エアジェットルームにおける補助ノズル噴流

(第2報) モデルノズルの風速分布

石川県工業試験場	新	谷	隆	二(会員)
"	土	定	育	英(会員)
"	近	岡	和	英(会員)
金沢大学	岡	島		厚

Air Jet Issued from Sub-Nozzles in Air Jet looms

Part 2: Velocity Distribution of Air Jet from Model Sub-Nozzles.

Ryuji Shintani*, Ikuei Donjou*, Kazuhide Chikaoka* and Atsushi Okajima**

*Industrial Research Institute of Ishikawa, Kanazawa

**Faculty of Technology, Kanazawa University, Kanazawa

Abstract

It is very important for saving energy at air jet looms that we should study and improve the performance of sub-nozzles. In the present study, to examine the state of flow at the sub-nozzle exit, velocity distributions at the nozzle exit and positions of jet center are measured by a hot-wire anemometer. Effects of passage area and nozzle exit shape on the jet angle are elucidated.

The results show that stream-wise velocities reduce to be inversely proportional to the distance from the nozzle exit irrespective of passage area or nozzle exit shape. This decaying characteristic is similar to an axisymmetric jet flow from a circular nozzle. The jet angles are changed by exit velocity, passage area and nozzle exit shape. Clearly the vena contracta at the nozzle exit affects the jet angles.

(Received July 3, 1995)

(Accepted for Publication November 17, 1995)

摘 要

目的 本研究は、エアジェットルームに使用されている補助ノズルの性能向上を目的としている。本報では、補助ノズル出口での流れの状態を明らかにするために、ノズル出口の流速分布を熱線流速計を用いて測定し、流路面積および出口断面形状が噴射角度に及ぼす影響について調べた。

成果 噴流中心流速の分布は、ノズル出口近傍を除き流路面積、出口断面形状によらず、軸対称噴流と同様に、ノズル出口からの距離に反比例する。また、噴射角度は、流路面積、出口断面形状および出口流速によって異なり、出口における鉛直方向の流速分布が影響している。つまり、ノズル出口において、流れは縮流を起こし、この縮流の状態が出口流速に応じて変化するため、噴射角度は一定にならないことが明らかとなった。

(平成7年7月3日受理)

(平成7年11月17日審査終了)

1. 緒 言

エアジェットルーム(以下、AJLと略記する)は、空気噴流によってよこ糸を搬送し、製織する織機である。空気噴流は、拡散しやすく流速の低下が著し

いため、よこ糸の搬送方法として、エアガイド方式、変形おさ補助ノズル方式およびこれらを併用した補助ノズル付エアガイド方式などいくつかのよこ入れ方式が開発されている。また、AJLの高回転数化に伴い、よこ糸搬送のための供給空気圧力並びに空気

消費量が増加するため、製品の価格に占める電力費の割合が多くなっている。これらのことから、空気の利用効率をより高めることが、AILの開発における重要な技術的課題となっている¹⁾。

現在、高速化広幅化に有利であることから、変形おさ補助ノズル方式の AJL が、AJL の主流になりつつある。この AJL において、補助ノズル（以下ノズルと略記）は、たて糸を保護するため、その形状等がかなり制約されており、前報²⁾で明らかにしたように、供給空気圧力によって空気噴流の向きが変化する。そのため、製織時に、ノズルの取り付け位置や角度の再調整を要すること、さらに、他のよこ入れ方式に比べ、空気消費量が多いなどの欠点を有している。

本研究では、このノズルからの空気噴流の方向の安定性と噴流速度の減衰率を向上させることによって、上述したノズルの欠点を解決することを目的としている。

本報では、特に、ノズル出口での流れの状態を明らかにするため、市販されている丸形の出口孔形状を持つ補助ノズルの 5 倍の模型を作製し、ノズル出口における流速分布と乱れ分布、そして、噴射された空気噴流の中心部付近の流速分布と乱れ分布を熱線流速計を用いて測定し、噴流の中心位置を計算して、流路面積およびノズル出口断面形状が噴流速度および噴射角度に及ぼす影響について調べた結果を報告する。

