

開口部を有する加工空間を想定したCNC旋盤で発生する 空気流挙動の数値解析と可視化

辻 尚 史*・今 田 良 徳

Numerical Analysis and Visualization on Airflow within Machining Space of CNC Lathe to Own Passage for Outside

Naofumi TSUJI* and Yoshinori KONDA

(平成20年11月28日受理)

In order to solve some problems caused by the airflow within a machining space of CNC lathe to own passage for outside, the airflow was investigated by the MAC (Maker-and-Cell) method and flow visualization. Some characteristic airflow patterns were observed in machining space ; (1) There was some regions of high pressure near the headstock side where the radial airflow from rotating chuck struck there. And another side (tailstock side) was low pressure region. (2) In passage for outside, the airflow gone to the inside or outside was caused by a relation of pressure difference on the inside and outside. (3) The pressure distribution and spiral flow in the machining space are influenced by the passage for outside, and these characteristic phenomena were to change the position and area size of separation.

1. 緒言

消費者ニーズの多様化により、近年の工作機械に対する主な要求は高速化と高精度化である。これらに対応するための技術課題は、近年の技術開発により次々と解決されてきており、CNC旋盤に関して言えば、最高主軸回転数が $10,000\text{min}^{-1}$ を超えるような製品が開発されている。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。

本研究はこれまで行われてきている研究成果を参考に、作業環境や安全衛生に深く関わると考えられる切屑・切削油剤の漏洩に着目し検討を行ったものである。具体的には、加工空間に外界と繋がる開口部が存在する場合について、加工空間を簡素化したモデルを設定し、数値解析と可視化実験により検討を行ったものである。

2. 数値解析の概要

2.1 解析モデルの定義

一般的なCNC旋盤の加工空間は、チャック、刃物台、心押し台、傾斜パネル並びにチップコンベア部等が設置され、幾何学的に複雑な形状をしている。このような複雑な形状の計算モデルで数値解析を行うと、複数の因子の影響が重なりあい、空気流

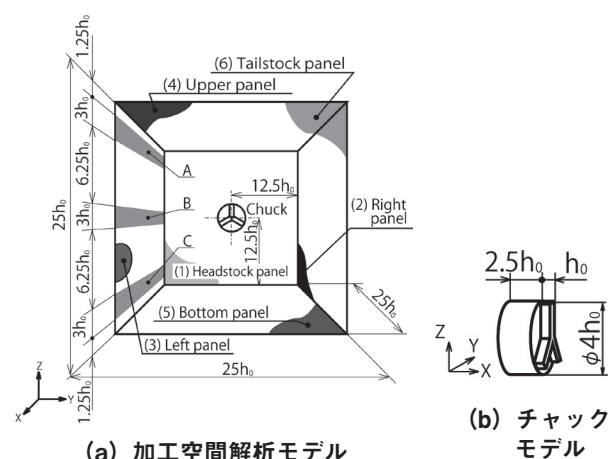


図1 加工空間の解析モデル及び各部の名称

* 秋田高専専攻科学生

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1(a)に示すような立方体の解析空間形状で、内部の一面の中央にチャックのみを設置した簡素化したモデルを設定した。解析空間モデルの各部の大きさは、チャックの爪高さ h_0 (図1(b))を基準に寸法比として定義している。各部の寸法比は、後述する可視化実験で使用した装置を参考に決定した値である。ここで、説明の便宜を図るため、図1に示すように(1) ヘッドストックパネル(2) 右側パネル(3) 左側パネル(4) 上方パネル(5) 底面パネル(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。

本研究では、外界につながる開口部の影響を検討するために、左側パネルに $3h_0 \times 25h_0$ の開口部を設けたモデルを設定した。すなわち、A部に開口部を設けた場合の(1) 空間解析モデルA、B部に開口部を設けた場合の(2) 空間解析モデルB、並びにC部に開口部を設けた場合の(3) 空間解析モデルCの3つのモデルについて検討を行った。

2.2 解析手法と基礎方程式の導出

本研究では、速度と圧力を時間発展させながら交互に計算を行うMAC (Marker and Cell) 法を用いた数値解析を行った。

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(1)並びにナビエ・ストークス運動方程式(2)に支配されている。温度変化が無い場合、それぞれの式は、

