

液滴噴射によるダクト内高温ガス流れの冷却に関する研究

An Analytical Study on the Heated-gas Flow Cooling by the Drop in the Duct

増田 武範, 北陸先端大院, 〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1, t-masuda@jaist.ac.jp
 永田 啓吾, 北陸先端大院, 〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1, knagata@jaist.ac.jp
 松澤 照男, 北陸先端大情報科学センター, 〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭台 1-1, matuzawa@jaist.ac.jp
 Takenori MASUDA, School of Information Science, JAIST, Ishikawa 923-1292
 Keigo NAGATA, School of Information Science, JAIST, Ishikawa 923-1292
 Teruo MATSUZAWA, Center for Information Science, JAIST, Ishikawa 923-1292

Recently, the treatment of the pollutant, especially dioxins, is the serious problem. The pollutant removal reactor studied in this paper, which consists of bend circular pipe, is such an apparatus asserving the treatment of dioxins. The dynamics of pollutant and liquid of splitting water in this apparatus have been numerically studied. In this three-dimensional simulation, One-Fluid Model has been used for the gas phase, which is described in terms of hydrodynamic equations. A Lagrange approach has also been developed for the vaporization of droplets emitted from one fluid nozzle. In this approach it is assumed that the rate of vaporization is governed by gradient diffusion of the vapor concentration between the droplet surface and the bulk gas. Moreover the present study give consideration to the latent heat transfer between the droplet and the continuum phase. By introducing present numerical studies, the optimum designs of this apparatus are found out.

1. はじめに

高温のガスなどの流体を取り扱う廃棄物プラントなどにおいて、流体の噴射による冷却は、ダイオキシンの発生抑制、プラントの保護など多くのメリットがあると考えられる。さらに、実際の廃棄物プラントは複雑な形状をしているため、曲がり円管内を対象とした解析が必要である。そこで本研究は、実際の廃棄物プラントの形状にも見られる、曲がり円管内における高温のガス流れ内に、液滴を高温のガスの冷却のために噴射して、混合させた水蒸気流の三次元シミュレーションを展開し、曲がり管形状・液滴の噴射位置・噴射ポイント数などを変更することにより、高温のガスの冷却が効率よく行える液滴噴射方法を求めることを目的とする。

2. 数値計算法

流れの解析には、複雑な流れに対する CFD コードである「FLUENT」を使用した。本数値シミュレーションでの一流体モデルは、気相を利用している。一流体モデルは、3つの流体力学方程式で述べられる。すなわち、気相の質量・運動・エネルギー保存式である。

Lagrange approach は、ノズルから出された液滴の蒸発に展開されている。この手法で、蒸発率は液滴表面とガスの体積間の蒸気濃度の発散勾配に左右すると仮定している。本研究は、噴射された液滴と連続相の間の熱変換の考察も与える。これらの分離している相の計算には、噴射に関する初期状態、たとえば初期速度、放出角度などのいくつかのパラメータを初期条件として与えている。

また本研究では液滴の噴射位置・噴射ポイント数などを変更することにより、冷却効果の変化を考察する。

2.1 相変化モデル

高温ガスと液滴の間の相変化によるエネルギー変化は、本

研究において、以下に説明するように取り扱う。簡単のために式は1次元としている。

液滴の温度 T_p が蒸発温度 T_{bp} よりも低いとき、以下の関係が成り立つ。

$$T_p < T_{bp}$$

$$m_p > (1 - f_{v0})m_{p0}$$

ここで、 m_{p0} は液滴の初期質量で、 m_p は現在の質量である。 f_{v0} は液滴の揮発比である。つぎに液滴の質量変換に関する式として、以下のような式を定義する。

$$N_i = k_c (C'_{i,s} - C'_{i,\infty})$$

ここで、 N_i は蒸発のモル流量、 k_c は質量変換係数、 $C'_{i,s}$ は液滴表面における蒸発濃度、 $C'_{i,\infty}$ はバルクガスにおける蒸発濃度をあらわす。 $C'_{i,s}$ 、 $C'_{i,\infty}$ はそれぞれ以下のように定義される。

