琉球大学学術リポジトリ

平板に垂直に立てた円錐まわりの流れについて

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2007-09-16 キーワード (Ja): キーワード (En): Fluid mechanics, Circular cones, Velocity measurement, Flow visualization, Vortex street 作成者: 伊良部, 邦夫, 山里, 栄昭, 照屋, 功, Irabu, Kunio, Yamazato, Eisho, Teruya, Isao メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/1996

平板に垂直に立てた円錐まわりの流れについて*

伊良部　邦　夫**　山　里　栄　昭**　照　屋　　功**

Study on Flow Around Circular Cone on Flat Plate

Kunio IRABU**, Eisho YAMAZATO**,
and Isao TERUYA**

Abstract

The experiments were conducted to measure the velocities of flow around a circurlar cone. Because of variaton of the cross section area in the longitudinal axis, the flow around the the circular cone behaves very high complex and forms the vortex streets which are issued from both side of the cone and attach in downstream to the plate setting it. The flow fields were visualized using the mixed particles in water and resulted in the velocity fields by the method of Particle Imaging Velocimetry (PIV). From analyses of the instantaneous velocity fields, the Strouhal numbers which showed an interesting variation were gained to the Reynolds numbers.

Key Words : Fluid mechanics, Circular cones, Velocity measurement, Flow visualization, Vortex street

1．緒　言

平板上の円錐まわりの流れについての研究は，高層建築物，あるいは樹木や単独の山のまわりの流れを推測するために必要である．特に山岳周辺の気流の状況は航空上の問題や，いわゆる山林火災等にも関係する．一方強風地帯において，防風の目的から森林や防風林等の周辺の風況を推測することも重要である．

平板に置かれた円錐や円錐台のまわりの流れについての実験的研究はいくつか行われ，表面上の圧力分布やはく離位置，および後流渦の流出振動数の変化等が調べられ[1),2)]レイノルズ数による流脈模様の変化やはく離線の位置が明らかにされている。[3)] しかしながら，ストロハル数の高さ方向変化，後流渦の形態や瞬時流れ場については未だ不明な点があるように思われる．

本研究は平板上の円錐まわりの流れについて，可視化実験を行い粒子画像速度測定法（Particle Imaging Velocimetry, PIV）により瞬時の速度場を明らかにするとともに，ストロハル数の高さ方向変化やレイノルズ数による変化について調べたので報告する。

2．実験装置と実験方法

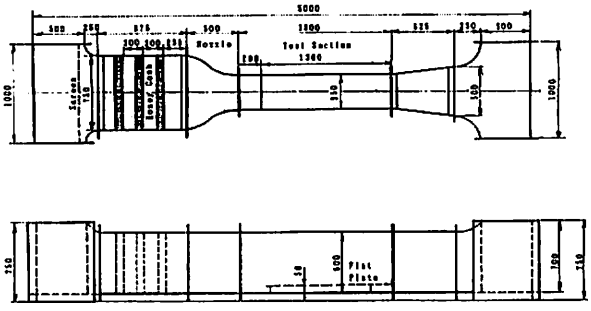
図1は実験装置の略図(a)と座標(b)を示す．実験装置は全長5000mmのオープン水槽とポンプ，配管系からなる．測定部は縦350mm，横1500mm，高さ600mmであり，側面は透明アクリル製である．測定部には水槽底面から約50mmの高さの位置に，流れに対して3°の前傾角で先尖りの平板（345×1300）を取付けた．円錐は高さh＝200mm，底面直径d＝50mm（頂角約14°）で，平板の前縁から中心線上300mmの位置に設置した．座標原点は円錐の底面中心点にある．水面の影響を除くた

受理：1995年5月12日
* 日本機械学会沖縄地方講演会において'94年7月14日一部発表済み。
** 工学部機械システム工学科，Dept. of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engrg.