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

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

と表わされる。ここで、 u , v , w をそれぞれ x , y , z 方向の速度 (m/s), t を時間 (s), p を圧力 (Pa),

ρ を密度 (kg/m^3), ν を動粘性係数 (m^2/s) とする。

次に式(1), (2)を無次元化するために、式(3)のような無次元数を定義する。ここで、 h_0 は代表長さ (m) (本解析ではチャックの爪の高さとしている), v_0 は代表速度 (m/s) (本解析では吹き出し流⁽³⁾の速度としている) である。

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \frac{x}{h_0}, \quad Y = \frac{y}{h_0}, \quad Z = \frac{z}{h_0}, \quad U = \frac{u}{v_0}, \\ V = \frac{v}{v_0}, \quad W = \frac{w}{v_0}, \quad P = \frac{p}{\rho v_0^2}, \quad T = \frac{v_0}{h_0} t \end{array} \right. \quad (3)$$

式(3)を式(1), (2)に代入し整理すると、連続の式、ナビエ・ストークス方程式はそれぞれ

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

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

となる。ここで ∇ は勾配演算子、 Δ はラプラシアン、 V は無次元速度ベクトル、 Re はレイノルズ数であり、

$$\text{Re} = v_0 \cdot h_0 / \nu \quad (6)$$

と整理される。

圧力に関するポアソン方程式は式(4), (5)から得られ、

$$\Delta P = -\nabla \cdot \{V \cdot \nabla\} + \frac{(\nabla \cdot V)^n}{\Delta T} + \Delta (\nabla \cdot V)^n / \text{Re} \quad (7)$$

と整理して表すことができる。ここで Δ は微小変位量であり、 n はタイムステップを表している。

2.3 基礎方程式の差分化

本研究では、式(5), (7)を計算するため、離散化を行った。基礎方程式の差分化にあたり、ナビエ・ストークス運動方程式の対流項の非線形項にのみ3次精度前進差分の一種であるk-k差分⁽⁸⁾を与え、その他の項には1次精度中心差分を与えた。これは本研究で対象にしている、高レイノルズ数の解析でも比較的安定した解を得ることから導入したものである。なお、圧力のポアソン方程式は、1次精度中心差分とした。

2.4 境界条件の定義

速度の境界条件として加工空間を構成する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する。同じく加工空間を構成する各壁面及びチャック外周面での圧力の境界条件は、壁面上

で圧力勾配がない状態とする。

また、開口部に対しては、左側パネル壁面の格子より1格子Y-（マイナス）方向の格子点に

$$P = 1 \quad (8)$$

の条件を与え、時間経過に伴う変動はないものとした。すなわち、この格子点を外界とみなし、圧力のみを固定している。

次に、加工空間内の流れのきっかけとなるチャックからの吹き出し流を、チャックの外周面に最も近い格子点上でチャック外周の接線方向に

$$V = 1 \quad (9)$$

とした。また、軸方向には爪の高さ相当格子分（本数値解析では6格子）を設定した。すなわちチャックの爪に相当する箇所を外周を囲むよう帯状に吹き出し流を与えた。

また、チャックへの吸い込み流⁽³⁾は、爪正面に相当するすべての格子点上で

$$U = -0.16 \quad (10)$$

を与えた。これは、可視化実験で使用したチャックを実際に回転させた場合（主軸回転数：4000 min⁻¹）に発生している、吹き出し流と吸い込み流の速度測定の結果から求めた値である。

その他の解析条件は表1に示す。

表1 解析における諸条件

| | |
|--------------------|-----------------------------|
| タイムステップ ΔT | 25×10^{-6} |
| レイノルズ数 Re | 40×10^3 |
| 計算格子 | レギュラー格子 |
| 格子数 | $100 \times 100 \times 100$ |
| 主軸回転方向 | 正転（反時計回り：CCW） |

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2(a)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、加工空間は空気流を外部から容易に観察できるように厚さ3mmの透明アクリル板で作成した内寸法1000×1000×1000mmの立方体となっている。さらに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の三つ爪チャック（図2(b)）が取り付けられている。ここで、説明の便宜を図るため、

