

環状吸込流を付加した円形衝突噴流の流動特性 に及ぼす吹出し管助走長さの影響

西ノ首 浩司* 福原 稔**
塩満 義司* 亀田 昭雄**

EFFECTS OF LENGTH OF INJECTION PIPE ON FLOW CHARACTERISTICS OF
CIRCULAR IMPINGING JET ACCOMPANYING ANNULAR SUCTION FLOW

Koji NISHINOKUBI, Minoru FUKUHARA,
Tadashi SHIOMITSU and Akio KAMEDA

The experiments were carried out to clarify the effects of various length of the injection pipe on the flow characteristic of a circular impinging jet accompanying an annular suction flow. As a result, it is found that there is seldom the effect on the power loss in spite of various inside diameter and excess length of the suction pipe. However, the fluctuating velocity measured using PIV increases a little in the exit edge vicinity of the injection pipe near the shear layer, when the length of the injection pipe shortens. And, though the mean pressure and the fluctuating pressure at the stagnation point decreases a little, the improvement of the Nusselt number does not change very much.

Keywords : Flow control, Jet, Particle Image Velocimetry, Impinging Jet, Fluctuating velocity

1. まえがき

噴流の拡散・混合を制御することは、工学的見地からその必要性が高い^{1)~5)}。その拡散現象の制御法の一つとして、著者らは円形噴流に対し逆方向の環状流を付加することによって円形噴流を制御する手法を提案している。これまでに拡散効果(変動速度)の増大の現象をPIV(Particle Image Velocimetry)を用いた計測により明らかにし、その有効性を衝突

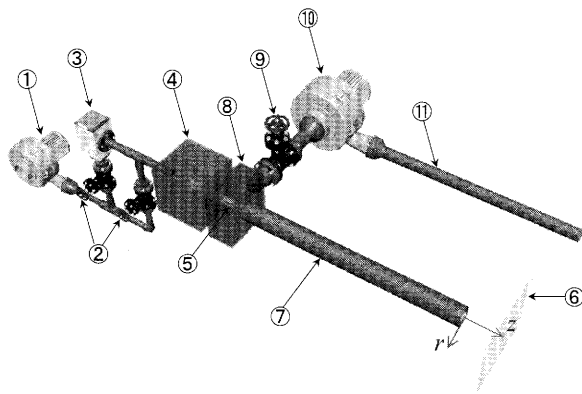
噴流の冷却特性の改善によって実証した⁶⁾。本研究ではこれまで吹出し管を十分長くし、円形噴流の十分発達した流れにおいて環状吸込流の影響を調べてきた。一方、実用化を考慮した場合には吹出し管を短くした装置も考えられることから、吹出し管内の未発達流れにおいて環状吸込流の影響を把握する必要がある。

そこで本報では、吹出し管を短くした場合において、従来^{7),8)}と同様の方法、つまり衝突壁面での圧力特性、伝熱特性および噴流中でのPIVを用いた速度特性を調べることにより、吹出し管助走長さの影響を明らかにした。

2004年8月31日受理

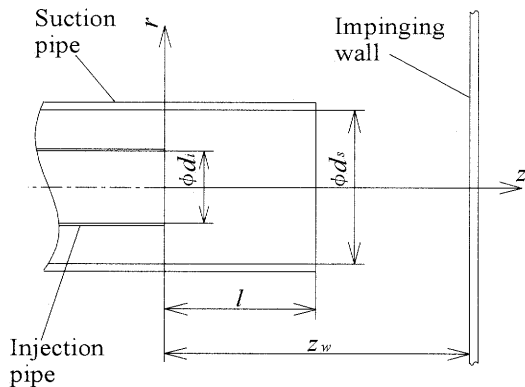
* 博士前期課程機械工学専攻

** 機械工学科



- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| ① Blower for injection | ⑦ Suction pipe |
| ② Flow control valve | ⑧ Chamber for suction |
| ③ Agitator | ⑨ Flow control valve |
| ④ Chamber for injection | ⑩ Blower for suction |
| ⑤ Injection pipe | ⑪ Pipe |
| ⑥ Impinging wall | |

