

# CNC 旋盤を想定した閉空間で発生する空気流の 数値解析と可視化実験

仁村浩治\*・今田良徳

## Numerical Analysis and Visualization on Airflow within Closed Space of CNC Lathe

Koji NIMURA\* and Yoshinori KONDA

(2005年11月30日受理)

In order to solve some problems caused by the airflow within a machining space of CNC lathe, the airflow is investigated by the MAC(Maker-and-Cell) method and flow visualization. The analytical results are similar to characteristic airflow patterns observed by means of the tuft and tracer methods; (1) Entrained-flow exists near the rotating chuck. (2) After a radial airflow blowing from the rotating chuck strikes the panel near the headstock side, the airflow goes in the direction of tailstock through the surface of panel. (3) There are concentrated regions of the airflow on the surfaces of right, left, upper and bottom panels near the tailstock panel. (4) The airflow separates at the concentrated regions, and goes in the direction of the chuck.

### 1. 緒言

近年の工作機械の社会的要求は高速化と高精度化である。主軸系及び送り駆動系の高速化、高速対応のツーリング機構の研究、開発が進んできている現在、CNC 旋盤やターニングセンタでは主軸回転数が $10,000\text{min}^{-1}$ を超えるものが実用段階に至っている。一方、安全性及び作業環境に対する関心からCNC 旋盤の機械本体はカバーパネルで覆われ、加工空間はパネルによって外界と遮断された閉鎖空間に近い状態となっている。そのため、CNC 旋盤等では爪チャックから発生する空気流に起因する新たな問題が顕在化してきた。

本研究は、空気流を考慮に入れたCNC 旋盤の加工空間形状設計の基礎資料を得る目的で、CNC 旋盤の加工空間を簡略化したモデルを設定し、その空間内で発生している空気流挙動について数値解析および可視化実験により検討を行ったものである。

### 2. 解析モデルの設定及び基礎方程式の導出

一般的なCNC 旋盤の加工空間内部は、図1に示すように複数の装置が存在するため、幾何学的に複雑な形状をしている。解析を行うにあたり、このような複雑な形状で計算モデルを作成し、空気流の数値解析を行うと、複数の因子の影響が重なり合い、空気流挙動の考察が困難になることが考えられる。そのため、本研究では図2に示すような簡素化したモデルを設定した。

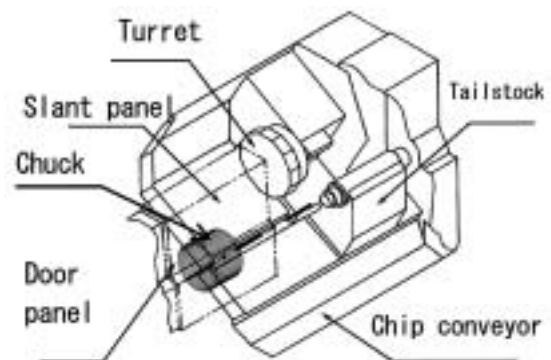


図1 CNC 旋盤の加工空間例

\* 秋田高専専攻科学生

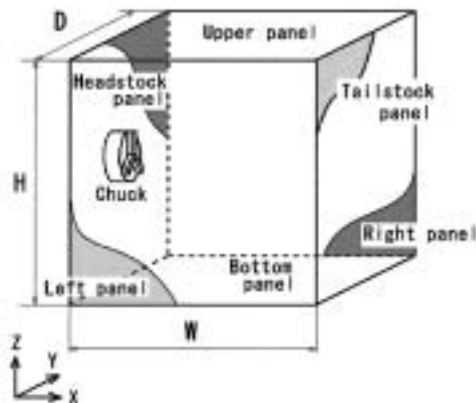


図2 加工空間の解析モデル及び各部の名称

図2に示すモデルは、幅(W)=高さ(H)=奥行(D)=1の立方体の加工空間形状をしており、その内部の一面の中央にチャックのみを設置したものである。ここで、説明の便宜を図るため、チャックが設置されている壁面を(1)ヘッドストックパネル、ヘッドストックパネルに向かって右側に設置されている壁面を(2)右側パネル、同じく左側に設置されている壁面を(3)左側パネル、上側に設置されている壁面を(4)上方パネル、下側に設置されている壁面を(5)底面パネル、及びヘッドストックパネルに対して反対の方向に設置されている壁面を(6)テールストックパネルと定義し、以下ではこの呼称で記述している。