2. 記 号

- 本報で用いる主な記号を以下に示す。
- H : 流路幅(流路面積 $=H \times B$, ここで、 B は一定)
 - U_m : 噴流中心速度
 - X : ノズル出口からの距離
 - Y : X 軸に垂直な水平方向距離
 - Z : X 軸に垂直な鉛直方向距離
 - b : 半値幅
 - d : ノズル出口径
 - u : 噴流速度の変動成分
 - θ : 噴射角度

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

図 1 は、実験に使用したノズルの概略と 4 種類の出口断面形状を示す。ノズルは、直径 $d=7.5\text{mm}$ の円形の出口で、幅 $B=19\text{mm}$ 、長さ 158mm の導管を持つ。また、厚さ 1mm のスペーサによって、流路幅 H を 6, 7, 8mm に変化させることができ、また出口穴断面形状を変えることができるような構造とした。本実験で用いた出口断面形状は、A ノズル：ストレート、B ノズル：出口断面内側に丸み、C ノズル：先細で 20° のテーパ、D ノズル：末広の 20° テーパを付けたものの 4 種類である。

図 2 に、実験装置の概略を示す。噴流速度の測定には、定温度型熱線流速計（KANOMAX Model

Fig.1 Test nozzle
(a) Test nozzle and Coordinate system
(b) Four kinds of nozzle exit shape ($d=7.5\text{mm}$)

Fig.2 Schematic diagram of a test apparatus

1011, 1013) を使用し, センサーとして線径 $5\mu\text{m}$, センサー部幅 1mm のタングステン線 I 形プローブを用いた. プローブは, 3 次元トラバース装置により移動させた. 実験で用いたトラバース装置の精度は, X, Y, Z とともに $\pm 0.05\text{mm}$ であり, パーソナルコンピュータによって制御される. 出口流量の測定には, 質量流量計 (東京計装 Type TF-5340) を使用した. また, 実験室は準恒温室であり, 室内の温度は $22 \pm 3^\circ\text{C}$ に維持されている. なお, この温度変動に対しては, 熱線流速計に温度補償ユニットを接続して出力電圧を補正した.

3.2 実験方法

ノズル流路面積, 出口断面形状および出口平均噴流速度を変化させ, 任意の X における YZ 断面内の X 方向の流速成分を測定した. 出口断面形状を変化させた実験では, 流路幅 H を 7mm に固定して行った. 流速は, 熱線流速計で得られる流速に比例した電圧信号を 12 ビットの A/D 変換器を通してパーソナルコンピュータに入力し, 約 1sec 間のデータを時間平均して求めた. このときのサンプリング周波数は 2kHz , サンプリング数は 2048 である.

測定データから平均流速値, 乱れの大きさを計算

し, X, Y, Z の位置データとともにフロッピーディスクに記録する. このデータを基に各 X での噴流中心位置, 噴流中心速度分布, 乱れ分布, そして, 噴流の方向を示す噴射角度の計算を行い, ノズルから噴射された噴流が, ノズルからの距離やノズル出口流速によってどう変化するかを明らかにする. XY 平面において, 噴流中心を結んだ直線と X 軸とのなす角度を噴射角 θ_y , XZ 平面における噴流中心を結んだ直線と X 軸とのなす角度を θ_z とする. また, 測定データからの噴流中心流速, 乱れ度, 噴流中心位置, そして噴射角度の算出は, 次の各式による.

