

## 2m遷音速風洞におけるPIV試験

小池 陽、重見 仁(航空宇宙技術研究所)、安木政史(西華産業(株))  
平野弘人(三菱重工)

The application of Particle Image Velocimetry(PIV) to the  
Transonic Wind Tunnel

Akira KOIKE, Masasi SHIGEMI(NAL), Masasi YASUKI(SEIKA CORPORATION)  
Hiroto HIRANO(MHI)

### 概 要

PIVは、気流中に散布された微小な粒子が気流と共に移動しその軌跡が流線のベクトルを表すのでこれをCCDカメラで撮影して画像情報として取得する計測方法である。従来この方法は比較的小規模なシステムに用いられて来たが今回、航技研2mの遷音速風洞にて実施したのでその概要、問題点、可能性等を報告する。

#### 1. はじめに

HOPE-Xの高速実証実験機にはノーズ先端にエアータセンサープローブが取り付けられて飛行中のエアータを計測する計画である。プローブが機体の影響を受けてそのデータに誤差が入り込むことが予想されるので、予めそれを風洞試験によって評価することにした。この風洞試験によるノーズ周りの流れの状態量の中気流速度を定量的にまた視覚的に捉えるために、今回PIV計測を初めて遷音速風洞で実施することにした。

PIV試験では気流中に散布する粒子(シーダー)の問題とベクトル画像に必要なレーザーライトシートの問題を解決する必要があった。これまでも同様な目的でシーダーを検討したが、当風洞の規模の大きさに全く実用化されなかつ

た。今回共同研究者の一人が、外国の風洞(当風洞とほぼ同規模)での使用実績を提示したので、これを参考にして同試験装置を製作し、風洞試験実施まで到達することができた。

#### 2. PIV試験装置

PIV試験に必要な機器構成系統図を図1に示す。主要な5項目について、当遷音速風洞で実施する場合の問題点、必要な機能等に関して述べる。

- (1)シーダー発生器
- (2)シーダー散布rack
- (3)パルスレーザー
- (4)ライトシート
- (5)カメラ

##### (1)シーダー発生器について

シーダーには他風洞でオリーブオイル等が用いられた例がある他、龍角散まで用いられたが評価は低かった。

オランダNLRで行われたPIV試験に用いられた物が今の所最適と評価されている。

DEHS(Di Ethyl Hexyl Sebacate)と言われるもので、TVスタジオや劇場で白煙として効果発生にも使用されている。

利点として、風洞を汚染しない、大量に発生可能、無毒、医学上安全等であり、実際粒子化した時の平均的サイズが凡そ $1\mu\text{m}$ 程度である。汚染しないことは、この粒子が時間と共に蒸発して消滅することであり、配管や散布ラックの中を詰まらせないことも意味している。

これを連続的に発生、供給する装置がシーダー発生器である。常温、大気圧下で液体のDEHS約10lを入れた容器に5気圧に調圧した空気を送り、霧状に発生させてその加圧空気と共に風洞に供給する機能を持っている。従ってこの発生器は一種の圧力容器であるが、供給側(吐出側)は2気圧以下になっているので、その配管に市販のビニール製のホース(散水用など)を使用できる。

実際のシーダー発生、供給の方法を以下に示す。圧縮機に10気圧程度の加圧空気を貯め、次にバルブを開くタイミングをデータ記録者と計る。測定部条件が整い計測開始の合図が送られたら、バルブを開き加圧空気を発生器に送り、シーダーを発生させる。連続して発生する条件(圧力と流量)を保持できる時間は、使用した圧縮機では数秒間であったが計測時間(データ記録時間)としては十分であり、1試験点の所要時間は圧縮機に空気が再度貯まるまでの時間を入れても約3分程度であり、連続

式風洞の利点を生かせば実用的な試験が可能である。

## (2)シーダー散布ラックについて

本装置は、図2に示すようにパイプを格子状に組合わせたもので $2.2\text{m}\times 1.5\text{m}$ の長方形である。集合胴と測定部の縮流比が20対1の遷音速風洞ではこのラック面積全体からシーダーが散布されると、測定部模型付近で $0.15\text{m}^2$ (高さ0.5m、幅0.3m)程度のPIV観測場が得られることが期待された。ラックは、 $\phi 30$ の主管2本と $\phi 15$ の副管4本で結合されて全体の強度を維持しており、各副管に $\phi 10$ の枝管が管継手を用いて接合されている。これら全ての管には千個を越す小穴( $\phi 1$ 程度)があげられており、供給されたシーダーは主管から副管へ、さらに枝管へと進み各穴から噴出する。

