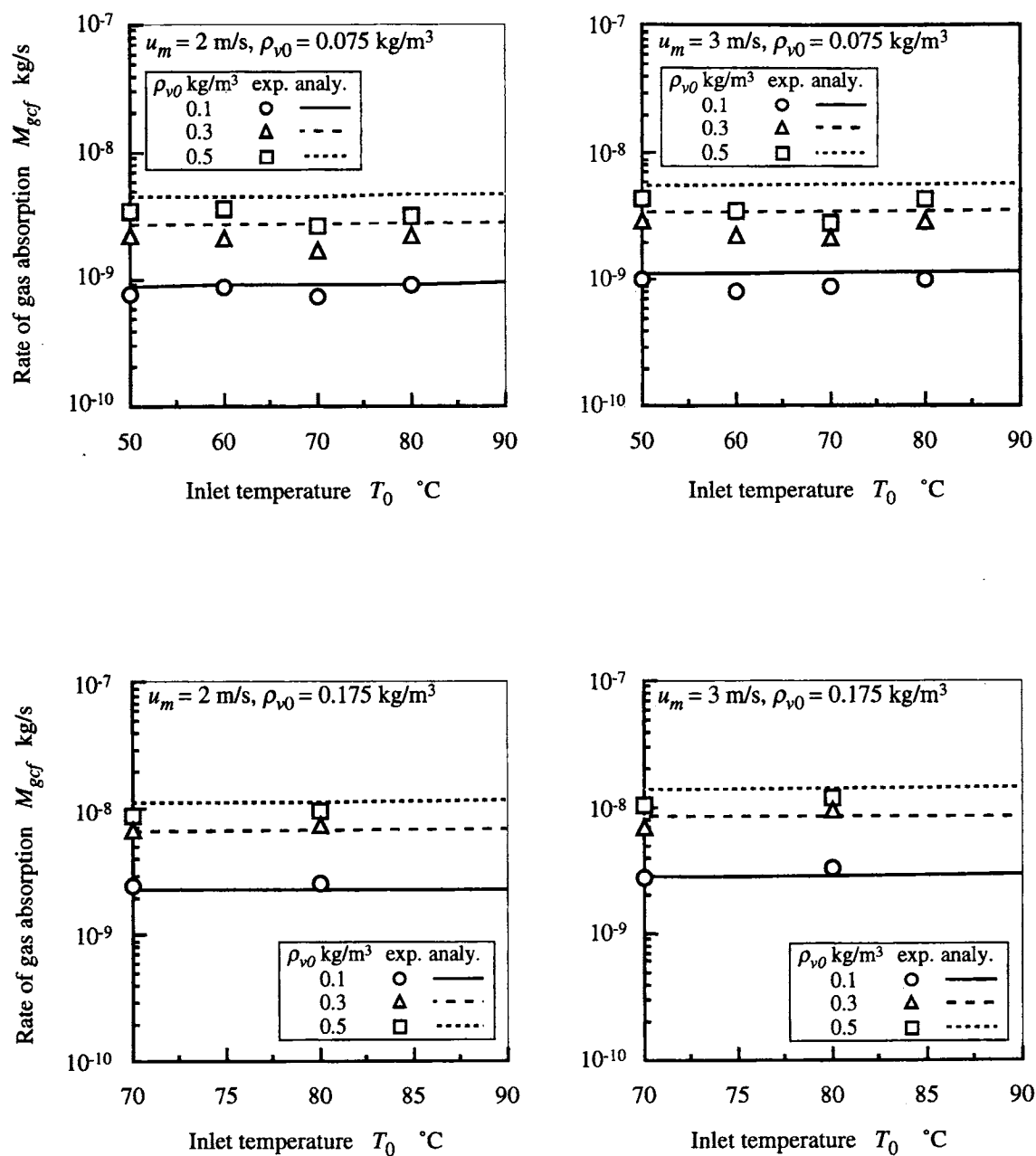


図4-22 凝縮液膜へのガス吸収速度と入口温度の関係
($L_c = 400 \text{ mm}$, $d = 9.09 \text{ mm}$, $T_w = 3 \text{ °C}$)