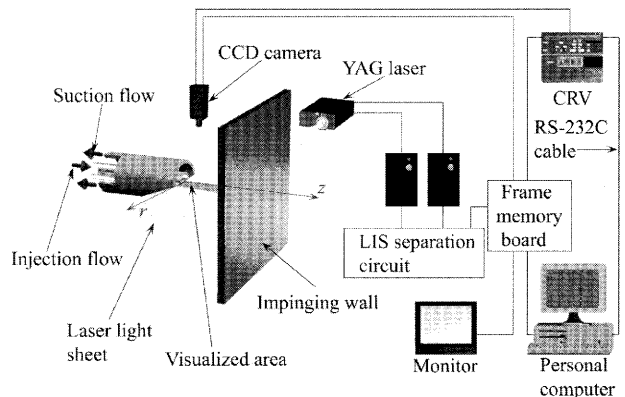
図一(a) 実験装置概略図



図一(b) 同軸二重円管の詳細図

2. 実験装置および方法

図一(a)に実験装置の概略を示す。吹出し流は吹出しブロー①から、流量調節バルブ②、攪拌器③、吹出しチャンバ④、吹出し管⑤を通り、管中心軸に対して垂直に設置された衝突壁⑥へ吹き出される。一方、吸込流は吸込管⑦、吸込チャンバ⑧、流量調節バルブ⑨を経て、吸込ブロー⑩により吸い込まれ、円管⑪から吐き出される。図一(b)に同軸二重円管の詳細を示す。水平に設置された同軸二重円管の内管を吹出し口、外管を環状吸込口とし、座標は吹出し管端の中心を原点とし、噴流中心の軸方向に z 軸、半径方向に r 軸をとる。



図二 可視化および画像処理システム概略図

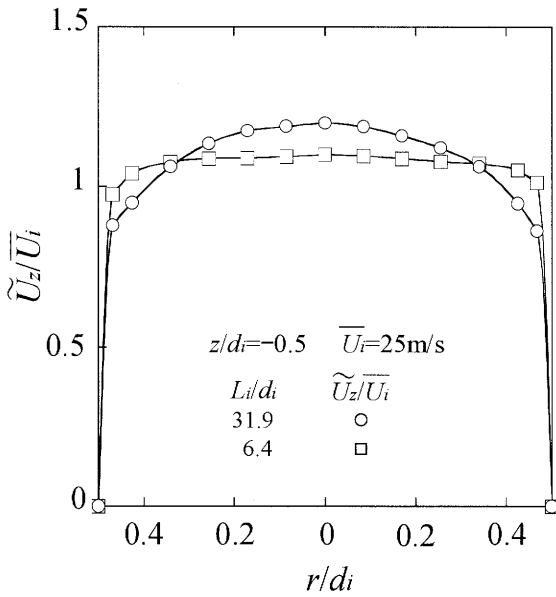
異なる吹出し管助走長さにおいて吹出し管内の速度分布の違いを明らかにするため、ピトー管を用いて計測した。衝突壁に長さ $500\text{mm} \times 500\text{mm}$ のアクリル板を使用し、そのよどみ点に 0.7mm の圧力測定孔を設け、微差圧変換器（容量： 1kPa 、固有振動数： 1.7kHz ）からの圧力情報をパーソナルコンピュータ内の A/D 変換ボードに取り込むことにより、壁面圧力を計測した。圧力センサのサンプリング周波数を 100Hz に設定し、サンプリング数を 1000 個とした。また、吸込管側の圧力損失は吸込チャンバに圧力測定孔を設け、デジタルマノメータを用いて計測した。

図二に可視化実験装置および画像処理装置の概略を示す。PIV を用いた計測では、光源にダブルパルス Nd : YAG レーザを用い、レーザーライトシートを測定断面 (r - z 断面) に間欠照射した。得られた 2 時刻の画像に対し、濃度相関法を適用して速度ベクトルを算出した。時間平均量を求めるため、サンプリング数は 1000 個とした。

