

CNC 旋盤チャックの回転に起因する閉鎖空間内の 空気流に関する数値解析

今田良徳・仁村浩治*・森健志**

Numerical Analysis on Airflow Caused by
Rotating Chuck of CNC Lathe in Closed Space

Yoshinori KONDA, Koji NIMURA* and Takeshi MORI**

(2004年11月30日受理)

In order to solve some problems relating to airflow caused by rotating chuck of a CNC lathe or turning center, the airflow in a closed space assumed a machining space is investigated by the MAC(Maker-and-Cell) method. An analytical model and calculated grids are a three-dimensional space assumed a machining space and the staggered grids respectively. The analytical results are similar to characteristic airflow patterns observed by means of the tuft and tracer methods; (1)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. (2)Entrained-flow exist near the rotating chuck. (3)The separation of airflow from the panel is observed on the left and slant panels.

1. はじめに

近年の CNC 工作機械は、作業の多くが自動化されたことに加え、安全性および清潔性の観点から本体周辺にスプラッシュガードの設置が施されている。特に、CNC 旋盤およびターニングセンタにおいては、機械全体がカバーパネルで覆われており、加工空間はそのパネルによって外界と遮断された閉鎖空間となっている。このような空間内で爪チャックを高速で回転させた場合、発生する空気流に起因する諸問題が近年顕在化してきている。具体的には、(1)切屑の飛散および堆積、(2)切屑の工作物への絡み付き、並びに(3)切削油剤の飛散や漏洩等である。これらの問題は、生産性の効率、作業環境の快適性および安全性の低下のほか、工作物の加工面品位や工作機械の耐久性に悪影響を与えられ、主軸の高速化が進んできている現在、これらについての対策が急務であると指摘できる。

一般に、工作機械の性能向上に関わる基幹技術と

安全性や静粛性等の周辺技術との関連については、現在のところ強く意識されていないため、ほとんど議論がなされていない。特に、先に述べた空気流の問題のような場合には、高速回転爪チャックによって発生する空気流挙動を検討した上で、その結果を加工空間形状やカバーパネルの構造設計に結びつけることが重要であると考えられる。

以上のような背景から本研究は、チャックの回転に起因する先の問題を解決した加工空間形状設計の基礎資料とすることを目的に、閉鎖空間内で爪チャックが回転したときに発生する空気流の挙動について、MAC法を用いて数値解析を行ったものである。そして、この数値解析結果とこれまで行ってきた可視化法を用いた空気流観測結果とを比較し、その有効性を検討している。

2. 解析モデル及び計算手法

一般に CNC 旋盤の加工空間は、ドアパネル、傾斜パネル等のカバーパネルで覆われており、その中にはチャック、ターレット、並びに切削工具等が設置されている。そのため、加工空間形状は凹凸が多

* 秋田高専専攻科学生

** 新潟大学工学部学生

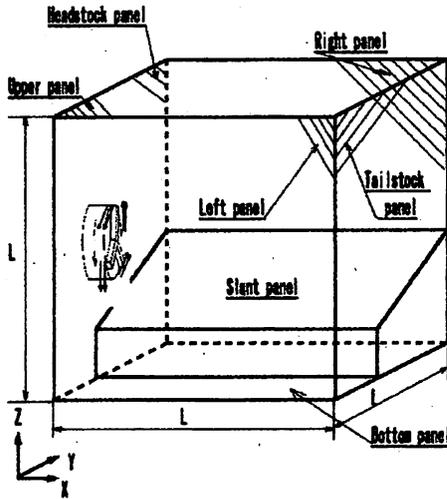


図1 解析モデル

い幾何学的に複雑な加工空間形状をしている。本研究では、その複雑な加工空間形状を簡素化し、図1に示すようにモデル化した。このモデルは、空間内部に爪チャックおよび傾斜パネルが設置された、加工空間寸法 $H=W=D$ とした3次元モデルである。

この加工空間に対して、連続の式及びナビエ・ストークス方程式を基礎方程式とし、次のような無次元変数を定義する。

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{x}{x_0}, Y = \frac{y}{y_0}, Z = \frac{z}{z_0}, U = \frac{u}{u_0}, \\ V &= \frac{v}{v_0}, W = \frac{w}{w_0}, P = \frac{p}{p_0}, T = \frac{t}{t_0} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(1)式を先に述べた基礎方程式に代入すると、連続の式は、