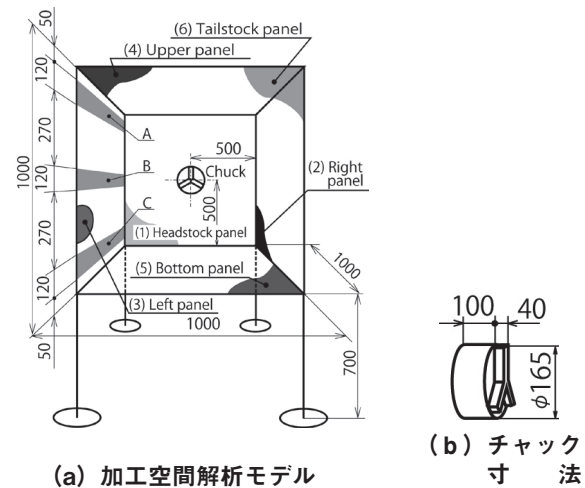


図2 加工空間の実験装置及び各部の名称

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。

装置の左側パネルには図2と同様にA, B, Cの箇所に開口部を設けられるようになっており、可視化実験は、解析の場合と同様に(1)空間実験モデルA, (2)空間実験モデルB, 及び(3)空間実験モデルCについて行った。

加工空間パネル近傍の空気流観察では、表面タフト法を用い、空間実験モデルA～Cの開口部分の空気流観察では、タフトグリッド法を用いた。

さらに、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とドライアイススモークの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（Panasonic製NV-GS320）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。なお、実験の条件は、主軸回転数を4000min⁻¹、主軸回転方向をチャックに向かって反時計回り（CCW）とし、これを正転として行った。また、実験結果を整理するにあたり、チャックの爪の高さを代表長さ h_0 (m)、吹き出し流の速度を代表速度 v_0 (m/s)、空気動粘性係数を ν (m²/s)として式(6)によりレイノルズ数で整理している。

4. 数値解析結果及び考察

4.1 空間解析モデルAの空気流挙動

図3に、チャックの回転方向が正転（CCW）、 $Re = 40 \times 10^3$ の場合における空間解析モデルAの数値解析結果を示す。ここで、数値解析では $100 \times 100 \times$

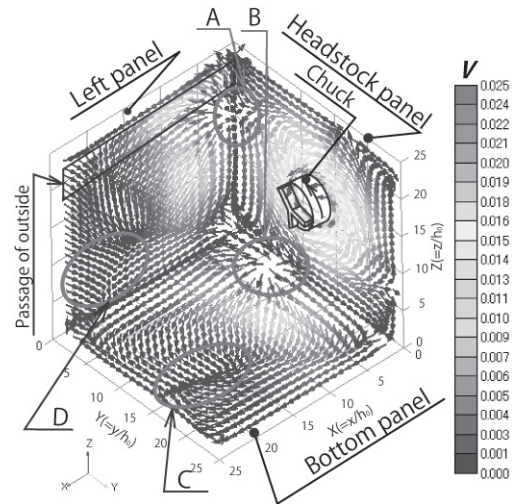
100の格子分割で行ったが、結果をすべて表示すると流れ挙動を明確に表すことができなくなるため、4格子間隔で表示している。また、図中の矢印は無次元速度ベクトルを示している。

図3(a)の領域A、Bを見るとチャックからの吹き出し流が、パネルに垂直に衝突することによって、放射状流⁽⁷⁾が発生している。一方、底面パネル、並びに左側パネルのテールストックパネルに近い領域C、Dではパネル上を通ってきた流れがお互いに衝突する様子が見られる。ここでは、この衝突した流れがパネルから剥離している様子が見られる。なお、これらの流れの挙動は、図3には示していない上方パネルと右側パネルでも同様に計算されている。