実験条件のうち、吹出し管径 ($d_i=47\text{mm}$: 一定) に対する吹出し管助走長さ L_i の比、すなわち助走長さ L_i/d_i は従来用いた 31.9 に対し、 19.2 、 6.4 と短くした。前報⁸⁾より、最適寸法として管径比 d_s/d_i は 1.26 、張出し長さ l/d_i は 0.5 を用いた。なお、従来用いた $d_s/d_i=2.13$ および $l/d_i=0$ の条件も加えた。また、吹出し管端から衝突壁までの距離 z_w/d_i は前報^{7,8)}と同様、 4 とした。吹出し流の流路断面平均値 \bar{U}_i は管内速度の計測では 25m/s とし、その他の計測では 10m/s とした。

3. 実験結果および考察

3.1 吹出し管内の軸方向速度分布



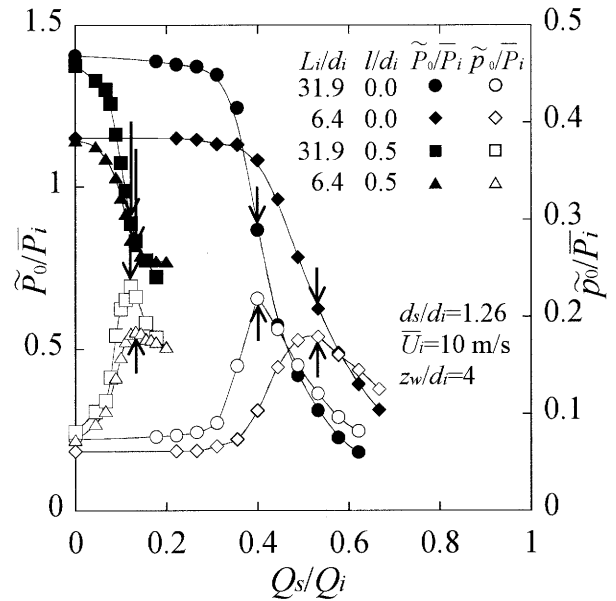
図—3 吹出し管内の軸方向速度分布

助走長さ L_i/d_i をそれぞれ 31.9 および 6.4 とした場合の吹出し管内の軸方向速度分布を図—3 に示す。ここで、吹出し流速 \bar{U}_i は 25m/s、軸方向位置 z/d_i は -0.5 である。横軸は吹出し管内径 d_i で無次元化した半径方向位置 r/d_i 、縦軸は軸方向速度 \tilde{U}_z (添字~: 時間平均値) を \bar{U}_i で無次元化したものである。助走長さの長い $L_i/d_i=31.9$ の場合には境界層が厚く、速度分布は十分発達した流れとなるのに対し、 $L_i/d_i=6.4$ の場合には境界層が薄く、速度分布は未発達流れとなる。よって、異なる助走長さによる速度分布の違いを確認できた。