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (2)$$

となる。また、ナビエ・ストークス方程式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial T} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} + W \frac{\partial U}{\partial Z} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \\ \frac{\partial V}{\partial T} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} + W \frac{\partial V}{\partial Z} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right) \\ \frac{\partial W}{\partial T} + U \frac{\partial W}{\partial X} + V \frac{\partial W}{\partial Y} + W \frac{\partial W}{\partial Z} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

となり、それぞれ無次元化される。

ここで、 U, V, W はそれぞれ x, y, z 方向の速度の無次元数、並びに、 T, P はそれぞれ時間、圧力の無次元数である。

圧力についてのポアソン方程式は、(3)式より、

$$\frac{\partial^2 P}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial Z^2} = - \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial Z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial X} \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Y} \frac{\partial V}{\partial Z} + \frac{\partial U}{\partial Z} \frac{\partial W}{\partial X} \right) \right\} + \frac{1}{\Delta T} \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} \right) \quad (4)$$

と表され、ここで、

$$\frac{1}{\Delta T} \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial W}{\partial Z} \right)$$

の項は、連続の式により0となるはずであるが離散化による誤差が集積する可能性があるため、ここでは残している。

以上のようにして求められた(3)及び(4)式を支配方程式としたMAC法を用い、差分方程式を導いた。また、差分格子はスタガード格子を採用し、格子分割は $41 \times 41 \times 41$ とし、計算はガウス・ザイデル法を用いた。

初期条件及び境界条件については次のように定義した。

速度の境界条件については、傾斜パネルを除いた加工空間を形成するすべての平面上（ヘッドストックパネル、上方パネル、左側パネル、右側パネル、底面パネル、並びにテールストックパネル）において、粘着条件を適用する。すなわち、

$$U=V=W=0 \quad (5)$$

とする。

圧力の境界条件は、傾斜パネルを除いた各平面上で次のように与える。

Y-Z平面（ヘッドストックパネル、テールストックパネル）上では、

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} \quad (6)$$

X-Z平面（左側パネル、右側パネル）上では、

$$\frac{\partial P}{\partial Y} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \quad (7)$$

X-Y平面（底面パネル、上方パネル）上では

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \quad (8)$$

とする。

一方、加工空間内の流れのきっかけとなる吹き出し流については、

$$T=0, T=t ; V(U,V,W)=1 \quad (9)$$

とし、図2で示されている格子点で定義した。すなわち、チャック本体に取り付けられている爪の外周部に相当する格子点に、大きさが1でチャックの外周に対する接線と平行となる無次元速度ベクトル V を与えた。

次に、加工空間中に設置しているチャックや傾斜パネル部分については障害物として扱い、以下の様な方法で処理した。

流体中に置かれた物体の内部では流体は存在しないため、一般に方程式を解く場合にはその部分を除外して計算する必要があると考えられる。しかし、本研究の様な解析空間に複数の物体が存在する流れ場の計算において、とりあえず流体の存在しない部分もまとめて計算し、物体内の流体の無い部分や、物体と周囲流体との境界における条件を新たに設けて計算を行うことにした。その概略を次に示す。

まず、速度の方程式について、加工空間内に存在する物体を一旦何も障害物のない流体のみが存在する空間と見なし、1回分の時間ステップの計算を行う。その後、計算結果の物体の存在する部分を強制的に速度0にする。この方法を用いた場合、実際に流体が存在しない部分を、流体が存在するものとして計算するため、物体と流体の境界に近い格子点において境界条件が正しく反映されない可能性がある。しかし、計算方法にMAC法を用い、空間部分の近似式に二次精度以下の差分式を用いる場合、一般的にはほとんど問題はないとされている⁽⁴⁾。

次に圧力に関するポアソン方程式について考える。この場合、境界条件はノイマン条件であることから、反復法を用いて解く場合には、計算の反復ごとに境界の値を変更する必要がある。

ここで、最も簡単な条件として、圧力について

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (10)$$

(ここで、 $\partial/\partial n$ は境界の法線方向の微分を示す)とする場合、流体と物体との境界の格子点における圧力と、壁面に垂直で1格子分だけ流体側の格子点の圧力とを計算の反復ごとに等しく取るようにすれ