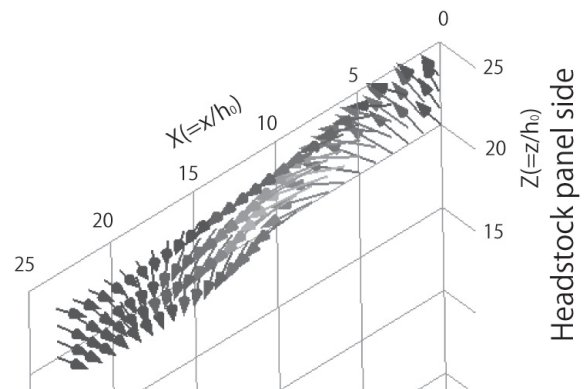
次に開口部の流れ(図3(b))を詳細にみると、ヘッドストック寄りの領域である $X=0\sim10$ の間では空気が上向きの速度成分を持ちながら外界に流出する挙動が見られる。これは、開口部近傍で発生している左側パネルの放射状流(領域A)により、上向きの成分が大きくなるためと考えられる。次に $X=10\sim17$ の間を見ると $X=10$ に近い領域では外界へ空気が流出するものの、テールストック側に近づくにつれ空間内へ流入する挙動に遷移し、 $X=17\sim25$ では完全に流入する挙動となった。

ここで、この現象を明確に説明するために、図3と同じ条件の各パネル上の圧力分布を図4に示す。開口部の圧力を詳細にみると、ヘッドストック側の領域Eでは圧力が1より高くなっているものの、圧力が若干下がる現象がみられている。これは、壁面に開口部が設けられたことによって、外界の圧力に影響を受けたためと考えられる。さらに開口部の圧力は、テールストック側に近づくにつれ徐々に下がり、テールストックパネル側の領域Fでは外界の圧力の影響を受けながらも1より低くなっている。すなわち、開口部に生じている空気の流出や流入の現象は、外界と加工空間内の圧力差が関与していると考えられる。

また、壁面の圧力分布をみると、壁面で局所的に圧力が低い領域G、H、Iは、ヘッドストックパネル側へ移動し、かつその範囲が縮小している。これは開口部を設定したことにより、外界の圧力が空間内の圧力に変化を与えたためと考えられる。すなわち、開口部を設けることによって加工空間内の圧力分布は、ヘッドストックパネル近傍で下がり、テールストックパネル近傍では上がる。この圧力の変化が先のような、局所的に圧力の低い領域の移動や面積の縮小を起こしている。



(a) ヘッドストック、左側、底面パネル近傍の速度分布



(b) 開口部近傍の速度分布

図3 空間解析モデルAの速度分布
(CCW, $Re=40\times10^3$)

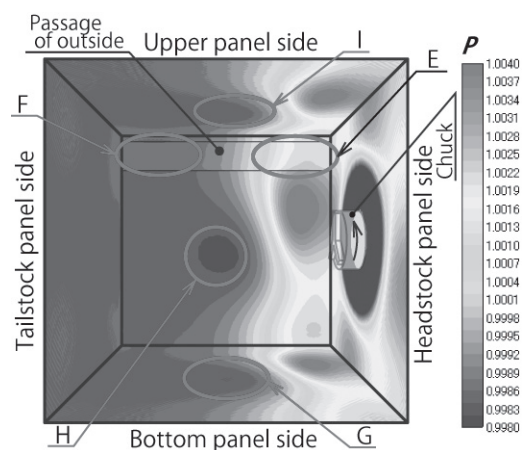
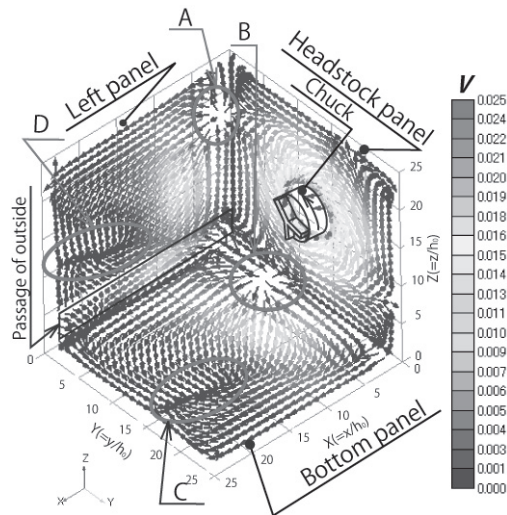
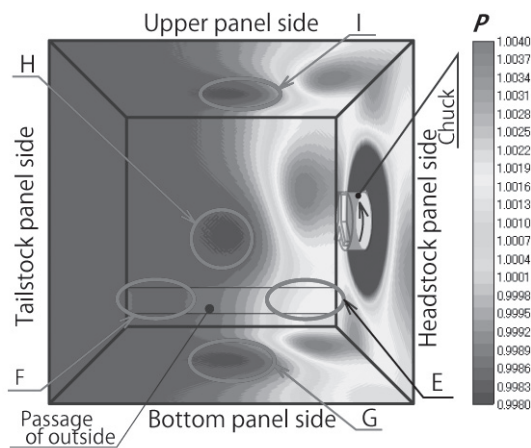