次に流れ場における基礎方程式を導出する。一般に気体の流速が音速に比べ十分小さい場合その運動は連続の式並びにナビエ・ストークスの運動方程式に支配され、温度変化を生じない場合はそれぞれ式(1)、(2)と表すことができる。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) & \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) & \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= \\ -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) & \end{aligned} \right. \quad \dots (2)$$

ここで  $u, v, w$  は  $x, y, z$  方向の速度(m/s),  $t$  は時間(s),  $p$  は圧力(Pa),  $\rho$  は密度(kg/m<sup>3</sup>),  $\nu$  は動粘性係数(m<sup>2</sup>/s) である。

次に式(1), (2)を無次元化するため、次のような無次元量を定義する。

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, Z = \frac{z}{L}, U = \frac{u}{V_0}, \\ V &= \frac{v}{V_0}, W = \frac{w}{V_0}, P = \frac{p}{\rho V_0^2}, T = \frac{V_0}{L} t \end{aligned} \quad \dots (3)$$

ここで、 $L$  は代表長さ(m),  $V_0$  は代表速度(m/s) である。この無次元数により式(1), (2)は次の式(4), (5)として表される。

$$\nabla \cdot V = 0 \quad \dots (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial T} + (V \cdot \nabla) V = -\nabla P + \frac{1}{Re} \Delta V \quad \dots (5)$$

ここで  $Re$  はレイノルズ数で

$$Re = (V_0 \times L) / \nu \quad \dots (6)$$

である。本数値解析では便宜的<sup>(6)</sup>に  $Re=500$ で計算を行っている。

圧力に関するポアソン方程式は式(4), (5)から得られ、

$$\begin{aligned} \Delta P &= -\nabla \cdot \{ (V \cdot \nabla) V \} \\ &+ \frac{(\nabla \cdot V)^n}{\Delta T} + \frac{\Delta (\nabla \cdot V)^n}{Re} \end{aligned} \quad \dots (7)$$

と整理して表すことができる。ここで  $\Delta$  は微小変位量である。

本研究では、モデル内でチャックが回転したときに発生する空気流についてMAC法を用いて数値解析を行った。MAC法とは、時間刻み  $n$  ステップにおける圧力  $P$ , 速度  $V(u, v, w)$  が既知である場合、まず圧力に関するポアソン方程式をガウス・ザイデル法によって解き、 $n+1$  ステップにおける圧力を求める。そして得られた圧力から  $n+1$  ステップの速度をナビエ・ストークス運動方程式により反復計算して解く解析手法である。ここでは式(5), (7)を流れ場の支配方程式としている。

境界条件は各壁面及びチャック外周面において、流れを生じない粘着条件を適用し、また圧力勾配がない状態とした。

さらに、流れのきっかけとなるチャックからの吹き出し流<sup>(3)</sup>を図3に示すように定義した。すなわち

吹き出し流をチャックの外周面に最も近い格子点上でチャックの外周の接線方向に向け（図3参照）、常に

$$V(U, V, W) = 1 \quad \dots \dots (10)$$

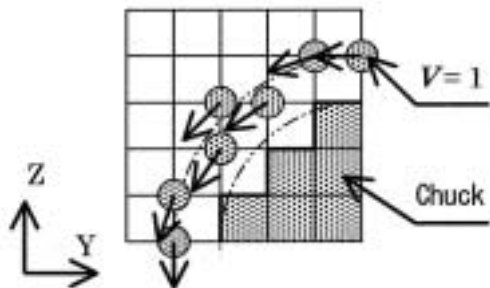


図3 チャックにおける吹き出し流の定義点

表1 解析における諸条件

タイムステップ $\Delta T$	0.001
レイノルズ数 Re	500
計算格子	スタガード格子
格子分割数	40×40×40
主軸回転方向	正転(反時計回り:CCW)