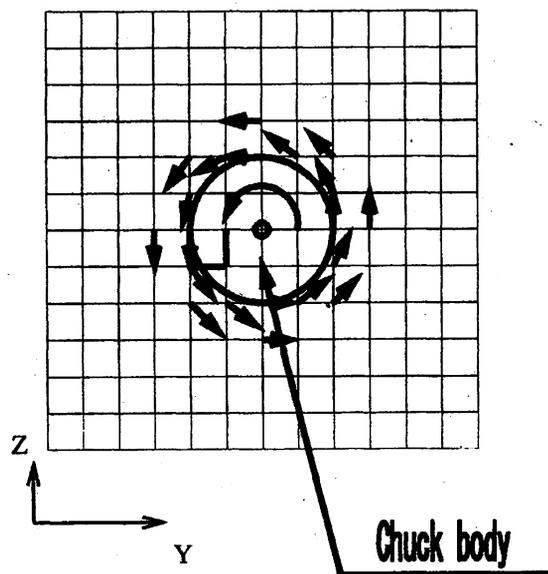


図2 吹き出し流の初期条件及び境界条件

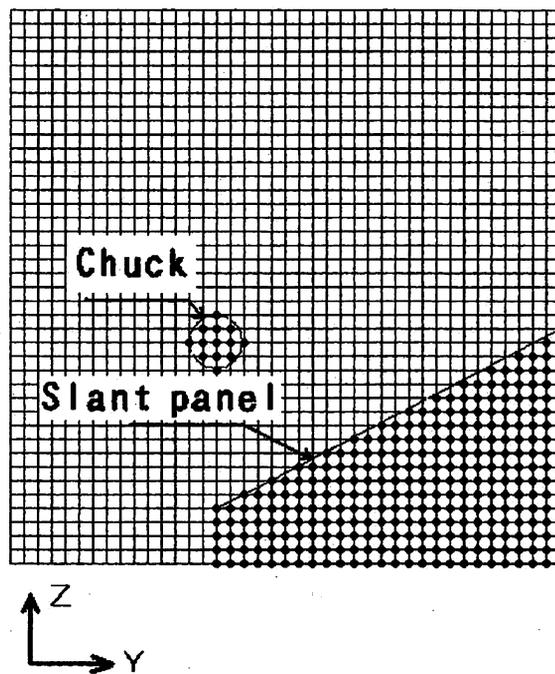


図3 障害物の定義点

ばよい。

ここで、加工空間解析モデル(図1)内に存在するチャック及び傾斜パネル部分(障害物)についての具体的な定義点を図3に示す。

3. 解析結果及び考察

図4はチャックの回転方向を正転 (CCW), レイノルズ数 $Re=300$ の数値解析結果について, 解析モデル内の無次元速度分布を示したものである。ここで, 数値解析における格子分割数は, 前述のように $41 \times 41 \times 41$ として計算を行っているが, すべての計算格子を表示すると見づらくなるため, 表示格子点を半分に省略して表示している。

図4を見ると本数値解析で定義した吹き出し流 (図2) を起源とする空気流が, 解析モデル空間全体に広がっている様子がみられる。このことについて詳細に述べると, 先ず, チャックからの吹き出し流は, チャックの半径方向外側に設置されている上方, 左側, 底面, 傾斜, 並びに右側パネルまで到達し, その後, それぞれのパネルに沿うようにテールストック方向へ向かう流れとなっている。また, この図では明確に表現されていないが, 解析モデル空間の中央部では, 前述の流れの一部がパネルから剥離し, 解析モデル空間全体を旋回する流れと合流する様子や, チャック正面付近では主軸軸線に沿うチャック方向へ向かう流れ, すなわち吸い込み流の存在が確認できる。

次に本数値解析で得られた空気の流れについて, 詳細に検討するため, 以前に行った加工空間実験モデルを使った可視化実験による空気流挙動観測結果を図5に示す。ここで, 加工空間実験モデルとは,