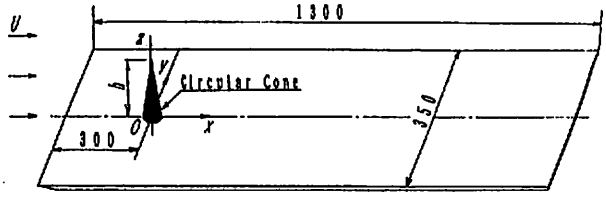
めに透明の上方板（340×1200）から平板までの深さは約400mmとして設定した．水は整流後，絞り比7／15のノズルを通り測定部に流入する．時間平均速度は上方板をとり外し，自由表面のある状態においてピトー管を用いて測定し，代表速度Uはx＝－200mm流路中央部での流速を採用した．実験は円錐の底面直径dと代表速度Uに基づくレイノルズ数Re＝Ud／ν＝1.1x10^3～1.5x10^4の範囲で行った．

図2は画像処理システム(a)と画像処理手順(b)を示す．流れの可視化はポレスチレン粒子を流れの中に懸濁する方法（固体粒子懸濁法）と，染料注入法により行った．トレーサの画像はビデオカメラによって撮影され，いったんVTRに録画されて後，パソコン援用の画像処理装置によって実時間処理された．流速の決定は連続する時刻における粒子画像を追跡して，同定することにより速度を求める方法（粒子画像追跡法，Particle Tracking Velocimetry；PTV）によって行った．前述のPIVはPTVを含めた広義の粒子画像追跡法を言う．流れ場の可視化はフラッドランプを光源とするスリット光を測定部に照射することにより行った．

次に本実験において用いた粒子画像追跡法（PTV）について説明する．はじめに可視化する流れ場の背景（背景画像）と，粒子により可視化された流れ場（動画像）をカメラ入力する．後者から前者を取り除く処理によって粒子画像のみを残す（背景除去処理）．流れ場のビデオカメラにより入力された画像の取込時間はNTSC方式により1画面（フレーム）画像につき1／30秒である．図3はたとえば，数個のトレーサ粒子の中の一個を追跡する場合を示す．同図(a)は，各時刻における粒子の形状と取込位置を示す．1画面は偶数フィールドと奇数フィールドからなる．飛び越し走査により，先ず時刻t＝0において偶数フィールド（0,2,4,…）分の画像が取り込まれ，続く時刻t＝t_1において奇数フィールド（1,3,5,…）分の画像がそれぞれのフィールドに取り込まれる（図3－(a)中のt_1，t_2）．1フィールド画像の取込みに要する時間は△t＝t_1－t_0＝1／60sである．したがって1フレーム画像は二時刻分の情報を含んでいることになる．このフレーム画像を偶数と奇数の各フィールドに分離する（フィールド分離）．これらのフィールド画像は奇数または偶数フィールドの情報を欠いているので，この空間を埋める処理（空間補正）を行い，2時刻分の画面を再生する（図3－(b)中のt_1，t_2）．このとき輝度を選択し，粒子以外の浮遊物や水面の反射による

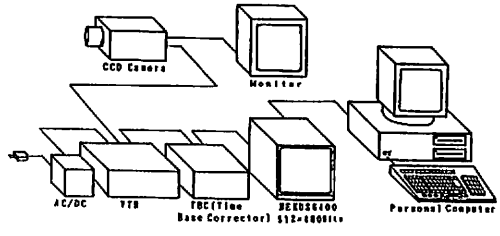


(a) Water channel and test section

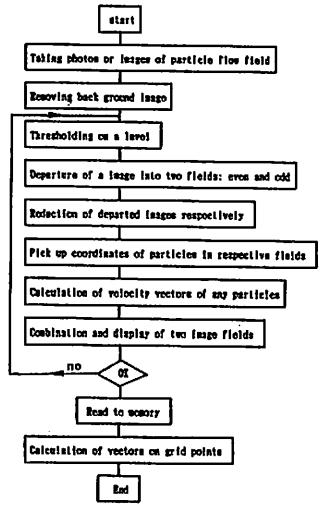


(b) Coordinates

Fig.1 Schematic view of test apparatus and coordinates



(a) Image processing systems



(b) Block diagram of image processing

Fig.2 Image processing systems and procedures in image processing

ノイズを除去する（Thresholding）．これらの処理を2フレーム画像に対して行うことにより，連続する4時刻分の画像を得ることができる（図3－(c)中のt_1～t_4）．これらの4時刻分の画像の重心位置を求め，粒子の同定を行うことにより，粒子の速度ベクトルが算出される（図3－(d)）．粒子の同定には方向に対する相関法を用いた．このような方法を四時刻法という．