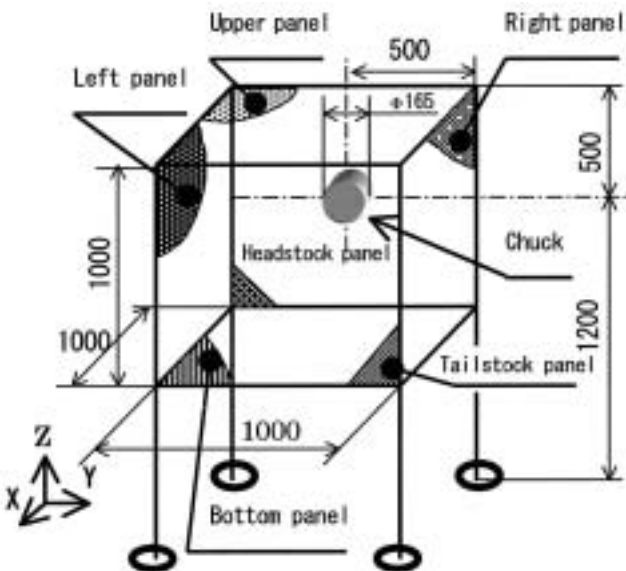


図4 加工空間実験装置

表2 可視化実験の諸条件

主軸回転数	4000min <sup>-1</sup>
レイノルズ数 Re*	990×10 <sup>3</sup>
主軸回転方向	正転(反時計回り:CCW)

となるような無次元速度を、吹き出し流が生じているチャックの爪の外周部を囲むように与えた（図3では、チャックの1/4のみを表示）。

なお、本研究で用いたその他の条件を表1に示す。

### 3. 可視化実験装置及び実験方法

数値解析で得られる空気流と実際に閉鎖空間内で爪チャックを回転させた場合に発生する空気流挙動とを比較検討するため、図4に示す加工空間実験装置により可視化実験を行った。この装置は主軸と加工空間から構成されているもので、加工空間は厚さ3mmの透明アクリル板で作成した内寸法1000×1000×1000mmの立方体となっており、チャックの回転によって発生した空気流を外部から容易に観察できるようになっている。そして、加工空間内部には爪高さ40mmの生爪を装着した外径呼び寸法165mmの三つ爪スクロールチャックが取り付けられている。ここで、説明の便宜を図るため、加工空間内部の各壁面を図2と同様に定義し、以下ではこれらの呼称によって記述している。

加工空間壁面上の空気の流れを観察するために行った表面タフト法では、見かけの直径0.15mm、長さ20mmの絹製のタフトを、黒色のラシャ紙に25mm間隔で格子状に装着し、これを加工空間内の各面に貼り付けて空気流の観察を行った。

加工空間全体の空気流を観察するために行ったトレーサ法では、平均直径2.3mmの発泡スチロール球、並びにドライアイスが気化する際に発生するスモークの2種類をトレーサとして用いた。

以上の方法により加工空間で発生している空気流を可視化し、その様子をCCDデジタルビデオカメラで撮影すると同時に、目視による詳細な挙動の観察、記録を行った。

また、実験結果を整理するに当たり、加工空間の一边の長さを代表長さL(m)、吹き出し流の速度を代表速度V<sub>0</sub>(m/s)、空気の動粘性係数をν(m<sup>2</sup>/s)として式(6)によりレイノルズ数で整理している。

$$Re^* = V_0 \times L / \nu \quad \dots \dots (11)$$

可視化実験におけるその他の条件を表2に示す。

### 4. 数値解析結果

#### 4.1 加工空間壁面近傍の流れの挙動

図5は数値解析結果におけるヘッドストックパネル、右側パネル、並びに底面パネル近傍の速度分布

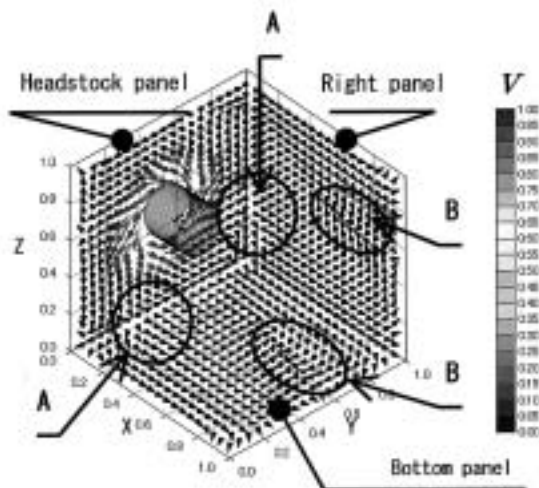


図5 数値解析モデルの壁面近傍の速度分布 (CCW, Re=500)

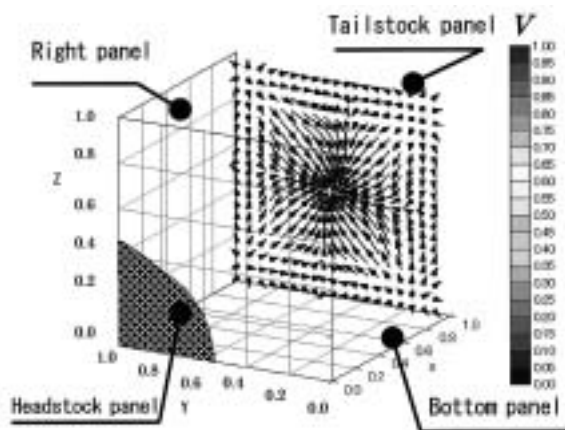


図6 数値解析モデルのテールストックパネル近傍の速度分布 (CCW, Re=500)