$$C'_{i,s} = \frac{P_{sat}(T_p)}{RT_p}$$

$$C'_{i,\infty} = X_i \frac{P_{op}}{RT_{\infty}}$$

$$Nu_{AB} = \frac{k_c D_p}{D'_{i,m}} = 2.0 + 0.6 Re_D^{1/2} Sc^{1/3}$$

ここで、 Nu はヌッセルト数、 $D'_{i,m}$ はバルク内における蒸気の拡散係数、 Sc はシュミット数、 D_p は粒子直径を表す。

質量変換に関する式は以下のように表すことができる。

$$m_p(t + \Delta t) = m_p(t) - N_i A_p M_i \Delta t$$

ここで、 M_i は空間 i の分子質量、 m_p は液滴の質量、 A_p は液滴の表面面積を表す。

相変化によるエネルギー変換は、以下の式のように定義される。

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p e_p s (q_R^4 - T_p^4)$$

ここで、 C_p は液滴の熱容量、 T_p は液滴の温度、 h は対流熱伝達係数、 T_∞ は連続層の温度、 (dm_p / dt) は蒸発率、 h_{fg} は潜熱、 e_p は粒子放出、 s はボルツマン定数、 q_R は放射熱を表している。

2.2 乱流モデル

本研究において、乱流モデルは Reynolds Stress Model(RSM) を使用している。

RSM の乱流境界条件の記述は、すべての境界が、流れが領域に入るような境界以外、他の乱流モデルと同じである。

$$\overline{u_i^2} = \frac{2}{3} k \quad (i=1,2,3)$$

$$\overline{u_i' u_j'} = 0.0$$

ここで $\overline{u_i^2}$ は各方向におけるレイノルズストレス成分である。の境界条件は、k- 乱流モデルと同じ方法で決定される。

3.1 簡単な曲がり管モデルにおける実験結果

まず、曲がり管後から噴射した場合の冷却効果の基礎特性を調べるために簡単な形状の曲がり円管モデルを作成し実験を行った。モデルは Fig.1 に示すような形状として設定した。

具体的な数値は、円管の直径を 0.4064m、入り口部円管長さを 0.8128m、曲がり角を 90°、出口部円管長さを 2.4384m としている。管内を流れる流体は非圧縮性粘性流体とし、流体は高温の空気、噴射される液滴は、温度 313K の水であるとしている。壁面は断熱壁としている。気相の流入速度は水平方向に 15m/s、温度は 1125.15K としてシミュレーションを開始した。また噴射位置・噴射角度・噴射ポイント数については、管壁右・左など噴射ポイントを変更して実験をおこなっている。

Fig.1 は簡単な形状の曲がり管に高温のガスのみを流した場合の流速計算結果である。曲がり終わり後の管内流速の計算結果を見ると、右管壁側の流速が左管壁側比べて高いことがわかる。

次に、噴射口の位置をパラメータとして変更し、計算を行った。具体的には、噴射口の y 座標を、管の曲がり終わりから垂直方向に 0.0254m の位置に固定し、管壁の x 平面上で 90° ずつ変更して計算を実行した。噴射流速は水平方向に 50m/s とし、質量流量は 0.01kg/s としている。

Figs.2、5、7、9 は、それぞれ簡単な形状の曲がり管において、右壁面から液滴を噴射した場合の結果を表している。Fig.2 は管内流速を、Fig.5 は z=0 の断面における管出口部分の温度を、Fig.7 は管内温度を、Fig.9 は管出口部分の温度を表したグラフである。それぞれ z=0 の断面上におけるデータであり、グラフ中の position は x 座標を表している。Fig.1 と Fig.2 を比較すると、液滴噴射口直後の右壁面側の流速が、噴射の影響を受けて低下していることがわかる。

Figs.3、6、8、10 は、それぞれ、左壁面から液滴を噴射した場合の結果を表している。Fig.3 は管内流速を、Fig.6 は z=0 の断面における管出口部分の温度を、Fig.8 は管内温度を、Fig.10 は管出口部分の温度を表したグラフである。それぞれ z=0 の断面上におけるデータであり、グラフ中の position は x 座標を表している。Fig.1 と Fig.3 を比較すると、液滴噴射口直後の左壁面側の流速が、噴射の影響を受けて低下していることがわかる。

Figs.11、12、13 は、上記の噴射の影響による流速の低下を見るために、噴射口から 6cm 下における流速を表したグラフである。Fig.11 は高温ガスのみを流した場合の結果であり、Fig.12 は右壁面から噴射を行った場合の結果で、Fig.13 は左壁面から噴射を行った場合の結果である。グラフのデータは、それぞれ z=0 の断面上におけるデータであり、グラフ中の position は x 座標を表している。このグラフより、管の右壁面から水平方向に約 0.2m の位置までの流速が、噴射の影響を受けて低下していることがわかる。左壁面についても同様である。