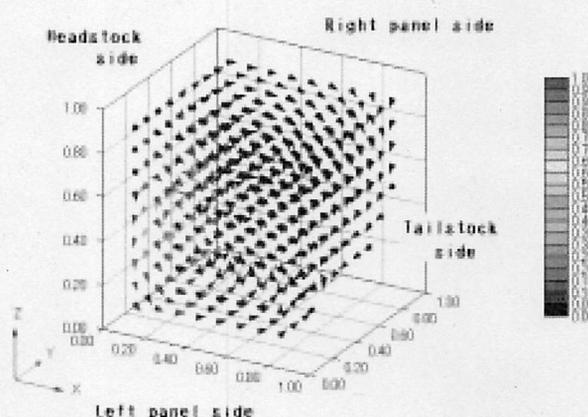
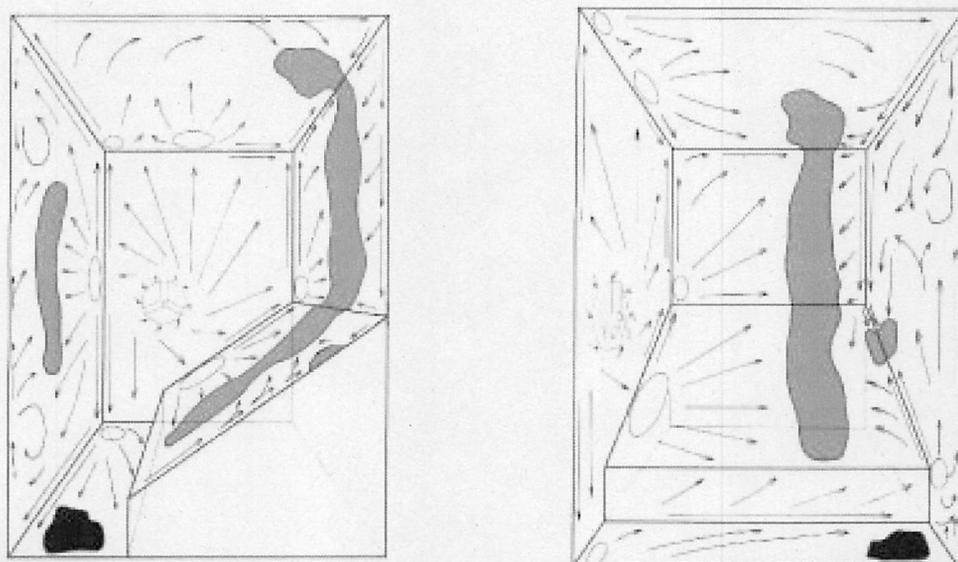


図4 解析モデル内の空気流挙動 ($Re=300$, CCW)

CNC 旋盤 SL-150 (森精機製作所製) をモデルに著者らが作成したもので, 同 CNC 旋盤の加工空間形状と同様の形状をしている。

図4で示した流れのうち, ヘッドストックパネル近傍の数値解析結果のみを表示したものを図6に示す。ここで, $Y=0.40$, $Z=0.44$ の位置がチャックの中心となっている。

チャックの外周近傍にはチャックの回転方向に旋回する流れの存在が確認され, その半径方向外側の領域では, この旋回する流れの接線方向へ向かう流れが見られる。そして, 接線方向へ向かった流れは, ヘッドストックパネルと直交するパネル, すなわち上方, 右側, 左側, 傾斜, および底面パネルまで到達



(a) Tailstock side view (b) Left panel side view

図5 可視化法による加工空間実験モデル内の空気流観測結果

達していることがわかる。これらの流れの挙動は、図5の加工空間実験モデルの空気流挙動と類似した結果となっているわかる。

図7に、上方パネル近傍の数値解析結果のみを表示したものを示す。上方パネルの $X=0.10, Y=0.45$ 付近を見ると、この点を中心として放射状に広がる流れが見られる。この位置は、ヘッドストックパネル近傍を上方パネル方向へ向かった流れが、上方パネルに対して垂直に到達する箇所である。そして、この放射状に広がった流れはテールストック方向へ向かう。これら上方パネル近傍の流れの挙動も、加工空間実験モデルで観測された流れの挙動と比較的よい一致が見られる。