噴流速度は, 時間の関数として表され, 時間平均値と変動成分に分離して考えると,

$$U_i(t) = U_i + u_i(t) \quad (1)$$

となる. ここで, 時間平均速度 U_i は,

$$U_i = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} U_i(t) dt \quad (2)$$

である. ただし, $T = t_2 - t_1$

また, 噴流中心流速 U_m は, YZ 断面内の U_i の最大値 $U_{i,\max}$ の半分以上の値を平均して,

$$U_m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n U_i \quad (U_i \geq U_{i,\max}/2) \quad (3)$$

さらに、変動成分の大きさを示す乱れ度は、

$$u_i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_i}^{t_i+T} [U_i(t) - U_i]^2 dt} \quad (4)$$

となる。また、噴流中心の座標は噴流速度の重心として、

$$y_m = \frac{\sum U_i \cdot y_i}{\sum U_i}, \quad z_m = \frac{\sum U_i \cdot z_i}{\sum U_i} \quad (5)$$

となる。

X 座標に対して、最小二乗近似により、噴射角度を求めると、噴流中心位置は、

$$y_m = y_0 + x \cdot \tan(\theta_y), \quad z_m = z_0 + x \cdot \tan(\theta_z) \quad (6)$$

と表される。

4. 実験結果および考察

4.1 噴流中心の流速と乱れ度

断面形状が A ノズルで流路幅の異なる場合 ($H=6.7, 8\text{mm}$) と出口断面形状の異なるノズルの場合 (A, B, C, D) の噴流中心流速 U_m (m/s) とノズル出口からの距離 X (mm) の関係を、 U_m はノズル出口流速 U_0 で、 X はノズル出口径 d でそれぞれ無次元化して図3と4に示す。ここでノズル出口流速 U_0 は、ノズル出口での最大流速値の95%以上の値の平均値である。また、下流域において、 U_m の違いを明確にするため、図の縦軸は U_0/U_m にとった。図から噴流中心速度は、 $X/d \leq 4$ ではほぼ一定値を示し、その後、流速は X に比例して減衰することが分かる。この減衰の傾向は、軸対称噴流^{3)~5)}の場合と同様である。

噴流中心流速の減衰は、実験の範囲内では、流路幅 H の影響をほとんど受けず、出口断面形状を変化させた場合、減衰は A ノズルより B, C, D ノズルの方が小さくなった。B, C と D のノズルでは、減衰は同程度であることが図4より分かる。

また、 $H=7\text{mm}$ 、ノズル C の出口流速 U_0 が変化したときの噴流中心流速を図5に示す。流速減衰は、 $U_0=120, 180\text{m/s}$ の下流域で他の出口流速との違いがみられるが、出口流速によらずほぼ同じ減衰であると考えられる。

従って、噴流中心流速は、ノズルの出口断面形状によって変化し、流路幅および出口流速には余り影響されないと考えられる。

$X/d \geq 5$ の U_m を対象に噴流中心速度が減衰を始める位置 X (すなわち、ポテンシャルコア長さ) を最小二乗近似により求め、軸対称噴流の場合と比較

Fig.3 Effect of conduit width on jet velocity distribution for Anozzle

Fig.4 Effect of nozzle shape on jet velocity distribution for, $H=7\text{mm}$

Fig.5 Effect of exit velocity on jet velocity distribution for C nozzle, $H=7\text{mm}$

すると、ポテンシャルコアの長さが、軸対称噴流では $5 \sim 8d$ であるのに対して、A ノズルでは $H=8\text{mm}$ の場合、 $3.88d$ 、 $H=7\text{mm}$ では $3.62d$ 、および $H=6\text{mm}$ では $3.24d$ とかなり短く、流路幅が広がるとポテンシャルコアは長くなった。一方、 $H=7\text{mm}$ のとき B

Fig.6 Effect of conduit width on turbulent distribution for A nozzle

Fig.8 Effect of exit velocity on turbulent distribution for C nozzle, $H=7\text{mm}$

Fig.7 Effect of nozzle shape on turbulent distribution for $H=7\text{mm}$

Fig.9 Effect of exit velocity on half-value width for C nozzle, $H=7\text{mm}$
(a) b_y/d (b) b_z/d