3．実験結果と考察

図4は平板中心線上に沿う円錐前後の高さ方向についての時間平均の速度分布を自由表面がある場合について示す．平板の前縁（x／d＝－6）での速度分布は自由表面近くをのぞきほぼ一様である．前縁より200mm（x／d＝－2）の位置ではU＝25.1cm／s（Re_x＝Ux／ν＝5×10^4）のとき境界層厚さは約14mmである．円錐下流x／d＝3ではz／h＜0.5において大きい速度欠損があるが，その後x／d＝24以降ではほぼ回復している．図5はz／h＝0.5におけるy方向の速度分布を示す．図より円錐の直後で大きな速度欠損があり，最小速度は主流速度の約40%まで減少していることがわかる．

つぎに流れの可視化結果について述べる．図6は染料を用いた場合のz／h＝0.5付近での水平平面内の流れの連続する可視化写真である（Re＝Ud／ν＝1.09×10^3）．円錐の両側より一対の渦が流出している

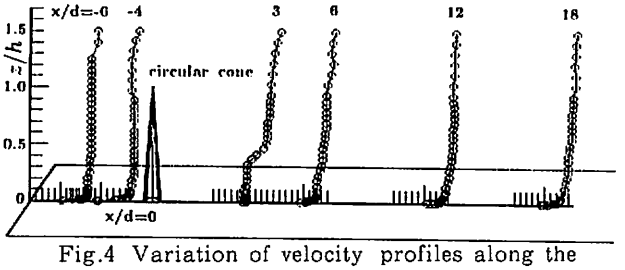


Fig.4 Variation of velocity profiles along the center line

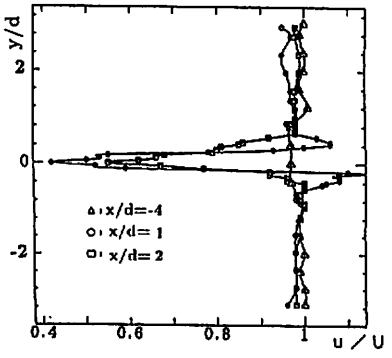
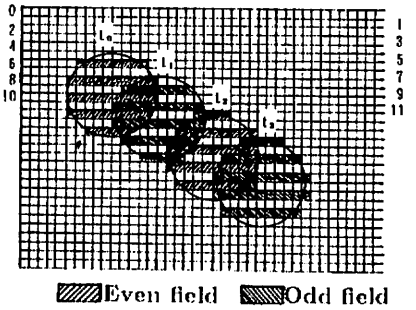
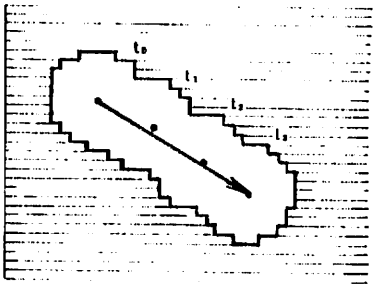


Fig.5 Velocity profiles in the y-direcion (*z/h=.5*)



(a)

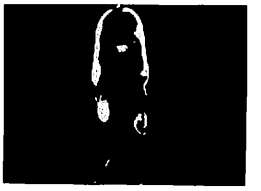
(b)



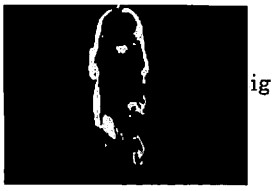
(c)

Fig.3 Processes in time tracking partcle tracer

(a) t=0 sec. z／H=0.5



(b) t=30／37 sec. z／H=0.5



ig.6 Vortex street shedding

(c) t=60／37 sec. z／H=0.5
Red=2.58x10^3

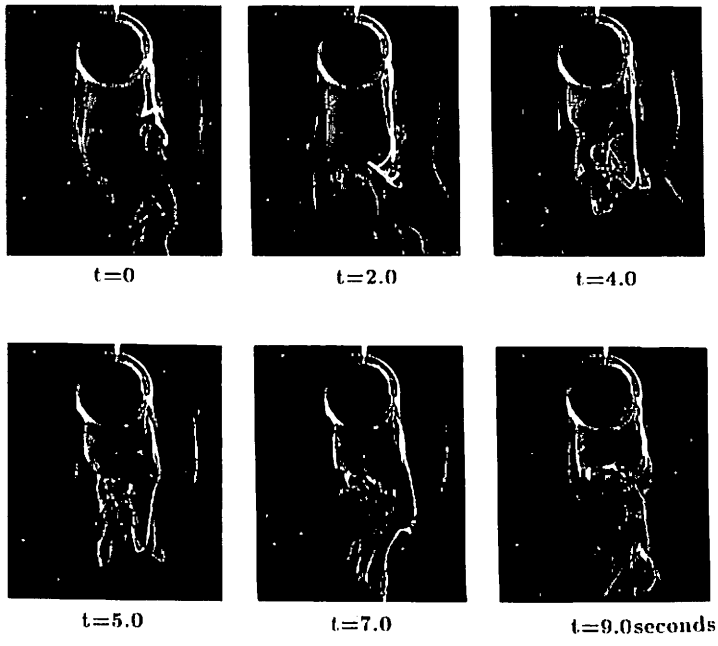


Fig.7 Wake flow from circuar cone near the floor (z/h=0.5,Re=1.09×10³)