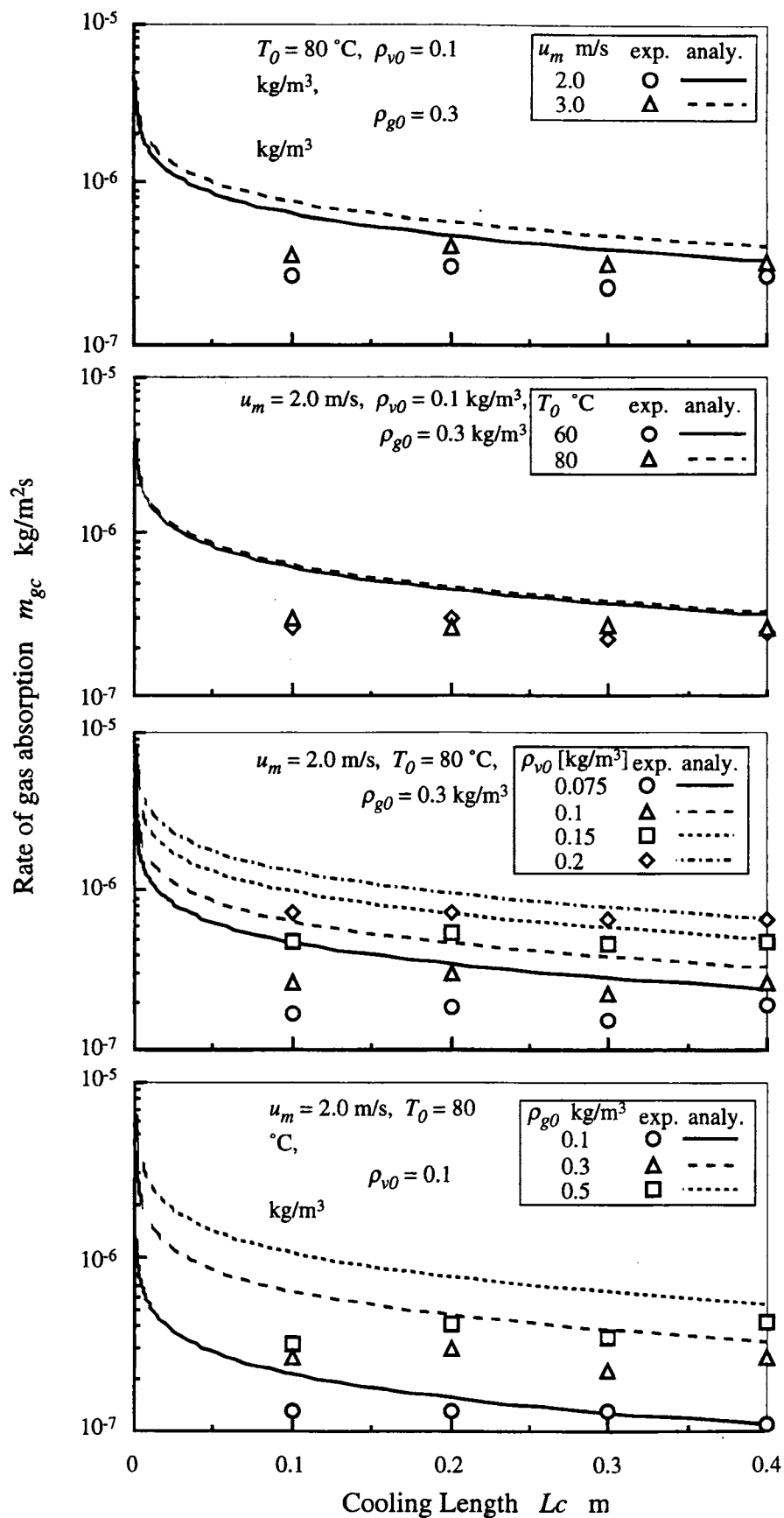


図4-23 凝縮液膜への平均ガス吸収速度の冷却部長さに対する関係

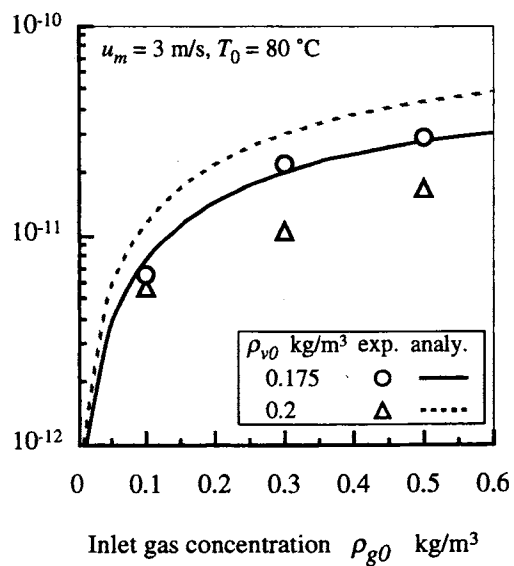
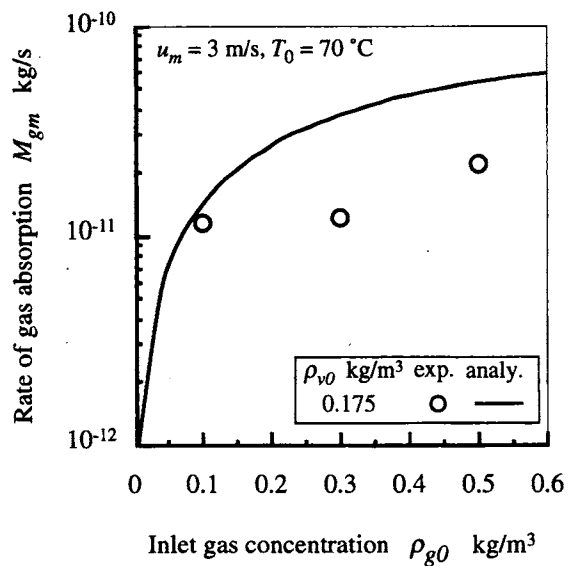
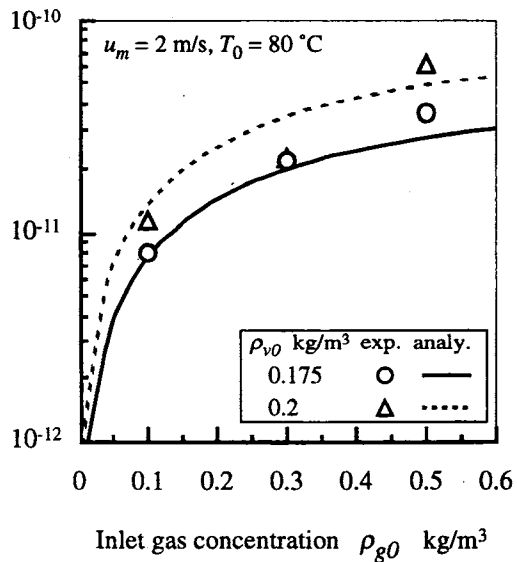
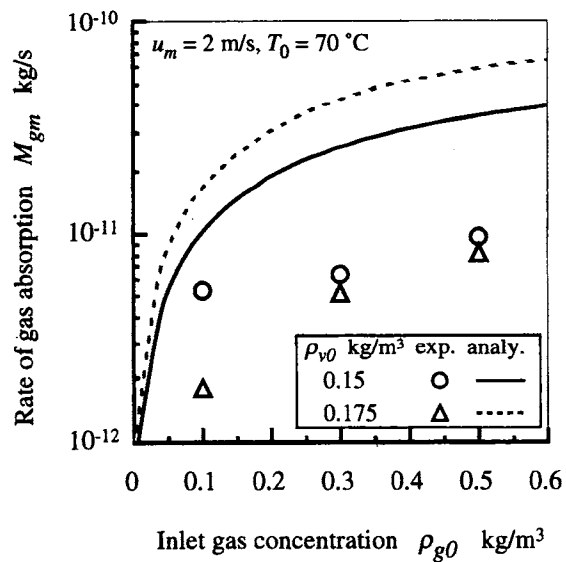


図4-24 ミストへのガス吸収速度
($L_c = 400 \text{ mm}$, $d = 9.09 \text{ mm}$, $T_w = 3 \text{ }^\circ\text{C}$)