ノズルでは、 $3.80d$ 、Cノズルでは $5.54d$ 、Dノズルでは $5.19d$ である。このポテンシャルコアの長さは、流路幅 H が大きいほど大きく、出口断面形状を変化させた場合、AノズルよりB、C、Dノズルの方が大きくなった。

図6と7は、噴流中心における乱れ分布を示す。流速分布と同様に、 X は d で、乱れ度 u は U_0 でそれぞれ無次元化した。乱れ度は、おおよそ、 $X/d=4$ で極大値に達した後減衰していく。また、 $X/d \geq 10$ 以上では、ノズル流路幅 H および出口断面形状にあまり関係なく、一つの曲線で減衰する。さらに、出口流速の変化に対する乱れ度分布について、 $H=7\text{mm}$ 、Cノズルの場合を図8に示す。図より乱れ度は、 $X/d=4$ で極大値に達した後 $X/d \geq 20$ では、 U_0 に関係なく同一の曲線で減衰している。

るため、乱れ度が最大となると考えることができる。また、下流域における周囲流体との混合状態は、ノズル流路幅、出口断面形状および出口流速によらず同様であると考えられる。

4.2 噴流の広がり

Cノズルの場合の噴流の広がりを出す半値幅 b_y , b_z を図9 (a) と (b) に出口流速をパラメータとして示す。ここで、半値幅はノズル出口径 d で無次元してある。図より、 b_y はほぼ1本の直線となり、 b_z は、 $X/d < 4$ ではほぼ一定値で、その後、直線的に増加することがわかる。軸対称噴流では、 b_y と b_z の増加は $b = 0.1X$ で与えられることが知られているが、本実験においては、 b_y と b_z の増加の様子が異なっている。また、 $X/d < 4$ における b_y の値が、ノズル出口半径より大きい値であるのに対して、 b_z の値は、ノズル出口半径より小さくなっており、縮流が起きていることを示している。

そこで、縦軸に XZ 平面と XY 平面における半値幅の比 b_z/b_y をとると、図10のようになる。ここで $b_z/b_y = 1$ は噴流が軸対称な広がりをしていることを示す。図より、 b_z/b_y は急激に減少し、 $X/d = 2 \sim 3$ で最小値をとり、緩やかに回復して $X/d = 10$ ではほぼ軸対称な広がり $b_z/b_y = 1$ となった後、 $b_z/b_y = 1$ 近傍で、 b_z と b_y の大小が、変化しながら広がっていることがわかる。

4.3 噴射角度

前報において、既製補助ノズルからの噴流は、多孔のノズル以外は、供給空気圧力、すなわち、ノズル出口流速によって噴射角度が変化することおよびその変化は、 Y 方向よりも Z 方向の方が大きいことを明らかにした。図11は、本実験におけるノズルの Y 方向および Z 方向の噴流中心位置 Y_m および Z_m を示す。図11から Y 方向での噴流中心位置の偏りはかなり小さく、出口断面形状にはほとんど依存しないことがわかる。しかし、 Z 方向の噴流中心位置は、 Z の正の方向にかなり大きく偏っており、出口断面形状によって異なり、既製補助ノズルの結果と同様な傾向にあることがわかる。この Z 方向の噴流を中心位置から噴射角度 θ_z を計算し、ノズル出口流速 U_o に対する変化を図12と13に示す。図12は流路幅 H をパラメータおよび図13は出口断面形状をパラメータとして示した。図よりどのノズルにおいても出口流速 U_o が増加すると、噴射角度 θ_z は緩や

Fig.10 Variation of the ratio of b_z to b_y for C nozzle, $H=7\text{mm}$

Fig.11 Difference of nozzle shape on jet center for $H=7\text{mm}$, $U_o=140\text{m/s}$

Fig.12 Variation of conduit width in jet angle for A nozzle

Fig.13 Variation of nozzle shape on jet angle for $H=7\text{mm}$

Fig.14 Equi-velocity line of half-value of maximum velocity. at $X=0.5$ for A nozzle, $H=7\text{mm}$

Fig.15 Effect of nozzle shape on exit velocity distribution for $H=7\text{mm}$

(a) XY Plane (b) XZ Plane.