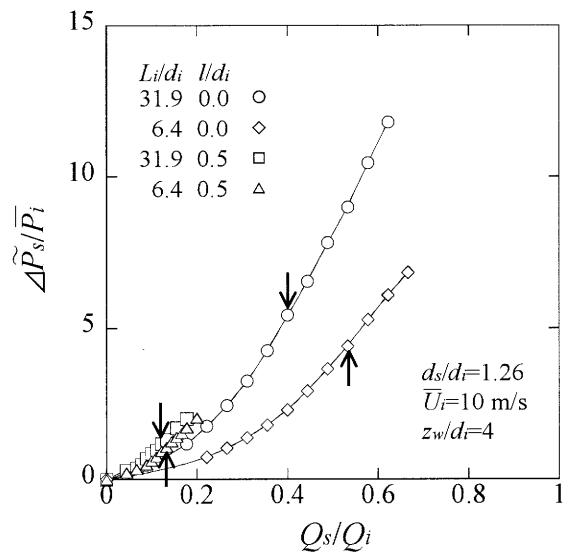
3.2 圧力特性

3.2.1 よどみ点圧力特性と流量比の関係

衝突壁面上よどみ点の圧力特性に及ぼす助走長さの影響について調べた結果を図—4(a)に示す。一例として、管径比の最適寸法である $d_s/d_i=1.26$ の場合について取り上げる。横軸は流量比 Q_s/Q_i 、縦軸は平均圧力 \tilde{P}_0/\bar{P}_i および変動圧力 \tilde{p}_0/\bar{P}_i をとる。ここで、 \bar{P}_i は吹出し管出口端の平均流速に相当する平均圧力である。いずれの助走長さ、張出し長さの条件においても、平均圧力は流量比が大きくなるにつれ減少する。変動圧力は流量比が大きくなるにつれ一旦増加し、ある流量比において最大値を示し(図中の矢印)、その後減少する。張出し長さ $l/d_i=0$ の場合、変動圧力が最大値を示す流量比(この値は運転条件を示すため、以下では設定流量比と呼ぶ)は、

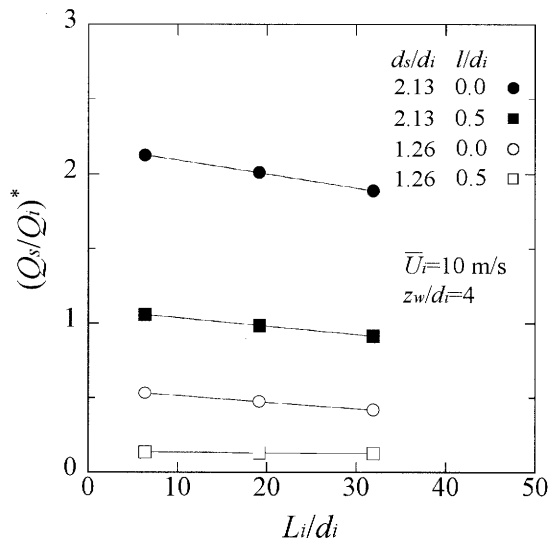


図—4(a) よどみ点圧力特性と流量比の関係

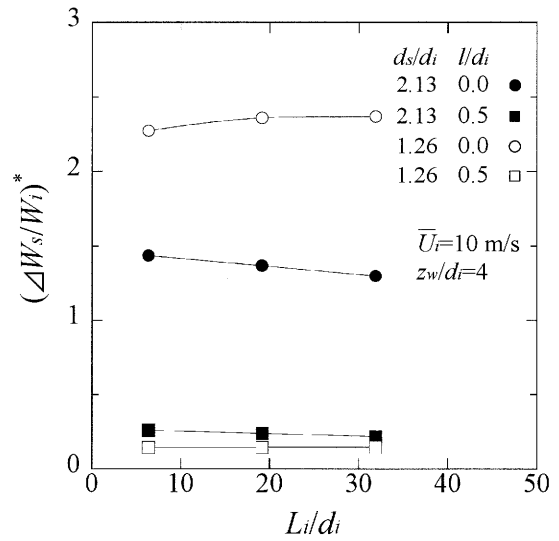


図—4(b) 吸込み側の圧力損失と流量比の関係

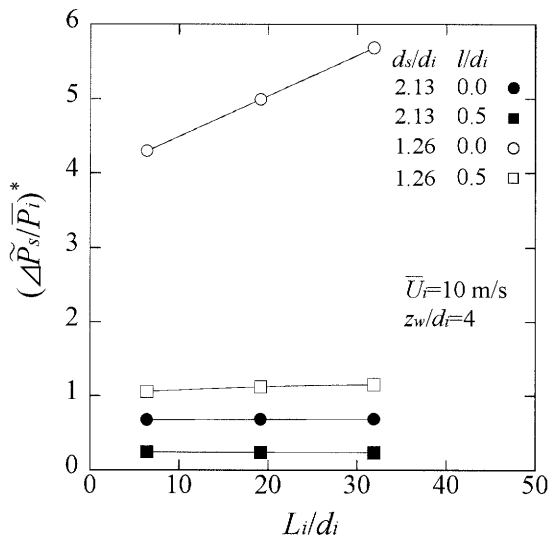
助走長さ $L_i/d_i=31.9$ の場合より $L_i/d_i=6.4$ の場合のほうが若干大きい。つまり、助走長さが十分長い場合に比べて短い場合のほうが吸込流量を若干多く必要とすることがわかる。一方、張出し長さ $l/d_i=0.5$ の場合、設定流量比は、 $l/d_i=0$ の場合に比べていずれの助走長さにおいても小さくなり、両者との差異はあまり見られない。張出し管を設けた場合、吹出し流と吸込流との流れがより干渉することによって助走長さの影響を小さくする方向に作用したものと考えられる。また、設定流量比における平均圧