内径が10mの集合胴の中空に設置する作業がこの試験で最大の難工事であった。図3に示すように、2本の棒鋼( $\phi 10$ の軟鋼)と軟鋼の帯板の枠にシーダーラックをネジ止めした。この棒鋼は集合胴の壁に取付けられた金具4箇所にもボルトで結合され、ターンバックルで張力を調整した。更に、2本のワイヤーロープで気流の抵抗に抗するように上流側から支持した。取付位置は整流金網の約1m下流で高さは風洞中心である。シーダー供給ラインは前述のようにビニールホースであり、風洞の外にある発生器から風洞の貫通孔まで約10mは一本で伸びている。風洞内に入りラックの下まで一本で来てここから主管まで

は二分岐して立ち上げてある。このラインも風洞気流に耐えるようにロープで支持した。

### (3) PIV光学系について

1  $\mu$ m程度の粒子をCCDで捉えるにはできるだけ高輝度の点とした方が信号対ノイズ(S/N)比が良いことと、高速度でシャッター開閉を行い瞬間的に高速流を止めて記録するために、光源としてパルスレーザーを用いる。

高出力のレーザーとしてはYAGレーザーが一般的であり、本試験では米国製の物を用いた。定格出力は1パルス当たり120mjであるが、図4に示すように光路長が約9mと長いことと、光路中にある風洞胴体のシュリーレン窓(厚さ60mm)、測定部床面のガラス窓(厚さ10mm)を通過するので光量の十数%の減衰は避けられない。但し、光路の方向を90度変えるミラーの反射率は99%でこれによる減衰は無視できる。発光時間は5nsで、2枚目の画像までの間隔は任意に選べるが本試験では4~6  $\mu$ sで行った。

カメラのレンズは、PIVの被写体に対する焦点合わせと画角を決定するだけでなく、PIV測定精度や分解能を左右する要素である。特に画角は撮影のエリアサイズに関連しており、同じデータ量であれば画角が狭い(長焦点レンズに相当)方が分解能は高くなる。従って観測範囲に最適なレンズを選び、焦点合わせを確実にすることが重要である。

PIV測定精度は、シーダーの密度や光源の明るさに大きく左右される。シー

ダーの密度に関しては、レーザーライトシートで切り取られた二次元平面内を通過する粒子が多いほど精度(各粒子の位置情報の精度)は上がり、またCCDに写る粒子も明るい方がS/N比が上がると考えられる。(画像データの解析ではフィルタリング処理を行うのでS/N比が高い方が良い)

### (4) 画像処理について

処理画面をある基本のサイズ(32x32ピクセル)の小領域に分けて、この中の速度ベクトルを計算する。この計算には1/4ルールと言われる解析方法で粒子の移動座標を決定している。これらの計算は主に統計的に処理される他、ノイズと判断されるベクトルを除外するフィルタリング処理を行う。また、基本のサイズを2倍(64x64ピクセル)にすれば、ベクトルの方向(角度)の精度は2倍になるが、逆に空間分解能を下げる結果となるので模型近傍のように速度勾配の大きい場所には適用できない。

## 3. 風洞試験

今回の試験は遷音速風洞における初のPIV試験であるので、HOPE-X高速実証機とは形状が幾分異なる模型を用いて予備試験的な位置付けで行った。

図5は風洞に取付けた状態を示している。当模型には内装6分力天秤が組み込まれているのでPIV試験中に6分力計測も行った。

試験の手順を以下に示す。

(1) 圧縮機(ベビコン)を運転し10気圧の空気を作る。

(2)レーザー、カメラ等を起動し待機状態にする。

(3)風洞起動後所定のマッハ数、模型姿勢角等試験条件を合わせる。

(4)シーダーを発生する係と計測をする係との間で開始と終了のタイミングを計り記録(撮像)する。

(5)以後(3)に戻り試験計画に沿ってデータを記録する。

今回の試験条件は、集合胴総圧 $P_0$ が100kPa、 $M_\infty$ は0.4、0.8、0.9の3種類で、姿勢角は $\pm 4$ 度と0度の3種類で行った。