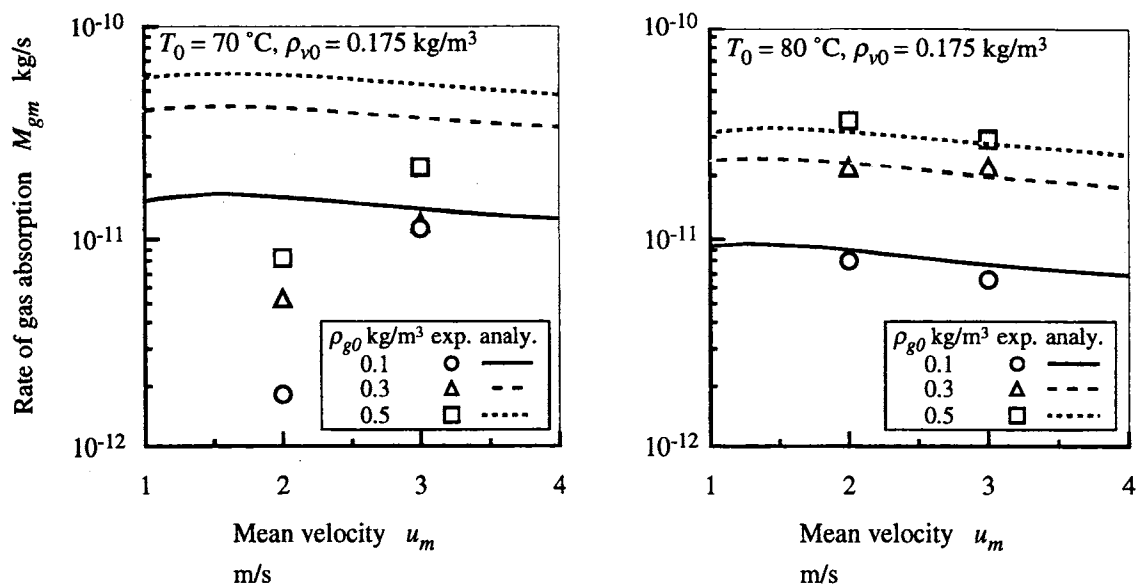


図4-25 ミストへのガス吸収速度と平均流速の関係
($L_c = 400\text{ mm}$, $d = 9.09\text{ mm}$, $\rho_{v0} = 0.175\text{ kg/m}^3$)

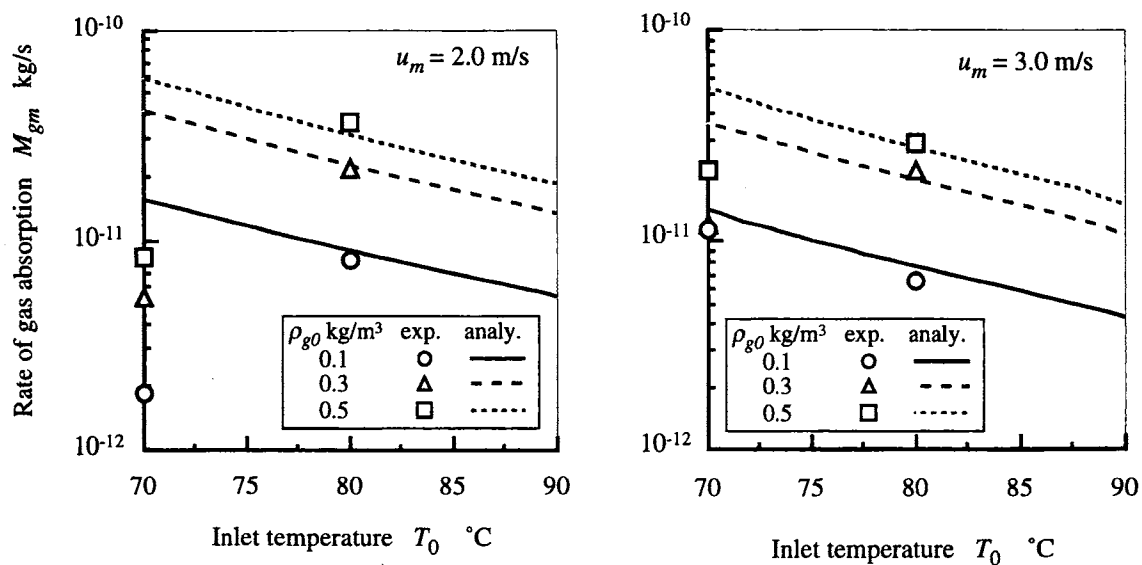


図4-26 ミストへのガス吸収速度と入口温度の関係
($L_c = 400\text{ mm}$, $d = 9.09\text{ mm}$, $\rho_{v0} = 0.175\text{ kg/m}^3$)

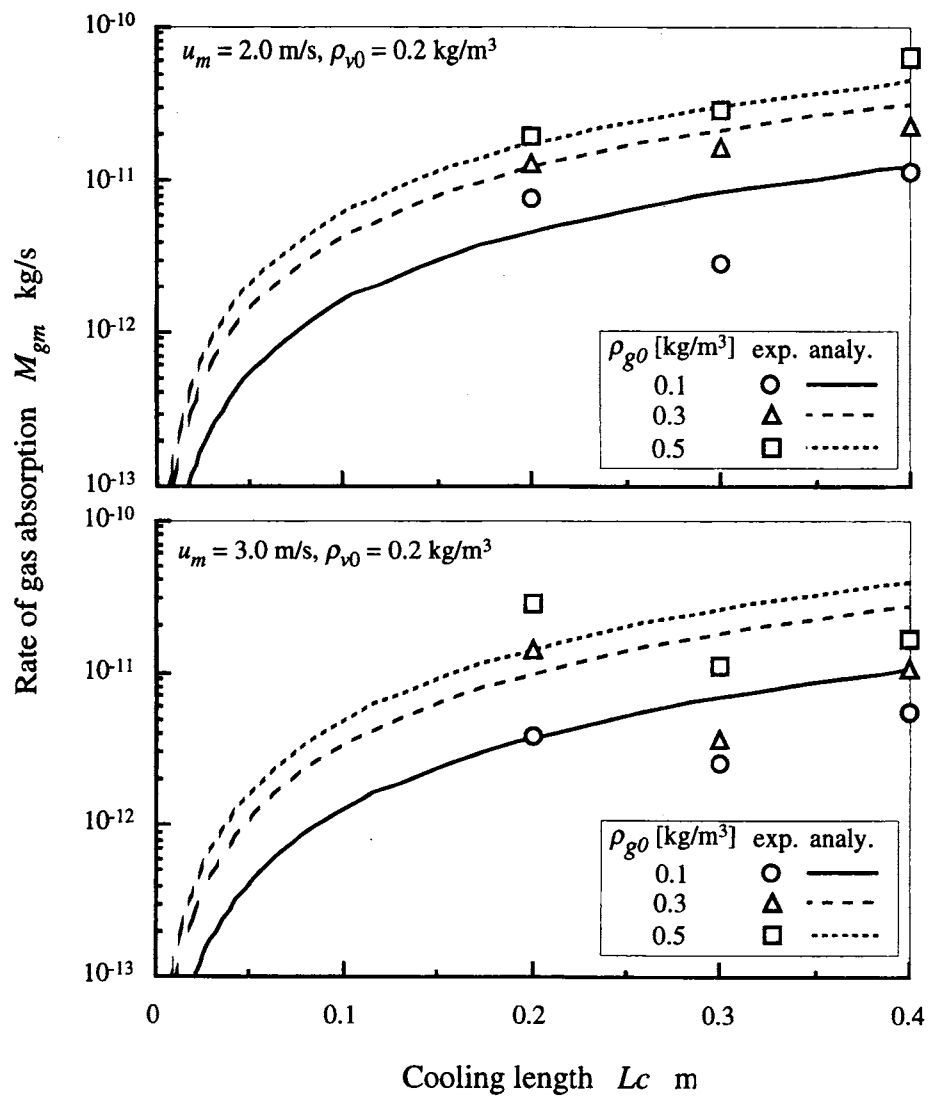


図4-27 ミストへのガス吸収速度の冷却部長さに対する関係
($T_0 = 80$ °C, $T_w = 3$ °C)