図—5(a) 設定流量比に及ぼす助走長さの影響



図—6 動力損失に及ぼす助走長さの影響



図—5(b) 吸込み側の圧力損失に及ぼす助走長さの影響

力および変動圧力はいずれの条件においても、 $L_i/d_i=31.9$ の場合より 6.4 の場合のほうがやや低下している。

3.2.2 吸込管側の圧力損失と流量比の関係

吸込管側の圧力損失に及ぼす助走長さの影響について調べた結果を図—4(b)に示す。横軸は流量比 Q_s/Q_i 、縦軸は \bar{P}_i で無次元化した吸込管側の圧力損失 $\Delta\bar{P}_s$ を表す。なお、図中の矢印は設定流量比の場合を示す。流量比が大きくなるにつれ、いずれの条件においても圧力損失は増加する。張出し長さ $l/d_i=0$ の場合、 $L_i/d_i=31.9$ の場合より $L_i/d_i=6.4$ の場合の勾配が小さくなっている。吸込管側の圧力損失に

は、吹出し流と吸込流の干渉による混合損失、吸込管の入口損失、管路損失、吸込チャンバへの吐出し損失が含まれる。その中で、この勾配の違いは特に管路損失に起因すると考えられる。一方、張出し長さ $l/d_i=0.5$ の場合、その勾配は張出し長さの影響を受けて流量比の小さい範囲では小さくなる。設定流量比における圧力損失は、助走長さが短くなると、張出し長さ $l/d_i=0$ の場合、やや低下するが、張出し長さ $l/d_i=0.5$ の場合にはそれほど変化しない。

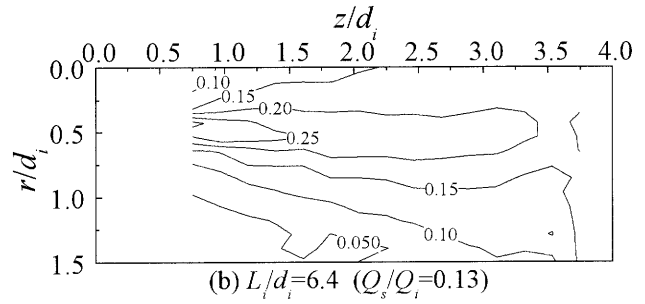
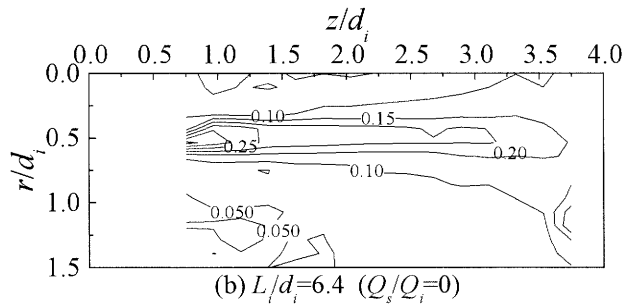
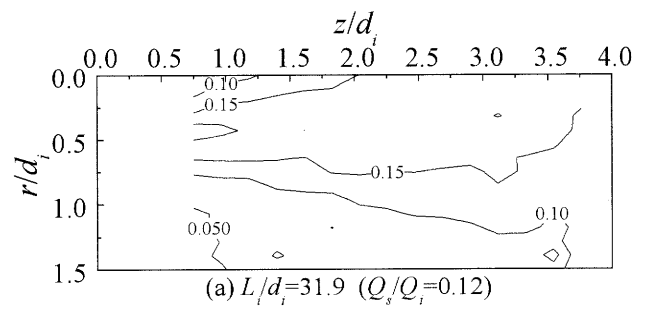
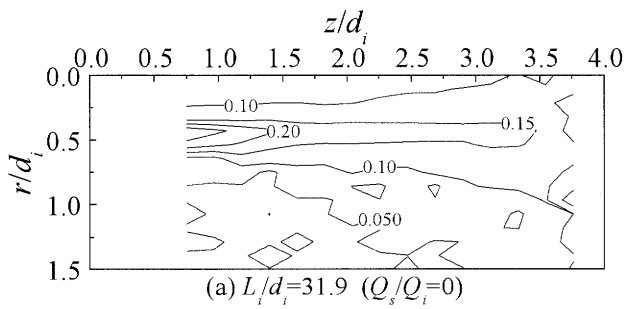
3.2.3 動力損失に及ぼす助走長さの影響