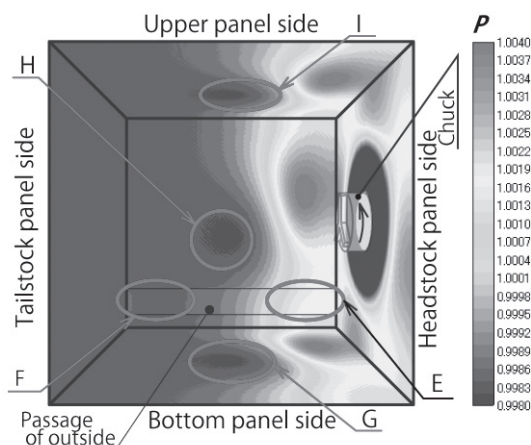
図4 空間解析モデルAのパネル上の圧力分布
(CCW, $Re=40\times10^3$)



(a) ヘッドストック，左側，底面パネル近傍の速度分布



(b) 開口部近傍の速度分布

図5 空間解析モデルCの速度分布
(CCW, $Re = 40 \times 10^3$)図6 空間解析モデルCのパネル上の圧力分布
(CCW, $Re = 40 \times 10^3$)

4.2 空間解析モデルCの空気流挙動

図5に，チャックの回転方向が正転（CCW）， $Re = 40 \times 10^3$ の場合における空間解析モデルCの数値解析結果を示す。また，図6に同じ条件の圧力分布を示す。

図5(a)をみると，放射状流（領域A，B）や剥離域（領域C，D）の特徴的な現象に変化は見られない。また，表示されていない上方，右側パネルについても同様である。

次に開口部の流れ（図5(b)）を詳細にみると，ヘッドストックパネル寄りの領域である $X=0 \sim 5$ の箇所では，空気がほぼ水平に外界へ流出しているのが分かる。これは，底面パネルで発生している領域Bの放射状流の影響によるものと考えられる。次に $X=5 \sim 15$ を見ると $X=5$ に近い領域では外界へ空気が流出するものの，テールストック側に近づくにつれ空間内へ流入する挙動に遷移し， $X=15$ 以降の区間では完全に空間へ流入する挙動となっている。圧力分布（図6）をみると，開口部の圧力分布や，壁面上で最も圧力の低い領域G，H，Iにおいても，空間解析モデルAと同様な現象が見られる。

5. 可視化実験結果と考察

5.1 空間実験モデルAの空気流挙動

図7に空間実験モデルAで，チャックの回転方向が正転（CCW）， $Re = 40 \times 10^3$ の場合におけるパネル近傍の流れを整理したものを示す。

開口部のヘッドストックパネル寄りの箇所では⑦やや上向きの成分を持ちながら空間外に空気が流出する挙動が見られた。これは⑥左側パネルの放射状流が起因しており，数値解析結果と一致している。ハッチングで示した⑧の箇所では，流れがテールストックパネル方向に向いているものの，不規則に空気が出入りする挙動が見られた。この挙動は，数値解析の結果では見られなかった現象である。これは，チャックから発生する吹き出し流が起因していると考えられる。すなわち実際の空気流では，チャックからの流れが回転に伴う周期的な流れであり，圧力も変動することから，このような現象が生じていると考えられる。さらにテールストックパネルに近い箇所では⑨空間内に吸い込まれる挙動が見られ，数値解析結果と一致していた。

次に，右側，底面，左側パネルの剥離域（領域B，C，D）では，パネルの中心部付近まで面積を拡大しているが，テールストックパネル側で面積が減少した。これについては明確な説明ができないが，開口部か