を示したものである。図5では流れを見やすくするために計算結果を2格子間隔で表示している。また、以下に示す速度分布に関する図も同様に表示している。

まず、ヘッドストックパネルのチャック周辺では、チャックの回転方向に旋回する流れが見られる。そして、その半径方向外側の領域では、チャックの接線方向へ向かう流れが存在しており、ヘッドストックパネルと直交して設置されている右側パネル、上方パネル、左側パネル、及び底面パネル方向へ向かっている。

次に、右側パネル及び底面パネル上のヘッドストックパネル寄りを見ると、前述の接線方向へ向かう流れがパネルに対して垂直に到達している領域Aにおいて、放射状の流れが発生していることがわかる。この流れは、上方パネル及び左側パネル上にも同様に発生しており、ヘッドストックパネルに直交して

設置される全ての壁面上で起きている現象である。

この放射状の流れと、ヘッドストックパネルからまわり込んだ流れが合流しながらテールストック方向へ向かっている。そして、その流れの一部がテールストックパネルに近い箇所で流れの方向を変え、領域Bで流れのぶつかり合いを生じている。この現象も、ヘッドストックパネルに直交して設置される全ての壁面上で同様に見られている。

図6は、テールストックパネル近傍の速度分布を示したものである。

図5で示したような、ヘッドストックパネルと直交して設置されている面を通してテールストックパネル方向へ向かう流れは、テールストックパネルへ到達した後、同パネル上を沿うようにパネル中央部へ集まる現象が見られる。そして、このテールストックパネル中央部から流れが剥離し、加工空間中央の吸い込み流<sup>(3)</sup>へと向かう挙動が見られた。

#### 4.2 加工空間中央部の流れの挙動

図7はX=0.30, 0.55, 及び0.80におけるY-Z平面内の速度分布を示したものである。チャックの爪端部に比較的近い領域(a)X=0.30を見ると、平面内のほとんどの領域でチャックの回転にともなった旋回する流れが見られる。そして、加工空間中央にある旋回する流れに注目してみると、(b)X=0.55及び(c)X=0.80からわかるように、チャックから離れるにつれ、旋回する流れの領域が小さくなると同時に速度も小さくなっていることがわかる。

さて、先に図5で示したように、流れがぶつかり合う場所(図5中の領域B)として見られていた箇所は、図7(b)及び(c)の領域Cに相当する箇所です。この領域では流れが壁面から剥離し、加工空間内を旋回する流れへ向かっている様子が見られる。

次に図7で見られた加工空間内部の流れの様子を別の角度から見た速度分布を図8に示す。この図は主軸軸線を含むY-Z平面内のX=0.04, 0.14, 0.30, 0.55, 及び0.80における速度分布を左側パネル側から見たものを示している。

X=0.04, すなわちヘッドストックパネル近傍では主にヘッドストックパネルに沿う速度成分となっていることが分かる。チャックの爪端部に近いX=0.30領域の断面を見ると、図7(a)で平面内のほとんどの領域で旋回していた流れは、空間中央部では比較的速度の大きなチャックへの吸い込み流となっており、チャックに近いほど速度が大きく、吸い込み領域が広がっていることが分かる。

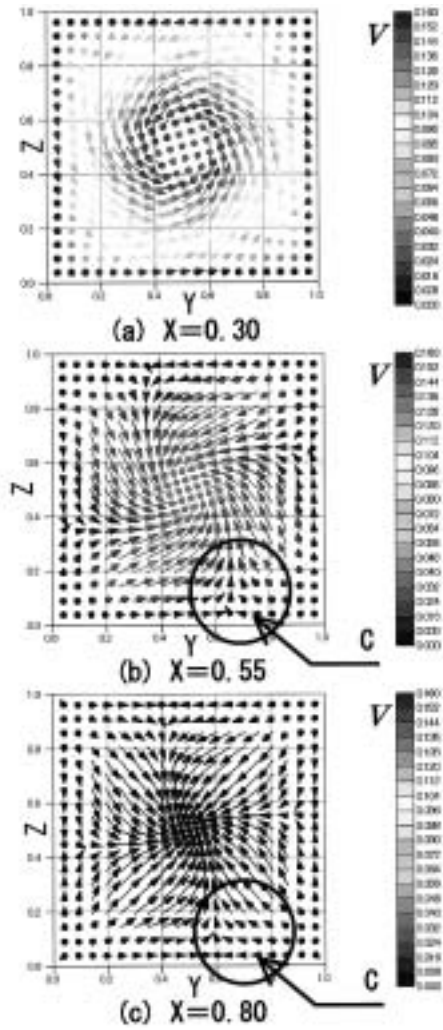


図7 数値解析モデルの加工空間内部における速度分布 (CCW,  $Re=500$ )