3.2.1 および 3.2.2 において設定流量比 $(Q_s/Q_i)^*$ 、設定流量比における吸込管側の圧力損失 $(\Delta\bar{P}_s/\bar{P}_i)^*$ を求めることができた。計測した全ての条件についてプロットした結果を図—5 に示す。横軸は助走長さ L_i/d_i 、図—5(a)および図—5(b)の縦軸はそれぞれ $(Q_s/Q_i)^*$ および $(\Delta\bar{P}_s/\bar{P}_i)^*$ を表す。図—5(a)から、助走長さが短くなると、設定流量比はその値が大きいほど若干大きくなる傾向を示す。また、図—5(b)から、助走長さが短くなると、 $d_s/d_i=1.26$ 、 $l/d_i=0$ の場合の圧力損失は小さくなるが、その他の条件ではそれほど変化が見られない。

ここで、以下のような動力比に関する式⁷⁾

$$(\Delta W_s/W_i)^* = (Q_s/Q_i)^* (\Delta\bar{P}_s/\bar{P}_i)^* \quad (1)$$

を用い、吸込管側の動力損失を求めた結果を図—6 に示す。いずれの条件において、助走長さが短くなっても、動力損失はほとんど変わらない。よって、異なる吸込管の内径および張出し長さにもかかわらず、動力損失に及ぼす助走長さの影響はほとんど



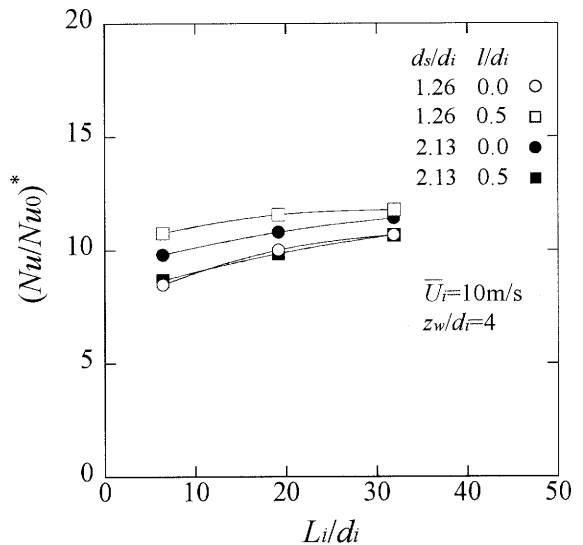
図—7 吸込流を付加しない場合の変動速度の等高線図 ($d_s/d_i=1.26, l/d_i=0.5, U_i=10\text{m/s}, z_w/d_i=4$)

図—8 吸込流を付加した場合の変動速度の等高線図 ($d_s/d_i=1.26, l/d_i=0.5, U_i=10\text{m/s}, z_w/d_i=4$)