#### 4. 試験の結果

図6にPIV結果の一例としてマッハ数 $M=0.8$ 、 $\alpha=0$ の速度分布図を示す。模型近傍で速度ベクトルが形状に沿って変化している様子、速度分布等の気流状態の情報が分かる。これらのデータの精度を更に向上すること、詳細な解析(複雑な流れ)や大雑把な解析(変化がない一様な流れ)に適応する柔軟な解析方法の追求等今後の試験で改善する余地がある。

#### 5. まとめ

PIV計測を航技研の2m遷音速風洞で実施した。ここで得た知見と改善点(課題)を以下に示す。

(1)シーダー及び同散布ラックの仕様は当遷音速風洞に適している。

(2)レーザー光学系(ミラーの配置と設置方法(マグネットベース))は今回の配置と方法で良い。

(3)シーダー散布ラックの設置と取外し

の作業が非常に危険な高所作業となるので同装置の風洞への常設を含めて改善と調査検討の必要がある。

(4)シーダー発生量を増すこと、レーザーの出力(光量)を増すことの2点が改善点である。(これらは機器の調整、更新で対応できる)

(5)効率的なPIV試験を行うためには、シーダー発生、PIV記録等の作業を行う操作者の適切な配置と連携作業が必要である。

(6)データ解析に関しては、精度向上のために解析方法の改善を検討する。

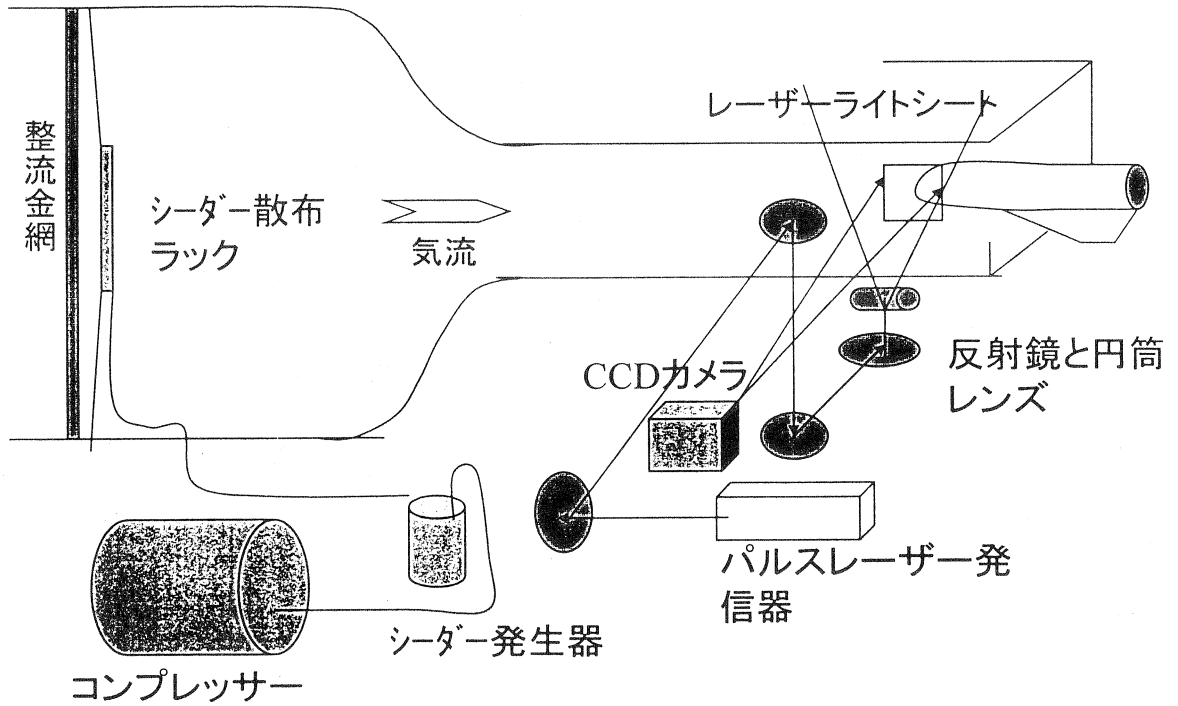


図1 PIV試験装置の系統図

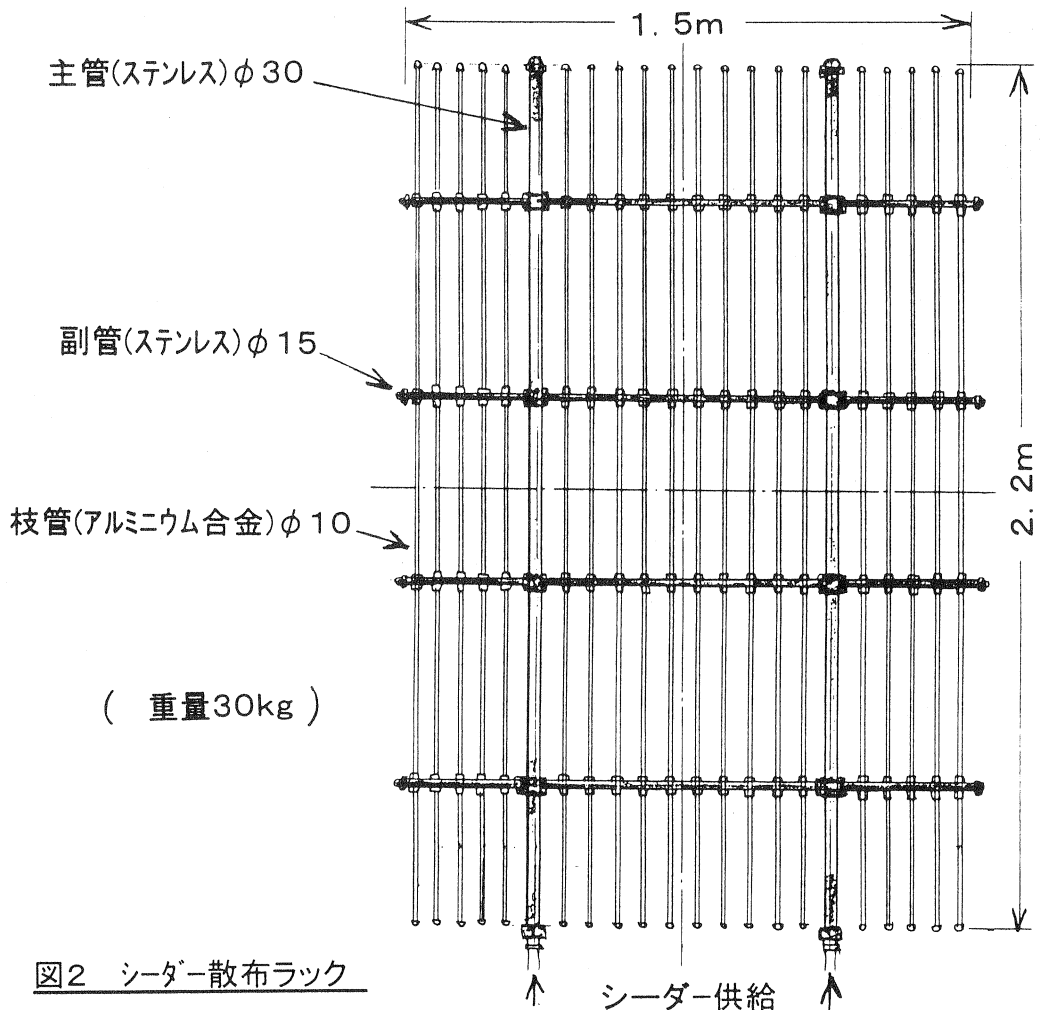


図2 シーダー散布ラック

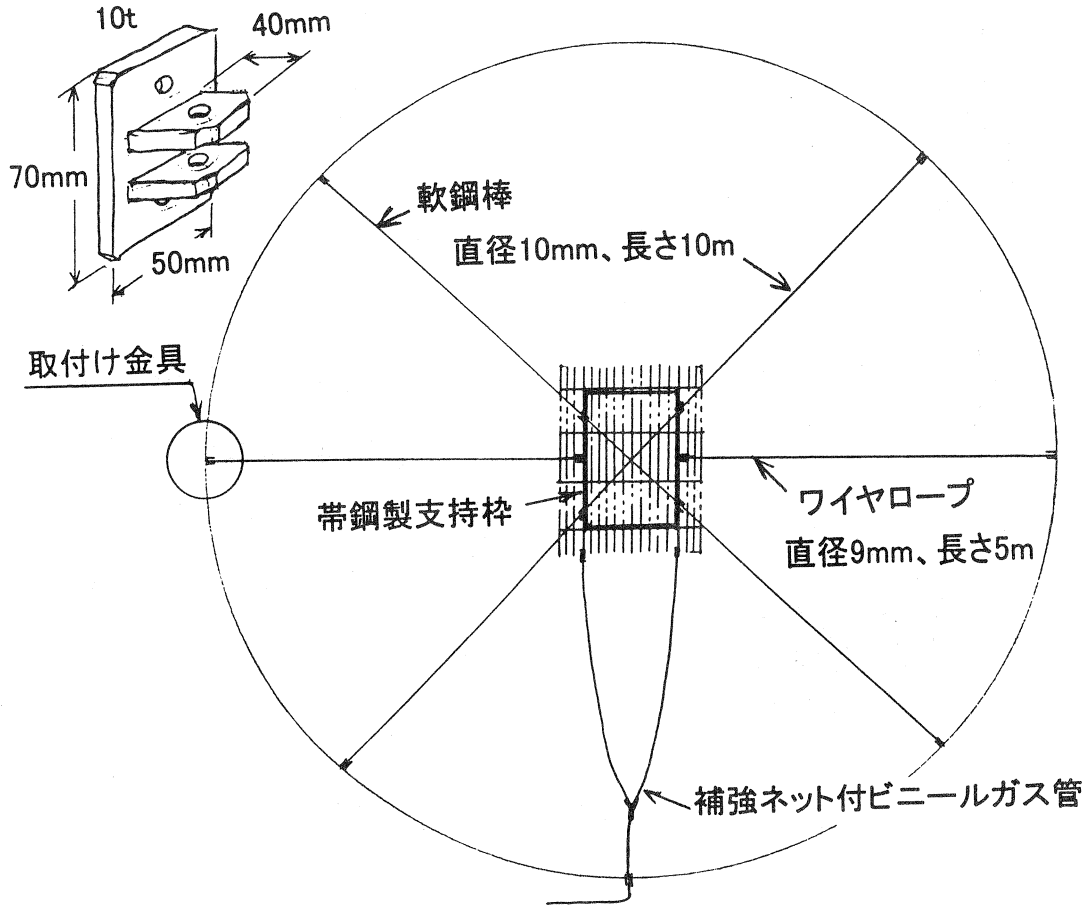