4. ガス回収率

(1) 凝縮効率およびミスト発生率

図4-28(a)～(e)に、冷却円管寸法および各種操作パラメータに対する凝縮効率の変化を示す。凝縮効率は、本研究の実験範囲では約70%で、入口蒸気濃度に無関係に、入口温度の上昇、冷却部長さの増加、および管半径と流速の減少に伴い高くなることがわかる。また、実験値は、すべての結果について解析値より大きくなっているが、定性的には一致している。なお、両者の差異については、4-2節で述べた理由で、壁面凝縮速度の実験値が解析値より高くなるためである。

各パラメータの影響として、冷却部長さに対する凝縮効率の増加は、冷却管内での全凝縮速度が増加するためであり、管半径の増加による凝縮効率の減少は、流入蒸気量が増えるためである。次に、流速の増加による凝縮効率の低下は、流速の増加に伴う物質伝達率の向上よりも、流入蒸気量の増加率の方が高いためである。入口温度に対する緩やかな凝縮効率の上昇は、温度上昇による拡散係数の増加と、温度低下に伴うミスト発生速度の増加によってもたらされる壁面凝縮速度の減少によるものと考えられる。

次に、図4-29(a)～(e)に、冷却円管寸法および各種操作パラメータに対するミスト発生率の変化を示す。ミスト発生率は数%であるが、冷却部長さと入口蒸気濃度の増加、流速の減少、および入口温度の低下に伴い増加し、管半径については極大値を示す。なお、実験値については測定精度上の問題よりばらつきが多く、解析値との定性的な一致は見られないが、定量的にはほぼ一致している。

各パラメータの影響として、冷却部長さに対するミスト発生率の増加は、冷却管内での全ミスト発生速度が増加するためである。管半径については、半径の増加に伴うミスト発生速度の増加率と流入蒸気濃度の増加率が、ある位置を境に逆転するために極大値を示すものと考えられる。平均流速、入口温度および入口蒸気濃度に対するミスト発生率の変化は、4-2節で述べたように、ミスト発生速度が、流速の減少、入口温度の低下、入口蒸気濃度の増加により増加するためである。

ミスト発生率と凝縮効率の比の各種パラメータに対する変化を図4-30(a)～(e)に示す。これらより、冷却部長さ、管半径、入口蒸気濃度の増加、流速の減少、および入口温度の低下により、流入蒸気のみが促進されることがわかる。

(2) 凝縮液膜によるガス回収率およびミストによるガス回収率

図4-31(a)～(f)に、冷却円管寸法および各種操作パラメータに対する凝縮液膜によるガス回収率の変化を示す。ガス回収率は、入口温度および入口ガス濃度には無関係で、冷却部長さと入口蒸気濃度の増加、

および管半径と流速の減少により向上することがわかる。また、実験値は解析値とよく一致している。

各パラメータの影響として、冷却部長さ、管半径および平均流速については、凝縮効率の場合と同様である。入口温度については、厳密には、温度低下に伴うミスト発生速度の増加により壁面凝縮速度が減少し、それによって凝縮液膜へのガス吸収速度が減少するため、凝縮液膜によるガス回収率は減少すると考えられるが、ミストの発生量が比較的少ないのでそのような傾向が現れないものと考えられる。蒸気濃度の増加によるガス回収率の増加は、蒸気濃度の増加により凝縮速度が増加するためである。

次に、冷却円管寸法および各種操作パラメータに対するミストによるガス回収率の変化を図4-32(a)～(f)に示す。ミストによるガス回収率は、冷却部長さと入口蒸気濃度の増加、流速と入口ガス濃度の減少、および入口温度の低下により向上し、管半径については極大値を示す。また、実験値は解析値とほぼ一致している。

各パラメータの影響としては、冷却部長さ、管半径、平均流速および入口蒸気濃度については、ミスト発生率の場合に述べた理由でミスト発生速度が変化するためである。入口温度の低下によるガス回収率の増加は、温度低下によるミスト発生速度の増加と溶解度の増大によるものである。また、入口ガス濃度に対する変化は、ガス濃度の増加に伴って混合気体の熱伝導率が小さくなることにより、管内のミスト発生領域が減少し、その結果ミスト発生速度が減少するためと考えられる。

ミストによるガス回収率と凝縮液膜によるガス回収の比の各種パラメータに対する変化を図4-33(a)～(f)に示す。これらより、冷却部長さ、管半径、入口蒸気濃度、入口ガス濃度の増加、流速の減少、および入口温度の低下によりミストによるガス回収が促進されることがわかる。

また、ガス回収率は、非常に低い値となっているが、これを向上させるためには、

- (i) 溶解度の高い凝縮性気体を用いる。
- (ii) 気体全体の圧力を上げることにより、溶質ガスの分圧を上昇させる。

ことなどが考えられる。さらに、ミスト化による拡散距離の短縮、吸収表面積の増加といった効果を利用すれば、気相中に微量に存在する溶質ガスの回収に対して高いガス回収率が得られる可能性があると推測される。