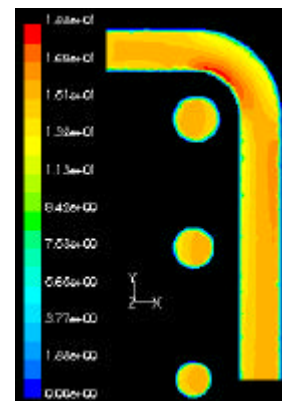


Fig.1 z=0 の断面における管内流速 (ガスのみの場合)

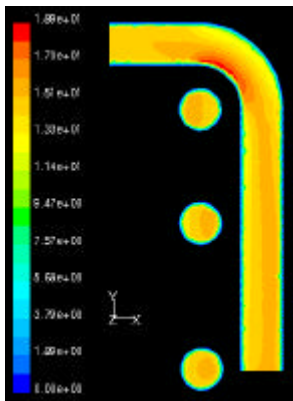


Fig.2 z=0 の断面における管内流速
(右壁面から噴射をおこなったの場合)

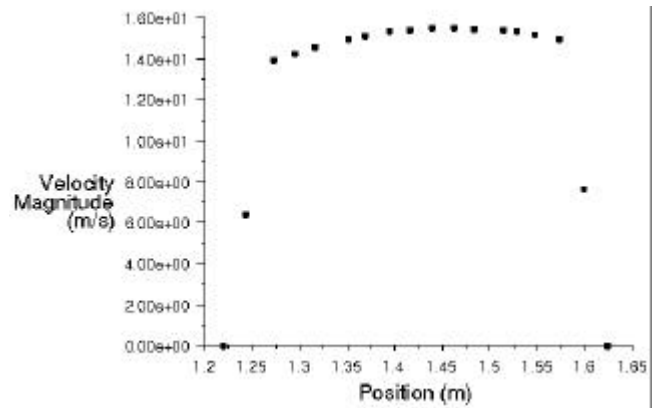


Fig.5 z=0 の断面における管出口部分の流速
(右壁面から噴射をおこなった場合)

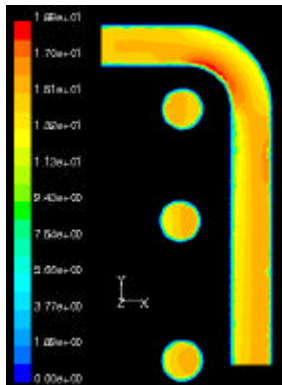


Fig. 3 z=0 の断面における管内流速
(左壁面から噴射をおこなったの場合)

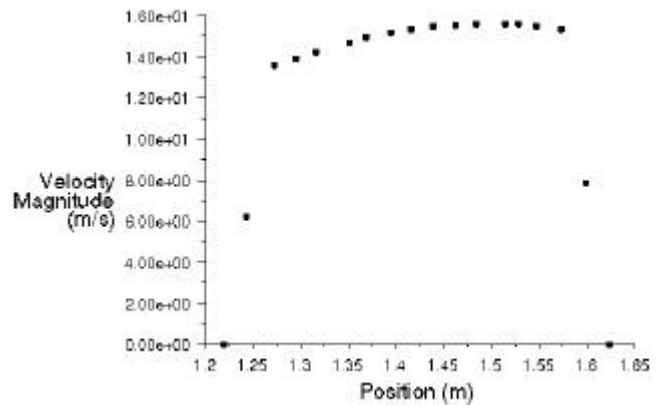


Fig.6 z=0 の断面における管出口部分の流速
(左壁面から噴射をおこなった場合)

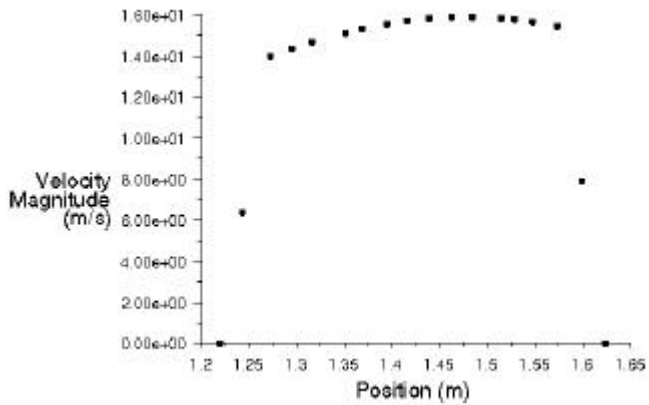


Fig.4 z=0 の断面における管出口部分の流速
(ガスだけの場合)