### 5. 数値解析と可視化実験との比較

図9は加工空間実験装置内で発生する空気流を表面タフト法で観察し、その結果を整理したものである。

まず、ヘッドストックパネルを見ると、チャック外周付近においてタフトがややチャックの方向に振動しながら、チャックの回転と同じ方向に向く挙動が見られた。これは、チャックの近傍に存在する、つれ回り流<sup>(3)</sup>である。そして、その半径方向外側では、タフトがチャックの接線方向に向く挙動が観測されている。これらのヘッドストックパネル上での可視化実験の結果は、数値解析結果の図5で示されている流れの挙動とほぼ一致している。

次にヘッドストックパネルと直交して設置されている右側パネル、上方パネル、左側パネル、及び底面パネル上では、チャックの接線方向に向いた流れが領域Dで壁面に対して垂直に到達する。この領域ではタフトが振動し、流れの方向が特定できない箇所である。さらに、その周辺ではタフトが放射状に広がる挙動が見られた。そしてヘッドストックと直交する各面のテールストックパネルに近い箇所では領域Eに向かいタフトがなびく傾向が見られた。

このEの領域では周辺の流れが集中し、複雑にタフトが振動していたため、流れの状態を明確に把握できなかったが、時折壁面に対して垂直方向を向き静止する挙動が見られた。このことから、この領域Eでは流れの剥離を起していることが考えられる。これらの流れの傾向は、数値解析結果において図5に示した右側パネル、底面パネルの流れと類似している。

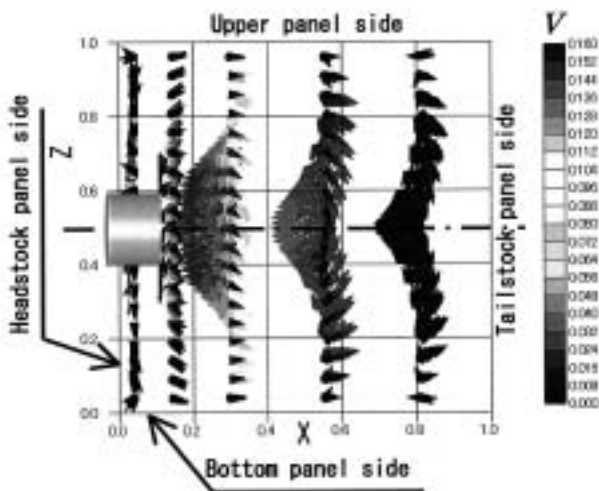


図8 数値解析モデルの加工空間内部における速度分布 (CCW,  $Re=500$ )

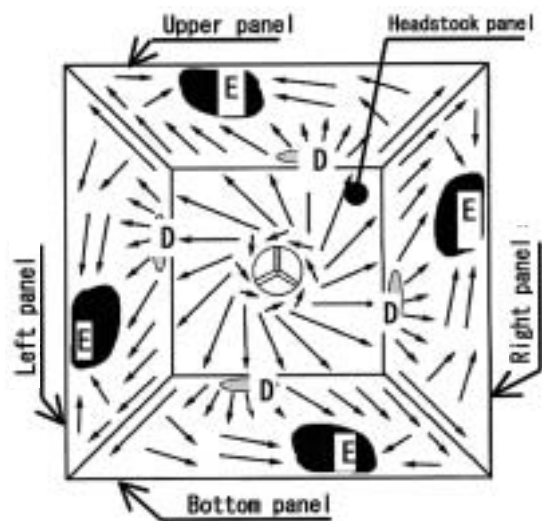


図9 可視化による加工空間壁面近傍の流れ分布 (CCW,  $Re^*=990 \times 10^3$ )