図3 集合胴への取付け

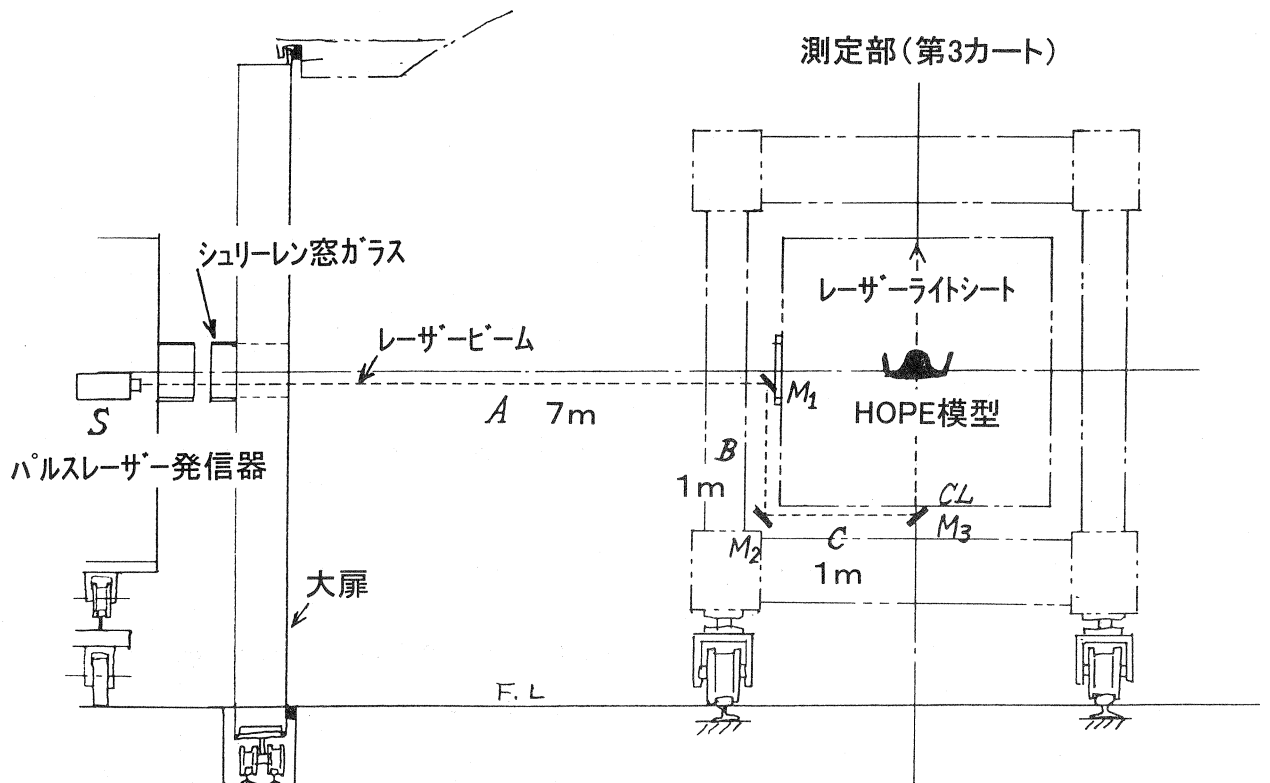


図4 レーザー光学系

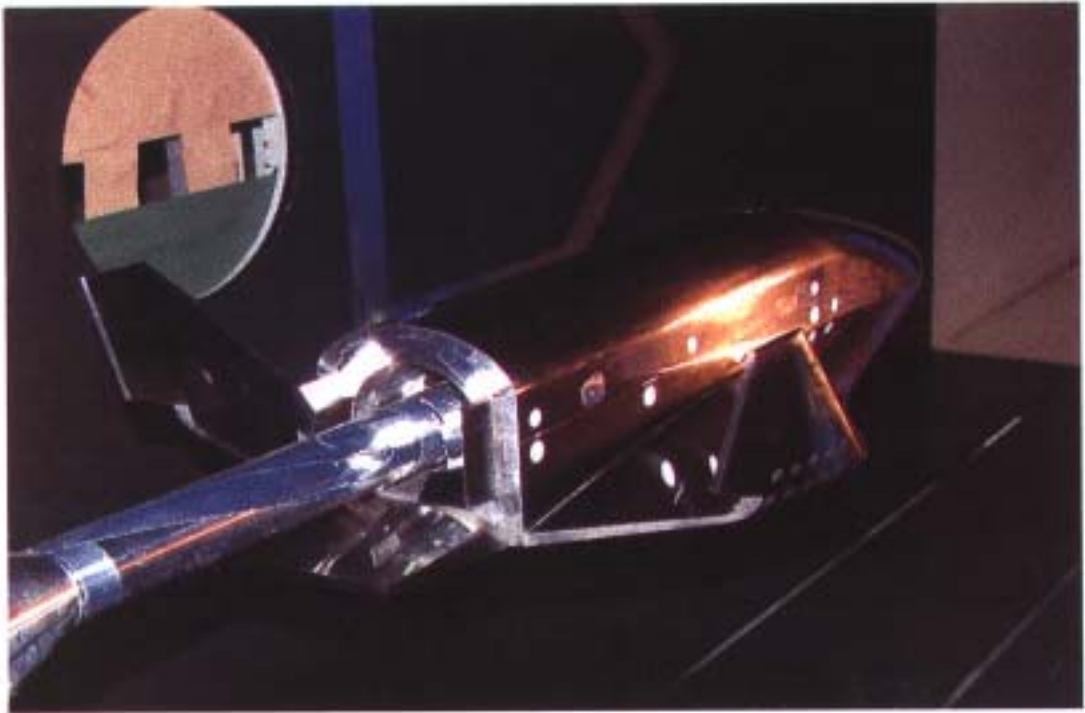


図5 模型取付状態

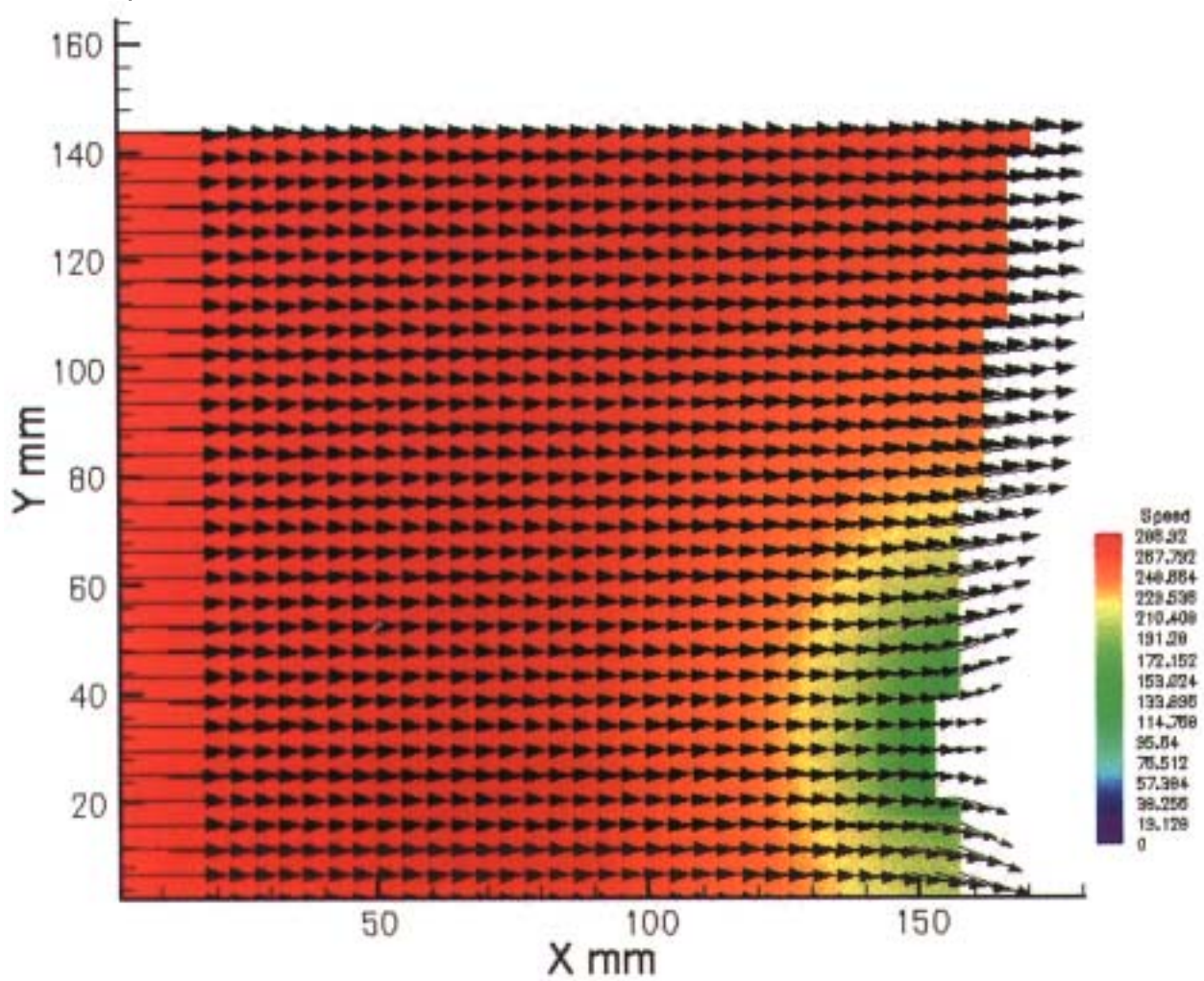


図6 速度ベクトルの分布