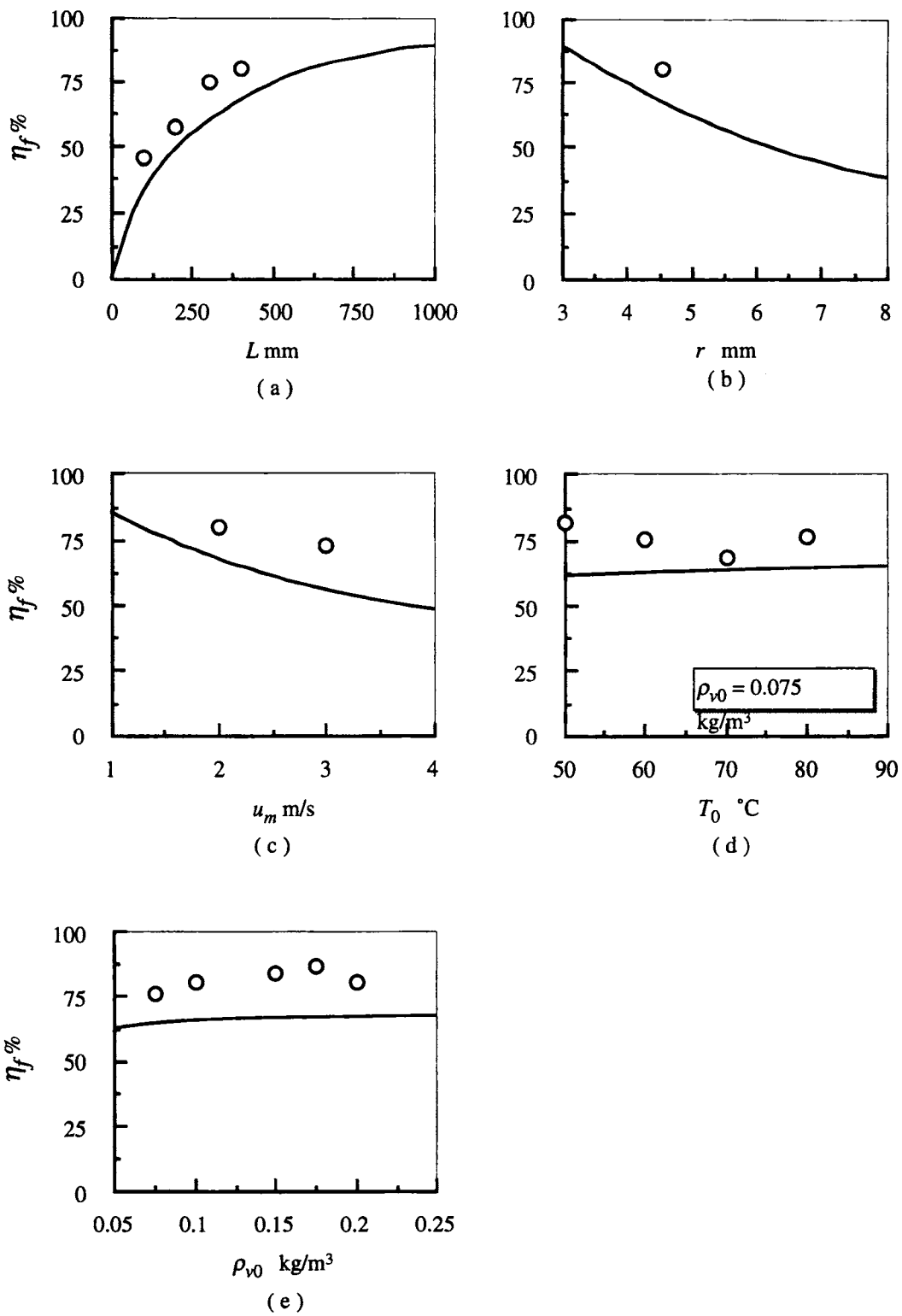


図4-28 各種パラメータに対する凝縮効率の変化

$$\left(\begin{array}{l} Lc = 400 \text{ mm}, r = 4.545 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}, T_w = 3 \text{ }^\circ\text{C} \\ \rho_{v0} = 0.2 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.3 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right)$$

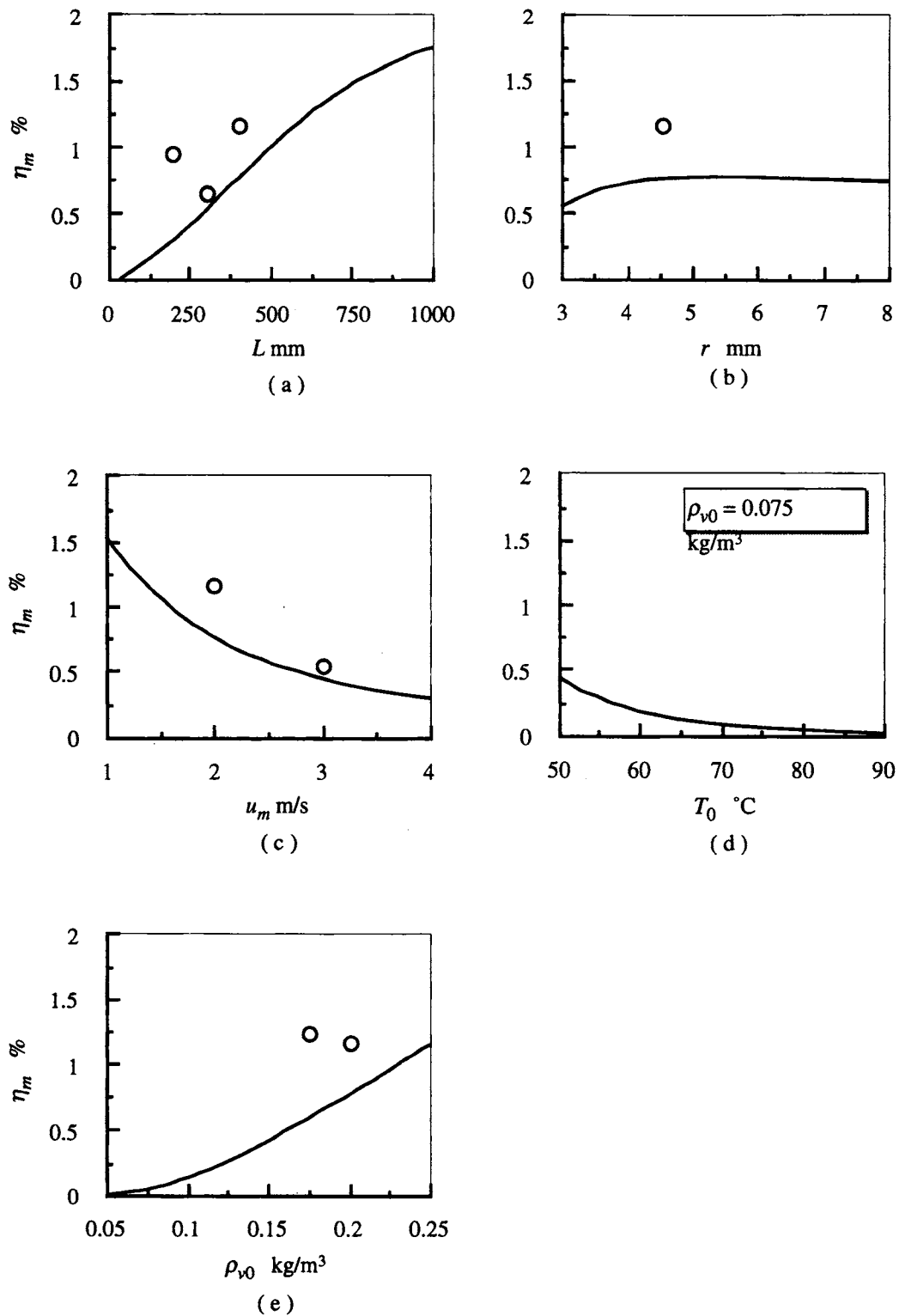


図4-29 各種パラメータに対するミスト発生率の変化

$$\left(\begin{array}{l} Lc = 400 \text{ mm}, r = 4.545 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}, T_w = 3 \text{ }^\circ\text{C} \\ \rho_{v0} = 0.2 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.0 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right)$$