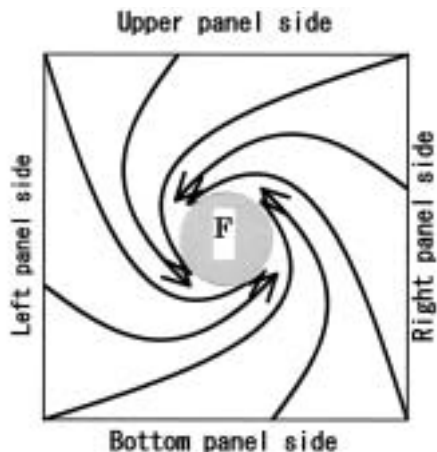


図10 可視化によるテールストックパネル近傍の流れ分布 (CCW,  $Re = 990^+ \times 10^3$ )

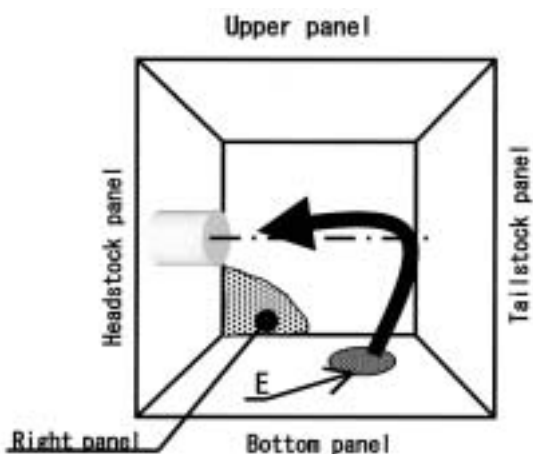


図11 可視化による加工空間内部の流れ (CCW,  $Re^+ = 990 \times 10^3$ )

次に、図10にテールストックパネル近傍の空気流挙動を整理したものを示す。

テールストックパネルではタフトがパネル中心に向かい螺旋を描くような挙動が見られた。さらにパネル中央部分ではタフトが振動し、明確に流れの方向を特定することができない領域 F が存在している。

これらの観察結果は流れがテールストックパネル中央部へ集中するという解析結果と同様であるが、可視化実験では各面からの流れが互いに絡み合い、螺旋を描くようにテールストック中心に向かうという若干の差異が見られる。しかしながら、全体の壁面近傍の流れ挙動は解析結果とほぼ類似した傾向が得られている。

次にトレーサ法によって観測した実験装置内部の流れの一部を図11に示す。

領域 E は前述のように周辺の流れが集中し複雑に絡み合っている箇所である。発泡スチロール球を用いたトレーサ法によれば、この領域 E に発泡スチロール球が堆積し、かつ間欠的に発泡スチロール球が舞い上がり、チャックへ吸い込まれるという挙動が見られている。この領域は各面で流れが集められている領域で、実際の CNC 旋盤であった場合には切り屑が堆積する箇所と考えられる。そして、剥離した流れに乗って浮き上がった発泡スチロール球は、チャック正面へと吸い込まれる。この様子はドライアイスによるトレーサ法でも同様の挙動が確認され、加えて、主軸軸線上での流れはヘッドストックに直交する各面からの剥離流とテールストックパネル中心からの剥離流が合流し、チャック正面へと吸い込まれている様子が見られた。

## 6. 結言

本研究で行った数値解析は細部で若干の差異があるものの、加工空間内で生じている空気流挙動を把握できる良好な結果を得られたと考えている。しかしながら、数値解析結果と可視化実験結果を整理するにあたり、レイノルズ数の定義の仕方やその大きさに違いがあるため今後検討を進めていく上で障害となることが考えられる。

今後は、加工空間内で発生している空気流に対して、適切に結果を整理できるようなレイノルズ数の定義の検討を行った上で、加工空間モデルを実際の加工空間に近づけたモデルでの検証が必要と考えている。

## 参考文献

- (1) 堤 正臣, 機論(C), 60-57(1994), 2894-2899
- (2) 斉藤義夫, 他 3 名, 精密機械, 49-10(1983), 1421-1427
- (3) 今田良徳, 他 3 名, 機論(C), 63-613(1997), 3306-3312
- (4) 今田良徳, 他 3 名, 機論(C), 65-637(1999), 3832-3838
- (5) 割澤伸一, 他 2 名, 機論(C), 66-649(2000), 3174-3180
- (6) 河村哲也, 他 3 名, 環境流体シミュレーション, 朝倉書店, (2001)
- (7) 河村哲也, 流体解析 I, 朝倉書店, (1996)
- (8) 荒川忠一, 数値流体工学, 東京大学出版局, (1994)