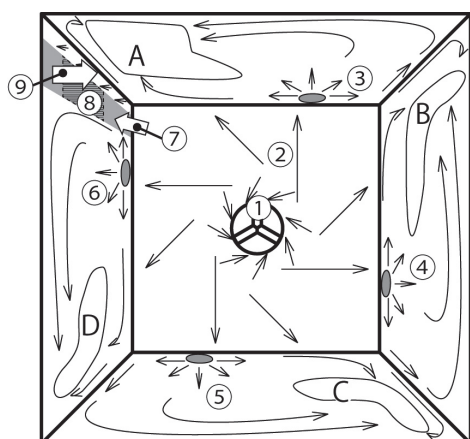


図7 空間実験モデルAの壁面近傍の流れ分布
(CCW, $Re=40 \times 10^3$)

ら流入する空気流と、空間内で発生している空間旋回流⁽⁷⁾が合流し、結果的にテールストック側の流れを強めるためと考えられる。

5.2 空間実験モデルCの空気流挙動

図8に空間実験モデルCで、チャックの回転方向が正転 (CCW), $Re=40 \times 10^3$ の場合におけるパネル近傍の流れを整理したものを示す。

開口部に注目すると、ヘッドストックパネル寄りの領域では、空間実験モデルAと同様に⑦開口部から外界へ空気が流出する挙動が観察された。これは⑤底面パネルの放射流の一部が開口部から外界へ流出するためと考えられる。しかし、ハッチングで示した⑧の箇所では流れがテールストックパネル方向を向くものの、タフトが空間内方向を向いたり、外界方向を向いたりする挙動が見られ、空気の入りが不規則に行われていることが分かった。これはチャックから発生する吹き出し流が起因していると考えられる。

次に、領域B, C, Dでパネルの中心部まで面積を拡大する様子が見られる。これは、数値解析で見られた圧力の変化によるものである。さらに左側パネルの剥離域 (領域D) は、⑥左側パネルの放射状流の一部が、⑦開口部から流出するため、ヘッドストックパネル方向へ移動している。

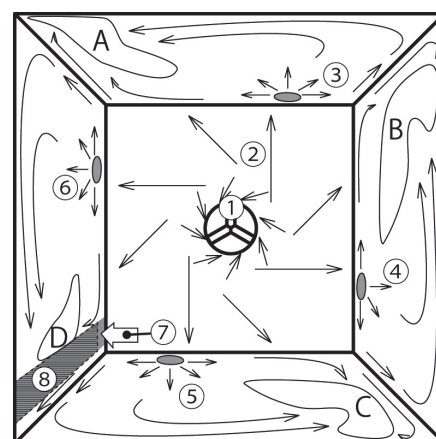


図8 空間モデル実験Cの壁面近傍の流れ分布
(CCW, $Re=40 \times 10^3$)

6. 結言

本研究で行った数値解析と可視化実験によって、開口部を有する加工空間における空気流挙動の基礎的資料を得ることができた。今後は、解析プログラムをより信頼性の高いものに改良すると共に、さらに本研究で行った加工空間モデルをより実際の加工空間に近づけたモデルを設定し解析と実験を進めていく予定である。

参考文献

- (1) 堤 正臣, 日本機械学会論文集 (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, 日本機械学会論文集 (C), 63-613 (1997), 3306-3312
- (4) 今田良徳, 他 3 名, 日本機械学会論文集 (C), 65-637 (1999), 3832-3838
- (5) 割澤伸一, 他 2 名, 日本機械学会論文集 (C), 66-649 (2000), 3174-3180
- (6) 今田良徳, 他 4 名, 日本機械学会年次大会講演論文集, (2002.9), 335-336
- (7) 今田良徳, 他 2 名, 日本機械学会論文集 (C), 73-736 (2007), 3322-3329
- (8) Kawamura.T. and Kuwahara.K. *AIAA journal*, 84-0340 (1984)
- (9) 河村哲也, 流体解析 I, 朝倉書店, (1996)
- (10) 河村哲也, 他 3 名, 流体解析 II, 朝倉書店, (1997)