見られないことがわかる。

3.3 速度特性

上述した圧力特性は衝突壁面のよどみ点だけの情報なので、PIV 計測を用いて噴流中の流れ場を調べた。変動速度の軸方向と半径方向の合成成分 $\sqrt{\overline{u_z^2} + \overline{u_r^2}}$ を $\overline{U_i}$ で無次元化した等高線図を示す。図—7には吸込流を付加しない場合、図—8には吸込流を付加した設定流量比における場合を示す。図中の横軸および縦軸は、それぞれ軸方向および半径方向の位置をとる。図—4で示した条件のうち、 $d_s/d_i=1.26, l/d_i=0.5$ の場合について示す。解析領域として、半径方向は流れの軸対称性を考慮して $r/d_i=0\sim 1.5$ の片側のみ、軸方向は管端付近と衝突壁付近において YAG レーザーが反射して解析上多くの過誤ベクトルが発生したため、この領域を削除し $z/d_i=0.75\sim 3.75$ とした。吸込流を付加しない場合の図—7(a)および(b)を比較すると、 $L_i/d_i=31.9, 6.4$ のいずれもせん断層付近 ($r/d_i=0.5$)、特に吹出し管端近傍に変動速度の高い領域が存在し、 $L_i/d_i=6.4$ のほうがより高い値を示している。図—8を見ると、図—7に比べて吸込流を付加することによりせん断層付近を中心に半径方向に変動速度の高い領域が広がる。助走長さが短くなると、図—7(a)および(b)の場



図—9 ヌセルト数改善率に及ぼす助走長さの影響

合と同様、せん断層付近の管端近傍において図—8(b)に示す $L_i/d_i=6.4$ のほうの変動速度が若干大きくなる。よって、噴流中の流れ場は助走長さにより若干異なることがわかる。

3.4 伝熱特性

前報⁷⁾において、圧力特性と伝熱特性との間に密接な関係があることを明らかにした。そこで、今回得られた平均圧力および変動圧力について前報の

結果を踏まえ、冷却特性を示すヌセルト数を推算することにより、ヌセルト数に及ぼす助走長さの影響について調べた。得られた結果を図-9に示す。横軸は助走長さ L_i/d_i 、縦軸はヌセルト数の増加率 $(N_i/N_{i0})^*$ 、すなわちそれぞれの助走長さにおいて $Q_s/Q_f=0$ の場合のヌセルト数に対する設定流量比におけるヌセルト数の増加割合を表す。3.2.1で述べたように、設定流量比におけるよどみ点の平均圧力および変動圧力は、助走長さを短くするとやや低下するが、 $Q_s/Q_f=0$ において平均圧力も同様に低下する。その結果、図-9からわかるようにヌセルト数の改善率はいずれの条件においてもそれほど変化しないことがわかる。

4. むすび

環状吸込流を付加した円形衝突噴流の流動特性に及ぼす吹出し管助走長さの影響を調べた結果、以下の結論を得た。

- (1) 異なる吸込管の内径および張出し長さにもかかわらず、動力損失に及ぼす助走長さの影響はほとんど見られない。
- (2) PIVを用いて速度場を計測した結果、助走長さを短くすると、変動速度はせん断層付近の管端近傍で若干大きくなる。つまり、噴流中の流れ場には助走長さの影響を多少受ける。
- (3) 設定流量比におけるよどみ点の平均圧力および変動圧力は、助走長さを短くするとやや低下するが、ヌセルト数の改善率はそれほど変化しない。

参考文献

- 1) Crow, S.C. and Champagne, F.H., Jour. of Fluid Mechanics, 48, 547-591(1971)
- 2) Hussain, F. and Husain, H.S., Jour. of Fluid Mechanics, 208, 257-320(1989)
- 3) 社河内 敏彦・加藤 智宏、日本機械学会論文集(B編)、63-614、3278-3286(1997)
- 4) Toyoda, K., Muramatsu, Y. and Hiramoto, R., Jour. of Visualization, Vol.2, No.1, 17-24(1999)
- 5) 鈴木 宏明・笠木 伸英・鈴木 雄二、日本機械学会論文集(B編)、65-639、3644-3651(1999)
- 6) 福原 稔、園田 裕和、野崎 勉、野口 寛樹、山下 英成、小山 隆行、可視化情報学会誌、19-74、230-236(1999)
- 7) 山下 英成・福原 稔・中村 一未・西園 久幸、日本機械学会論文集(B編)、69-684、1830-1837(2003)

- 8) 西園 久幸、福原 稔、野崎 勉、山下英成、機講論、No.038-1, 71(2003)