ことがわかる．(a), (b), (c)の各流れの時間間隔は数秒程度であった．図7は円錐の根元付近（z／h＝.1～.15）の流れである．図より明確な渦対の形成はみられず，かなり複雑な流れ場となっており，円錐の片側側面からの流出渦が成長後に下流へ移動しながら崩壊していくことが認められる．

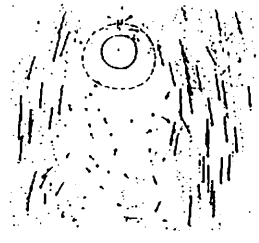
図8の(a), (b)は円錐の後流の縦断面流れの例である．(c), (d)はz／h＝0.8における流れの写真とPIVによって得られた各粒子の位置と速度ベクトルを示す．

図9の(a)は同じくz／h＝0.5における連続する2時刻での瞬時速度場の画像処理結果の一例を示す．すなわちある時刻（t＝0，(a)）と，約17／30秒経過後(b)の瞬間における流れであり，渦の巻込みがみられ

(a) Side view

(b) Side view

z／H＝0.5, Red＝6.66x10³
(c) Flow around a cirular cone



(d) Raw data velocity field captured by PIV method

Fig. 8　Flows in side view and in the horizontal plane

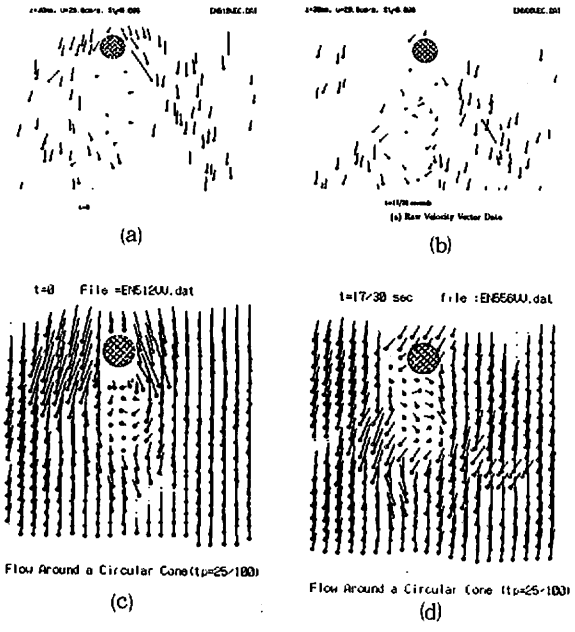


Fig.9 Instantaneous velocty in the wake of circular cone (z／h=0.5)

る．(c), (d)は(b)における速度から補間により，格子点上の速度ベクトルを求めたものである．この図により後流渦の形成がより明確になっている．

図10は円錐の中心線を含む主流方向に平行な垂直断面内の瞬時速度場の例を示す．光スリット幅が大きいために，奥行きの大きな速度場を示しているが，円錐の中心稜線直後のｚ／ｈ＜0.5の範囲では横軸を有する顕著な渦領域がいくつか形成され，下流へ行くにつれてその高さ位置が次第に低下していくことがわかる．図11は図10に基づき，空間格子点上の速度ベクトルを求めたものである．この図により渦領域の高さ位置の下流方向への変化がより明確である．以上の図６～11より，円錐の後流渦は下流へ行くにつれて，次第にその高度が減少し，ほぼ円錐の高さに相当する距離において平板に付着して後，崩壊していくことがわかる．

図12と図13は主流方向に垂直な円錐直後の垂直断面内の流れ場を円錐の斜め背後方向から撮影し瞬時速度場を求めたものである．図12は円錐の下半部周辺の流れであり，ある間隔をおいて流れが渦巻いていることがわかる．図13は円錐の上半部周辺の流れを示す．図より上半部では下半部と比較して渦のスケールが小さくなるとともに，渦の形成が明確でない．