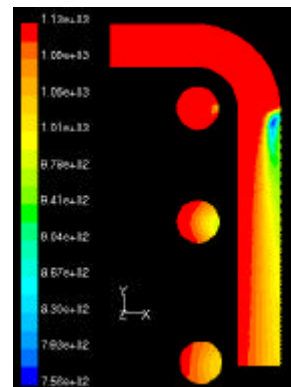


Fig. 7 z=0 の断面における管内温度
(右壁面から噴射をおこなったの場合)

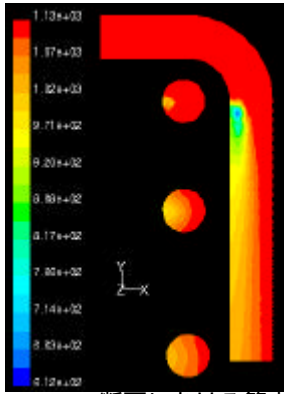


Fig. 8 z=0 の断面における管内温度
(左壁面から噴射をおこなった場合)

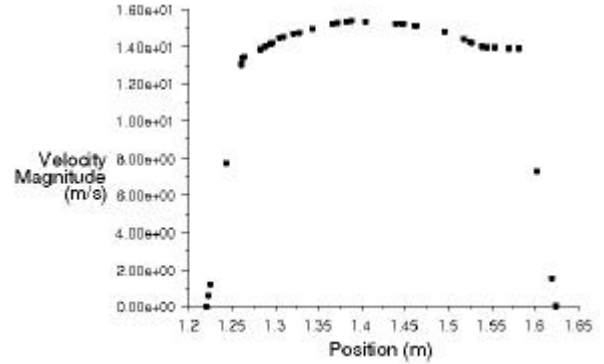


Fig.12 噴射口から 6cm 下における流速
(右壁面から噴射を行った場合)

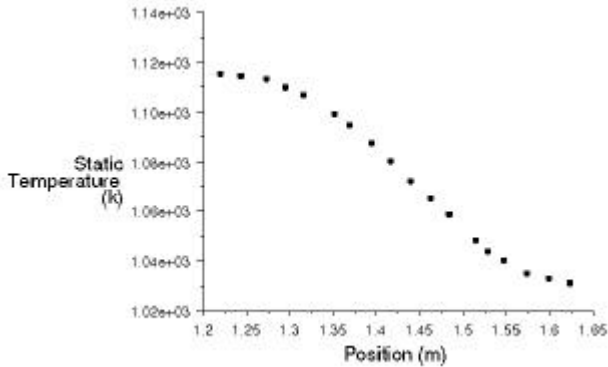


Fig.9 右壁面から噴射した場合の管出口部分の温度

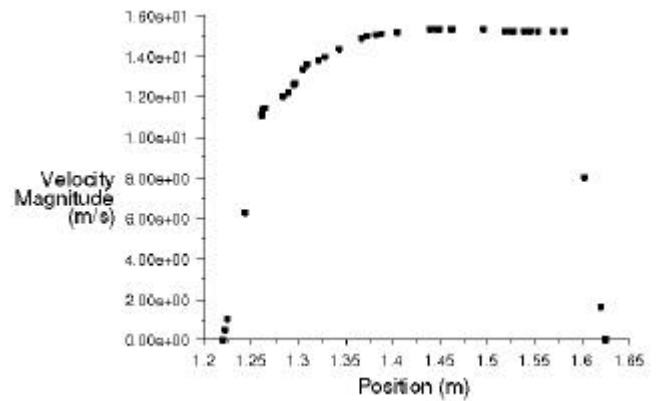


Fig.13 噴射口から 6cm 下における流速
(左壁面から噴射を行った場合)