図8は左側パネル近傍の数値解析結果を表示したものである。ヘッドストックパネルに近い領域を見ると、 $X=0.10, Z=0.60\sim 0.70$ を中心として放射状に広がる流れが存在することがわかる。その流れのうち、上方パネルと左側パネルの交線、および底面パネルと左側パネルとの交線まで到達した流れは、それぞれの交線に沿うようにテールストックパネル方向へ向かい、テールストックパネルに近い領域で流れの方向を変えている。そして、これらの流れは、左側パネル中央付近で合流しながらヘッドストック方向へ向かっている。このことは、加工空間実験モデルで観測された流れとよく一致している。一方、このヘッドストック方向の流れと前述の放射状の流れが、 $X=0.35, Z=0.40$ 付近で干渉している挙動が見られるが、加工空間実験モデルの観測結果で見られていた、テールストックに近い領域の渦のような流れは、数値解析結果では現れていない。さらに、流れの干渉によって発生する広範囲な剥離領域も現れていない。これらの結果は、本研究において、流れの干渉についての条件を特に定めていないことによると推測される。

図9は右側パネル近傍の数値解析結果を表示したものである。ヘッドストックパネルに近い領域を見ると、 $X=0.10, Z=0.50$ 付近を中心として放射状に広がる流れが見られ、その流れはテールストックパネル方向へ向かっている。図9では明確に表現されていないが、これらの流れは $X=0.60$ 付近から下方に向かいながら右側パネルから剥離し、空間中央部に存在する吸い込み流へと向かっている。しかし、この流れの剥離領域は、加工空間実験モデルで観測された領域と比べ小さくなっている。また、ヘッドストックパネルと右側パネルとの交線で発生している上方パネル方向へ向かう流れや、テールストックパネル側で発生しているヘッドストック方向へ向か

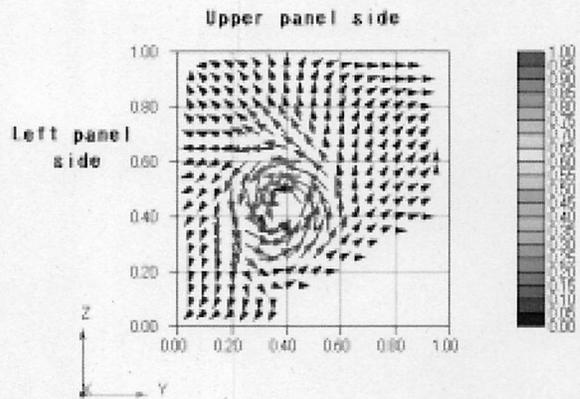


図6 ヘッドストックパネル近傍の空気流挙動解析結果 (Re=300, CCW)

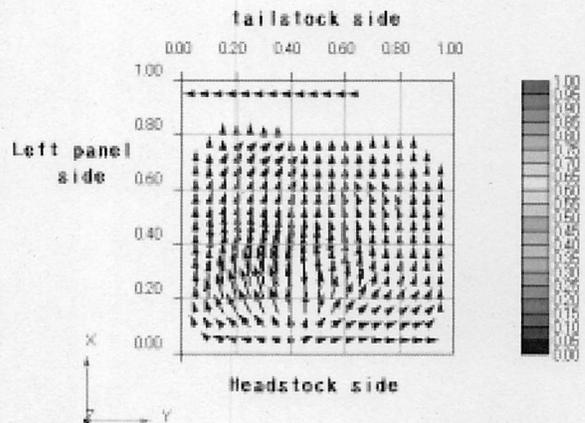


図7 上方パネル近傍の空気流挙動解析結果 (Re=300, CCW)

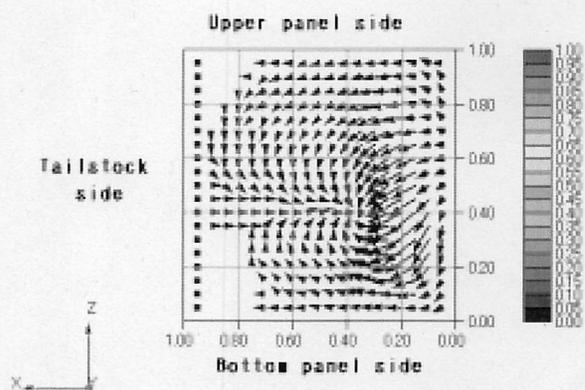


図8 左側パネル近傍の空気流挙動解析結果 (Re=300, CCW)