図14と図15は，それぞれ図12と図13とに対応している．これらの図より流れは見かけ上，縦渦に似た渦構造となっている．このことは次のように考えられる．すなわち円錐面の傾斜のために，円錐への近寄り流れは根元部に近い後流部へ流入する傾向，あるいは速度の下向き成分を有することになる．円錐側面の稜線に沿って形成された渦管が剥離するとき，この下向き速度成分による運動量供給は，渦要素に下向き成分を与え，同時に渦管の変形，あるいは分裂に関与する．したがって渦管の断面内では上方および下方への速度成分を有する流れとして捉えられることになる．

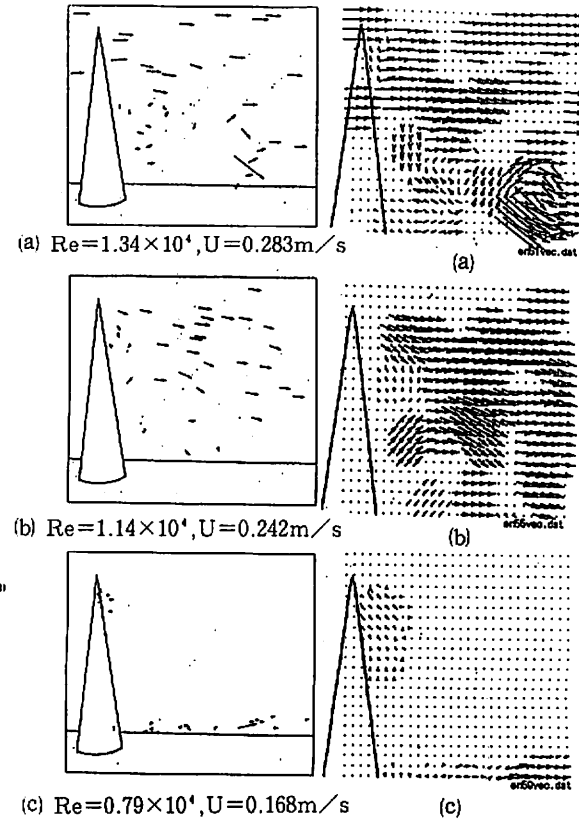
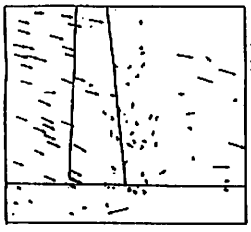


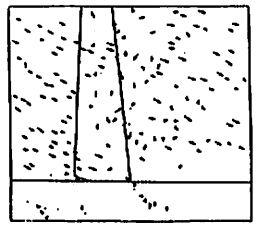
Fig.10 Instantaneous velocites in the vertical plane in the side view (y=0)

Fig.11 Velocities on grid points(coresponding to Fig.10)

M.Gaster[4]によれば，円錐の頂点近くでは渦の流出速度が根元部のそれと比較して大きくなるようである。さらに平板近傍では壁面摩擦のために渦管の移動速度は相対的に減少するため，渦管全体が後方へ傾斜していくことが考えられる．可視化実験の際に，円錐の後流の平板上に沈着したトレーサ粒子が突然舞い上がるような動きをときどき示すことは，渦管が傾斜す

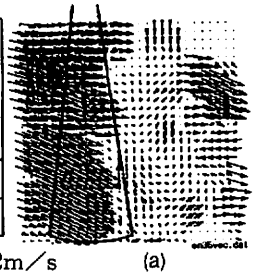


(a) Re=1.14×10⁴, U=0.242m／s

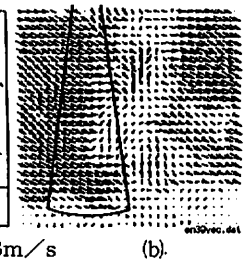


(b) Re=0.79×10⁴, U=0.168m／s

Fig.12 Instantaneous downstream velocities in the rearss section

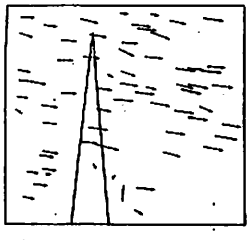


(a)

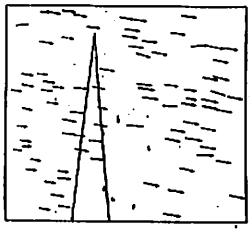


(b)

Fig.14 Velcites on grid (corespoing to Fig11)