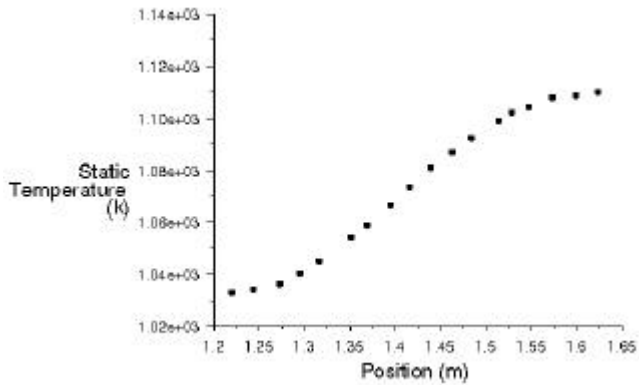


Fig.10 左壁面から噴射した場合の管出口部分の温度

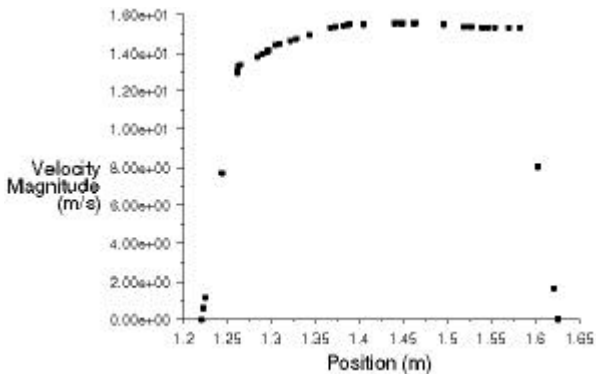


Fig.11 噴射口から 6cm 下における流速
(ガスのみの場合)

Fig.14 は管中心部から液滴を噴射した場合の管内温度の計算結果である。噴射位置は y 座標が、管の曲がり終わりから垂直方向に 0.0254m の位置であり、噴射流速は垂直方向に 50m/s とし、質量流量は 0.01kg/s としている。

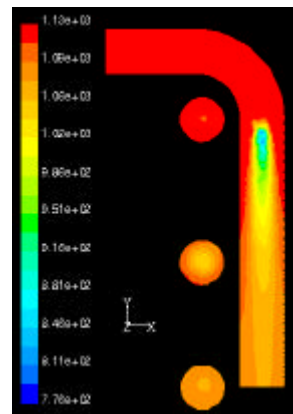


Fig.14 管中央から噴射した場合の温度

Fig.15 は管中央から噴射した場合の流出口の温度を表したグラフである。このグラフはZ=0の断面上におけるデータであり、グラフ中の position は x 座標を表している。右および左壁面から噴射した場合における流出口の温度を表したグラフ Figs.9、10 と、Fig.15 を比較すると、管中央から噴射した場合のほうが、冷却効率が高いことがわかる。ただし、管中央から噴射を行うためには、管内に噴射用の細い管を通すなどの仕組みが必要となり、現実的ではない。よって管壁面から噴射を行って、管中央から噴射した場合に近い冷却が行える噴射方法を、次の実験で考察する。

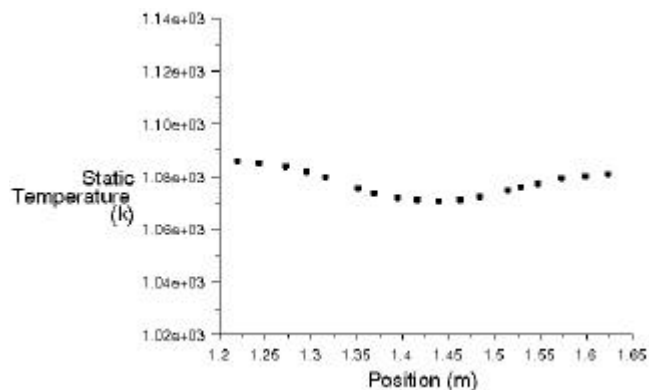


Fig.15 管中央から噴射した場合の管出口部分の温度

さらに、簡単な曲がり管における結果から判断すると、管内流速が液滴噴射に与える影響も大きいですが、液滴噴射も管内流速に影響を与えていることがわかる。よってこの影響を考慮したうえで、次の実験をおこなった。