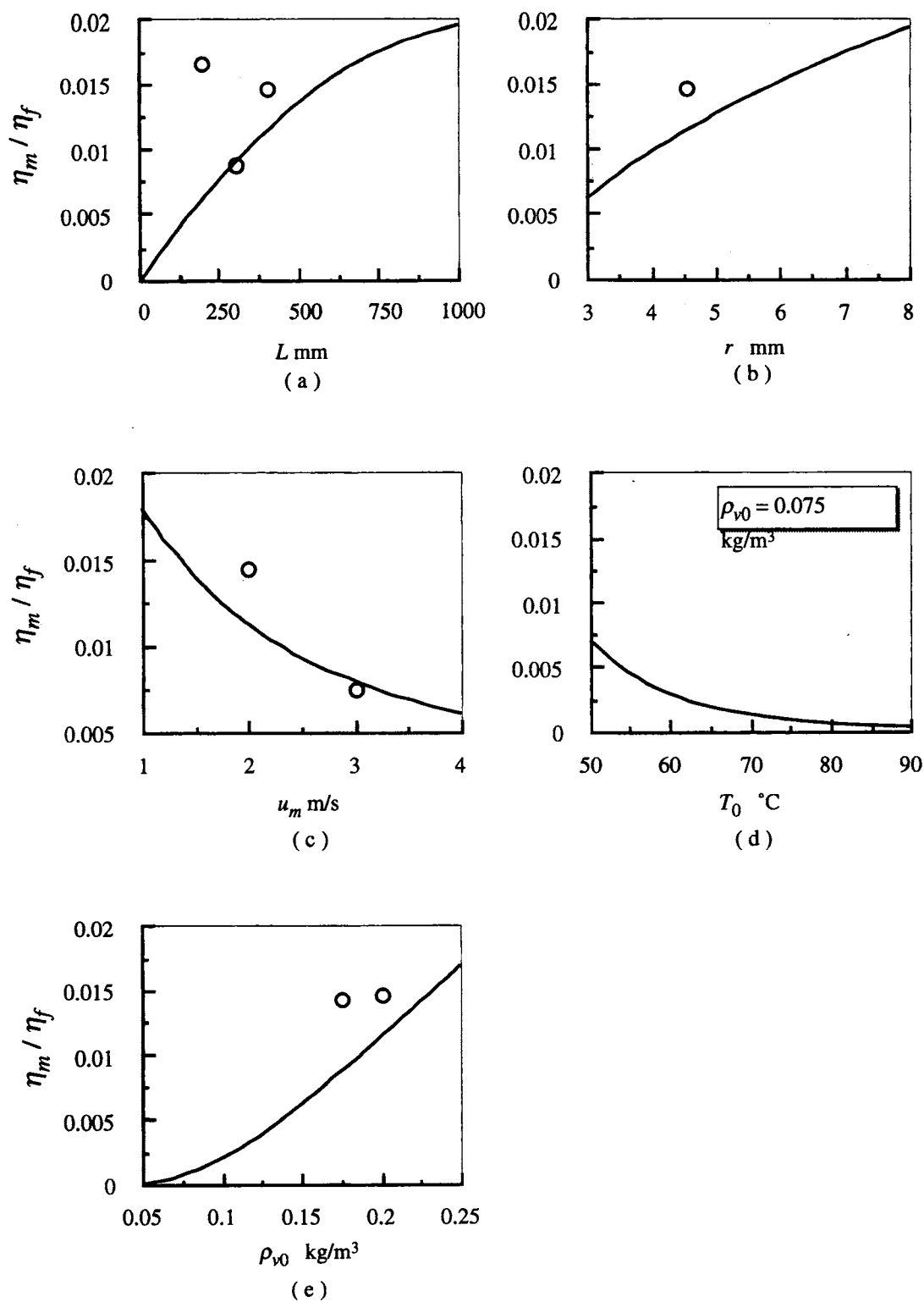


図4-30 各種パラメータに対する η_m/η_f の変化

$$\left(\begin{array}{l} Lc = 400 \text{ mm}, r = 4.545 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}, T_w = 3 \text{ }^\circ\text{C} \\ \rho_{v0} = 0.2 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.3 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right)$$