う流れは、数値解析結果では現れていないことがわかる。

図10は、傾斜パネル近傍の数値解析結果を表示したものである。ヘッドストックパネルに近い領域では、 $X=0.10$, $Y=0.30\sim 0.50$ を中心として放射状に広がる流れが存在している。この流れのうち、右側パネルと傾斜パネルとの交線へ向かった流れは、いったん交線に沿うようにテールストック方向へ向かうが、 $X=0.50\sim 0.60$ で流れの方向を変え、ヘッドストック方向へ向かっている。また、傾斜パネル下側の流れについても同様に、いったんテールストック方向へ向かうが $X=0.50\sim 0.80$ の領域で流れの方向を変え、前述の流れと合流しながらヘッドストック方向へ向かう。そして、この合流した流れと前述の放射状の流れが、 $X=0.30\sim 0.40$ 付近で干渉している様子が見られる。一方、テールストックに近い

領域を見ると、傾斜パネル上を下るような流れとなっていることがわかる。

これらの空気流挙動について更に詳しく見ると、右側パネルと傾斜パネルの交線をテールストック方向へ向かった流れの一部は、 $X=0.50\sim 0.80$ の領域で傾斜パネルから剥離しており、この剥離した流れは吸い込み流へと合流していることがわかった。また、傾斜パネル下側でも同様に、 $X=0.50\sim 0.80$ の領域から流れが剥離し、前述のように吸い込み流へと合流する様子が見られた。この流れの剥離は、加工空間実験モデルでの観察結果でも確認されており、発生する位置についてもほぼ同様な領域である。しかし、加工空間実験モデルの場合の剥離は、ヘッドストック方向からの流れとテールストックパネルから回り込んだ流れが、傾斜パネル上で干渉することによるものとして整理していたが、数値解析モデルにおいては、テールストックパネル方向から回り込む流れが発生していないことから、加工空間実験モデルの場合とは異なるメカニズムによるものと推測される。

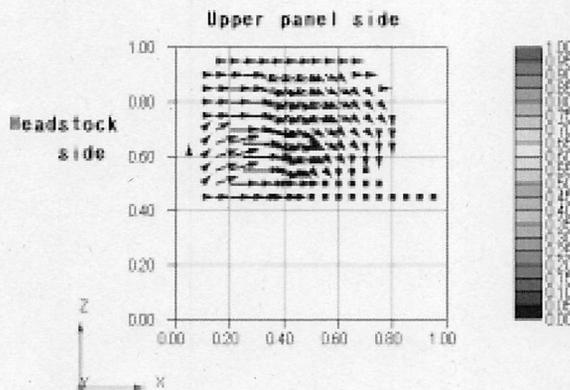


図9 右側パネル近傍の空気流挙動解析結果 (Re=300, CCW)

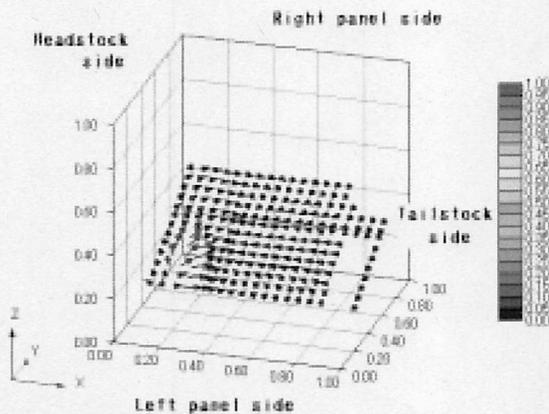


図10 傾斜パネル近傍の空気流挙動解析結果 (Re=300, CCW)

4. おわりに

本研究は、閉鎖空間内で爪チャックが回転したときに発生する空気流の挙動について、MAC法を用いて数値解析を行ったものである。

解析で得られた空気流挙動は、同様な加工空間での空気流可視化実験結果と比べ、剥離域の場所やその大きさにやや異なる点が見られるものの、例えばチャックに近い領域における空気流挙動の様によく似た挙動が見られた。提案した解析モデルおよび手法は基本的なものであるが、さらに検討を加え、有効性を高めたいと考える。

参考文献

- (1) 今田良徳, 他 3 名, 機論 (C), 63-613, 3306 (1997).
- (2) 今田良徳, 他 3 名, 機論 (C), 65-637, 3832 (1999).
- (3) 割澤伸一, 他 2 名, 機論 (C), 66-649, 3174 (2000).
- (4) 河村哲也, 流体解析 I, 朝倉書店, 1996.
- (5) 河村哲也, 他 3 名, 流体解析 II, 朝倉書店, 1997.
- (6) 荒川忠一, 数値流体工学, 東京大学出版局, 1994.