3.2 二段曲がりを持つ曲がり管における実験結果

次に、上述の簡単な曲がり管モデルの解析で得られた結果等を基に、曲がり管形状を変更して計算を行った。上述の簡単な形状の曲がり管における流速計算結果を見ると、どの場合でも曲がり終わり後の管内流速は右壁面に寄っており、このまま噴射を行った場合、壁面への液滴の付着が予想される。実際の廃棄物プラントにおいて、壁面への冷却剤の付着はプラントの腐食を招く現象であり、問題がある。そこで、曲がり管形状を変更し、曲がり終わり後の管内流れの流速中心が中央に近づくように、二段目の曲がり角を管につけて計算を行った。モデルは Fig.16 に示すような形状として設定した。具体的な数値は、円管の直径を 0.4064m、入り口部円管長さを 0.8128m、一段目の曲がり角を 90°、二段目の曲がり角を約 37°、出口部円管長さを 2.4384m としている。管内を流れる流体は非圧縮性粘性流体とし、流体は高温の空気で、噴射される液滴は、温度 313K の水であるとしている。壁面は断熱壁としている。気相の流入速度は水平方向に 15m/s、温度は 1125.15K としてシミュレーションを開始した。またの二段目の曲がり角度をパラメータとして数パターンでの計算をおこなった。

出口部分の管内流速を表しているグラフ Figs.4、5、6 および 17 を比較すると、二段目の曲がり角をつけた場合の流速中心が管の中央部分に近づいたことを確認できる。ただし、

出口部分の温度を表すグラフ Fig.18 を見ると、右壁面のみから液滴噴射をおこなっている影響で、左反面の冷却が不十分であることがわかる。この結果を考慮して、液滴噴射位置を増やし、よりよい冷却を実現することをねらった実験を、現在実行中である。

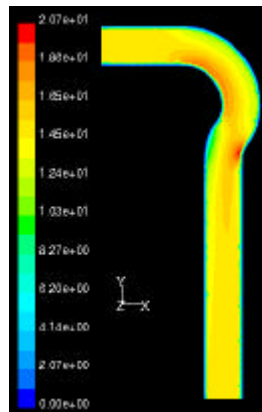


Fig.16 二段目の曲がりをつけたモデルにおいて右壁面から噴射した場合の流速

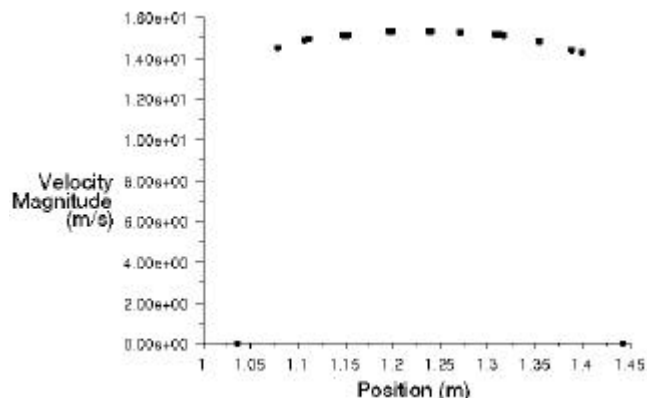


Fig.17 二段目の曲がりをつけたモデルにおいて右壁面から噴射した場合の管出口部分の流速

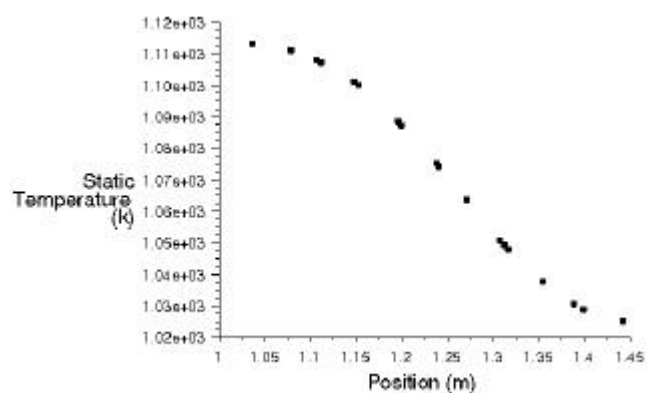


Fig.18 二段目の曲がりをつけたモデルにおいて右壁面から噴射した場合の管出口部分の温度

3 . 結言

二段目曲がりの管内流速に及ぼす影響は、非常に大きい物であり、わずかな角度変更でも管内流速に影響を及ぼす。二段曲がりの曲がり管モデルの計算最適角度および最適な液滴噴射方法を求めることは、今後の課題である。

参考文献

- (1) 杉山, "演習 化学工学", 共立出版 ,pp. 256-275.
- (2) FLUENT5 Tutorial Guide Volume2, pp.9.1-9.68