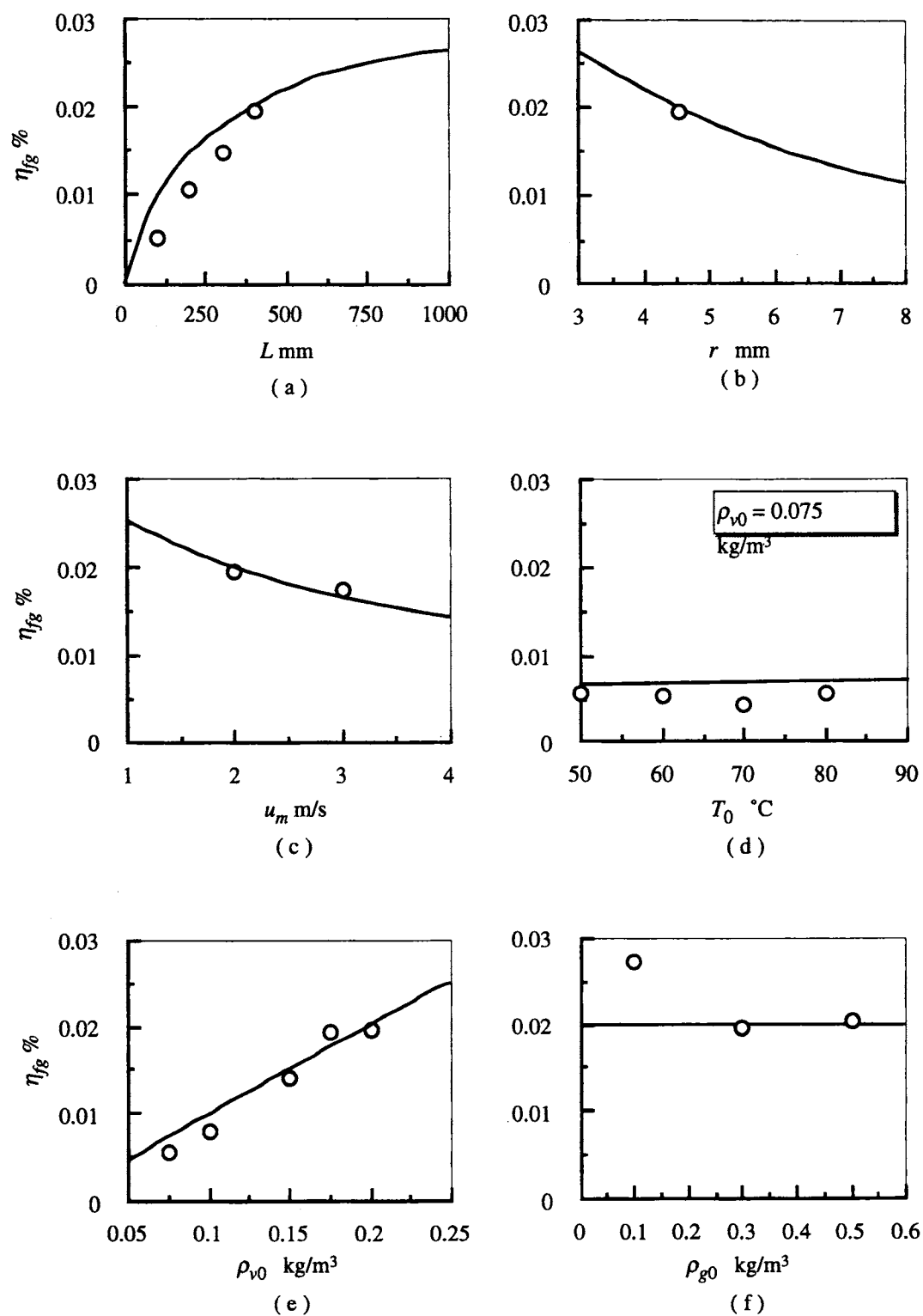


図4-31 各種パラメータに対するガス回収率の変化

$$\left(\begin{array}{l} Lc = 400 \text{ mm}, r = 4.545 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 80^\circ\text{C}, T_w = 3^\circ\text{C} \\ \rho_{v0} = 0.2 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.3 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right)$$

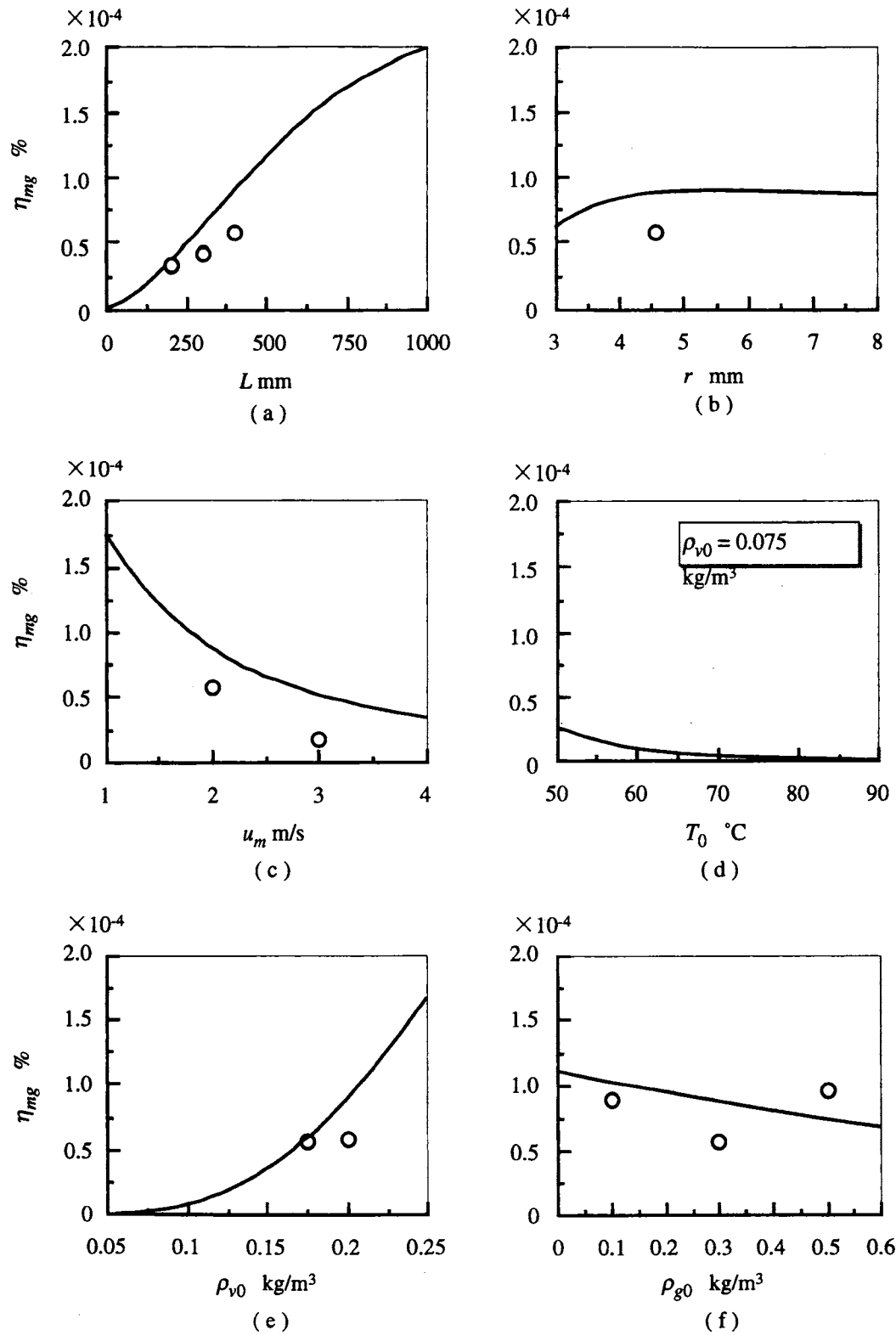


図4-32 ミストによるガス回収率の各種パラメータに対する変化

$$\left(\begin{array}{l} Lc = 400 \text{ mm}, r = 4.545 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 80 \text{ } ^\circ\text{C}, T_w = 3 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \rho_{v0} = 0.2 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.3 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right)$$