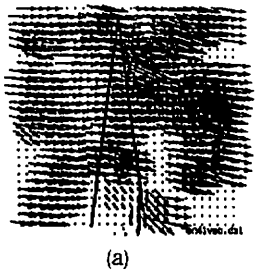


(a) Re=1.34×10⁴, U=0.283m／s

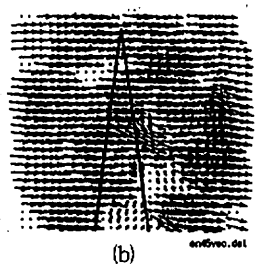


(b) Re=1.14×10⁴, U=0.242m／s

Fig.13 Instantaneous downstream velcities in the rear cross section



(a)



(b)

Fig.15 Velocities on gred (cresponding to Fig12)

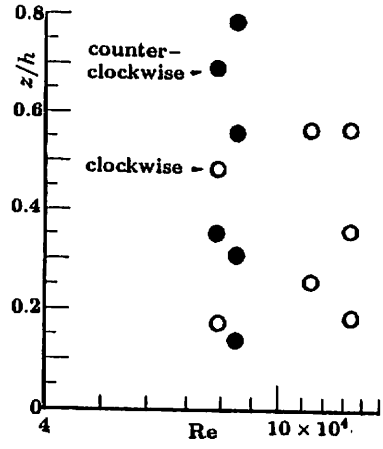


Fig.16 Positions of apparent axis of vorticies in vertical direction

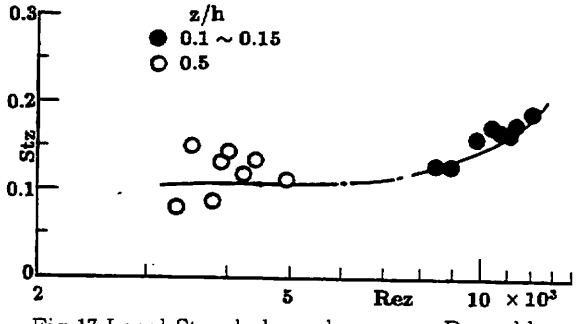


Fig.17 Local Strouhal number versus Reynolds number

ることを示しているものと思われる．このような渦管の傾斜は，とくに円錐角が大きくなるほど顕著になるようである。[2]

図16は，円錐直後の渦の縦渦的な動きを図12および図13より求め，見かけの渦中心の高さ位置をレイノルズ数に対して示したものである．図より円錐の後流において高さ方向に4～5個の渦が並んでいることがわかる．

図17は，局所ストロハル数 $St_z = n_z d_z / U$ を局所レイノルズ数 $Re_z = Ud_z / \nu$ に対して示す．Rezが大きい領域，すなわち円錐根元部（●印）では $St_z = 0.16 \sim 0.18$ 程度であり，Rezの小さい領域あるいは円錐中央部（○印）ではStzは減少し，$St_z = 0.07 \sim 0.13$ 程度となっている．さらに前述のように頂点部付近では渦の放出が明確となっていない．なお八木田ら[2]によれば，Stzは円錐根元部付近では大きく，高さ位置とともに次第に上昇し，極大値に達して後，やや減少している（□印）．

4．結　論

円錐まわりの流れについて，可視化実験を行った．用いた円錐は一種類（テーパ24／100）のみであるが，得られた知見は次の通りである．

1）円錐後流の渦管または渦輪は下流に行くにつれて次第に後方へ傾斜していき，ほぼ円錐の高さに相当する距離において平板に付着して後，崩壊する．

2）円錐後流のはく離渦管の通過するときの瞬時速度場は，根元部から頂点部へかけて見かけ上縦渦的な構造を示す．このことは渦管が変形していることを示唆している．

3）局所ストロハル数の大きさは，円錐の根元付近での値が中央部での値よりも大きい．

本研究における画像処理用ソフトの一部は東京大学生産技術研究所第二部小林研究室において開発されたものである．ここに記して謝意を表す．

参考文献

(1) 岡本，八木田，片岡，機論，第２部，Vol.42, No.359, (1976-7),pp.2107-2115.

(2) 八木田，山岬，機論Vol.45,No.392 (1979-4), pp.474-483.

(3) 泉，種子田，九大応力研所報，第42号，(1975), pp.63-71.

(4) M.Gaster, J. Fluid Mech. Vol.38,part 3, (1969),pp.565-576.