かに減少することがわかる。噴射角度は、流路幅 H が大きいほど小さい値を示した。また、出口断面によって、噴射角度は異なっている。

4.4 出口における流速分布

図14には、 $H=7\text{mm}$ 、Aノズルの出口における最大流速の半分以上の領域を示した。この図から、流速一定の領域が、ノズル出口孔径よりも小さいことが分かる。また、図15 (a) と (b) は、出口断面形状の異なるノズルの出口におけるXY平面とXZ平面のX方向の速度成分の分布である。図よりXY平面における速度分布は、ほぼ軸対称な速度分布を示しているが、XZ平面における速度分布は、出口断面形状、出口流速によってかなり変化することがわかる。特にDノズルでは、XY、XZ平面いずれも縮

流と偏り流れが生じている。さらに、どのノズルにおいても、ノズル端で縮流を起こしており、XY平面における縮流よりもXZ平面における縮流の方が大きいことも明らかである。また、出口断面形状によって、縮流の大きさが異なっている。出口断面を形状によって、ノズル出口における空気の剥離状態が変化するために、ノズル出口でのXZ平面の速度分布が変化する。これが噴射角度 θ_z に影響すると考えられる。

また、図16 (a) と (b) に $H=7\text{mm}$ 、Cノズルの出口流速 U_0 の違いによるXY平面とXZ平面の出口での流速分布を示す。図中の○印は $U_i/U_0=1/2$ の点を示し、破線にそれらを結んだ線であるが、XY平面では、この破線を大きな変化がなく、出口流速の違いによらず、ほぼ軸対称な流速分布を示していることがわかる。しかし、XZ平面における破線は、出口速度によって大きく変化しており、XZ平面に

Fig.16 Effect of exit velocity on jet velocity distribution at the exit for C nozzle, $H=7\text{mm}$
(a) XY Plane (b) XZ plane.

おける縮流の状態が，出口流速によって変化することがわかる．従って，この縮流の状態が出口流速によって変化するため，Z方向のノズル噴射角度は，出口流速に依存して変化すると考えられる．

5. 結論

エアジェットルームに用いられている補助ノズルからの噴流特性を明らかにするため，ノズル流路幅，出口断面形状および出口平均流速を変化させ，流速分布と乱れ分布および噴射角度を測定した．その結果，以下のことが明らかとなった．

- (1) 噴流中心の流速は， $X/d > 4$ では，流路面積，出口断面形状によらず，軸対称噴流と同様に，ノズル出口からの距離に反比例して減衰する．また，出口形状によって流速減衰の始まる位置が変化するため，ノズル出口からの距離に対する流速の減衰量は変化する．
- (2) 噴射角度 θ_e は，流路面積，出口断面形状および出口流速によって異なる．また，この噴射角度には，出口流速におけるXZ平面内での流速分布が影響している．
- (3) ノズル出口において，流れは縮流を起こし，出口流速に応じて縮流の状態が変化するため，噴射角度が一定にならない．

(謝 辞) 本研究を行うに当たり，補助ノズルの製作に協力頂いた津田駒工業(株)中川透氏，実験に協力頂いた榊原明彦，相羽弘勝両君(当時金沢大学学生)に深謝する．

参考文献

- 1) 日本繊維機械学会繊維研究委員会編；“ジェットルームハンドブック”，Part 3，日本繊維機械学会 (1982)
- 2) 新谷ら；繊維誌，47，T190 (1994)
- 3) N.Rajaratnam (野村安正訳)；“噴流”，森北出版 (1981)
- 4) H. Schlichting；“Boundary Layer Theory”，p.729, McGraw-Hill (1978)
- 5) N.P.Chermisinoff；“Encycloedia of Fluid Mechanics Vol.2”，p.396, Gulf Publishing Company (1986)