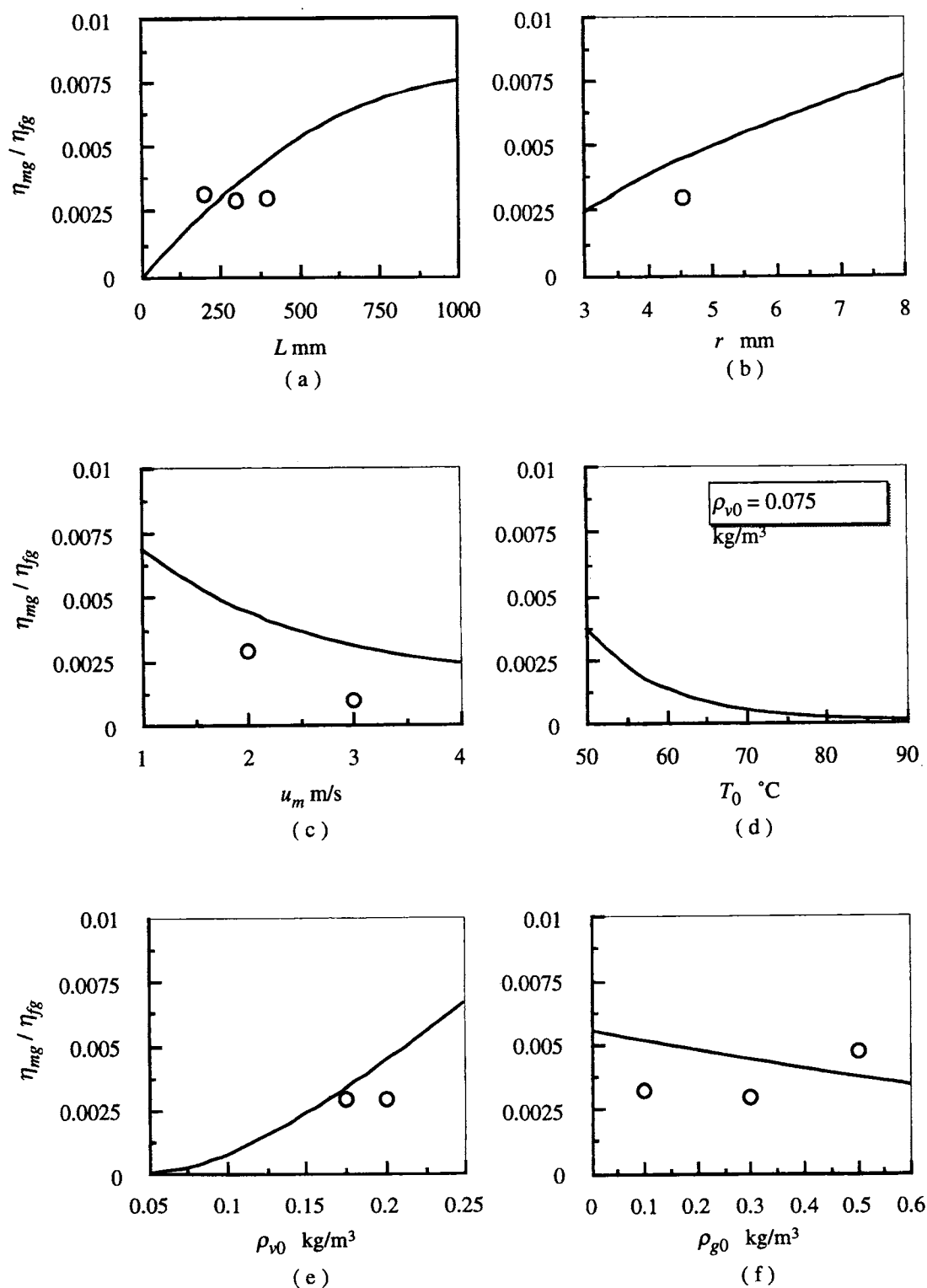


図4-33 各種パラメータに対する η_{mg}/η_{fg} の変化

$$\left(\begin{array}{l} Lc = 400 \text{ mm}, r = 4.545 \text{ mm}, u_m = 2.0 \text{ m/s}, T_0 = 80 \text{ }^\circ\text{C}, T_w = 3 \text{ }^\circ\text{C} \\ \rho_{v0} = 0.2 \text{ kg/m}^3, \rho_{g0} = 0.3 \text{ kg/m}^3 \end{array} \right)$$

V.まとめ

可溶性ガスと凝縮性気体を含む混合気を冷却面あるいは気流中で凝縮させ、凝縮液を吸収液としてガス吸収を行う新たなガス吸収法を提案し、その有効性について理論的・実験的に検討することを目的に、鉛直冷却円管内の空気・水蒸気・CO₂からなる混合気流を対象として、理論解析ならび凝縮吸収実験を行い、以下の結論を得た。

(1) 同一液膜質量下での流下液膜法との理論的比較において、提案した本方式のガス吸収速度は流下液膜法に比して約2.2倍高い値を示し、これより本方式の有効性が明らかにされた。しかしながら、気相拡散律速化による大幅な吸収促進は、液膜流量(=本方式における凝縮量)が少ないため、形成液膜厚さが薄く、流下液膜法においても液相内拡散をほとんど無視できるようになるために現れなかった。

(2) 鉛直冷却円管内でのミスト発生条件およびミスト滴径分布が理論的・実験的に明らかにされた。すなわち、ミストの臨界発生条件(壁面発生条件)は流速に無関係に温度と蒸気濃度の関係で与えられ、ミスト滴径は、温度の低下と蒸気濃度の増加により肥大化し、滴成長理論を用いた解析との比較により鉛直冷却円管内でのミスト発生速度が明らかにされた。

(3) 壁面凝縮速度は、比較的ミスト発生量が少ないためにミスト化の影響が小さいものの、冷却部長さ、流速、および入口蒸気濃度の増加に伴い増加する。また、ミスト発生速度は、冷却部長さと入口蒸気濃度の増加、入口温度の低下、および流速の減少により増加する。

(4) 凝縮液膜およびミストへのガス吸収速度は、壁面凝縮速度およびミスト発生速度と同様な傾向を示し、入口ガス濃度に対してはその増加により増加する。

(5) 凝縮効率およびガス回収率に対する装置形状(冷却部長さ、管径)および操作条件(流速、入口温度入口蒸気濃度、入口ガス濃度)の影響が検討され、ガス回収率の向上には、冷却部長さと入口蒸気濃度の増加、および管径と流速の減少が有効であることが明らかにされた。また、ミスト化による効果は、比較的ミスト発生量が少ないために凝縮液膜に比して1/500程度であるが、冷却部長さ、管径、入口

蒸気濃度の増加，流速の減少，および入口温度の低下により促進されることが明らかにされた。

以上により，高性能なガス吸収装置の開発に発展することが確信される。なお，反応吸収を伴う場合については，現有装置の改良および必要経費の補充によりさらに研究を継続する予定である。