

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560734

研究課題名(和文) 高迎角物体まわりの剥離流の曳航実験による研究

研究課題名(英文) Study of Separated flow over bodies at high incidence with towing in air-filled chamber

研究代表者 西川 進栄 (NISHIKAWA NOBUHIDE)

千葉大学大学院工学研究科教授

研究者番号：80009753

研究成果の概要(和文)：走行装置を用いて、いわゆる曳航風洞のPIV計測と四塩化チタンによる可視化を行い放物一円柱体については、迎角 40° 以上の軸対称放物体の剥離渦について、主渦の周りに渦管のループが等間隔で並ぶ「渦ループ構造」を確認することができた。渦ループ構造は一次渦と二次渦の相互干渉からCrow不安定性によって形成された渦がせん断層を変形させ主渦に巻き込まれることによって形成されるといえる。球頭円柱については、頭部の剥離：キャップ渦に阻まれながらも渦ループは弱いながらも生じている。

研究成果の概要(英文)：Experiments were made in an air chamber using a towing paraboloidal-nose or hemi-sphere nose model at high angles of attack. PIV recordings were obtained in planes both perpendicular to and parallel to the body axis to study detailed structure of the vortices in the cross-sections. It was confirmed by the PIV study that equally spaced vortex tubes forming vortex loops around the main vortex, and the corresponding structure was found by flow visualization using titanium tetrachloride (TiCl₄).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	2400000	720000	3120000
21年度	900000	270000	1170000
22年度	300000	90000	390000
年度			
年度			
総計	3600000	1080000	4680000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：剥離線, 伴流渦, ナヴィエストークス方程式, 数値解析

1. 研究開始当初の背景

2007年度以前において、限られた代表速度で、物体形状は放物円柱で背後の縦渦を回りこむ渦ループが可視化、画像計測両手法で申請者の研究室で確認されていた。画像計測を行なう際、送風による風洞ではトレーサーがすぐ希薄になるが曳航風洞ではトレーサー混入空気を充填後、模型を曳航＝走行させればその難点がなくなり良好な速度計測値を得る。本課題と関連研究例との対比を述べると、曳航風洞は数メートル直径のものがゲッテンゲンなどにあり、2mサイズのエアバス

の模型について使用されていた。デルタ翼背後の縦渦を回りこむ渦ループは定常構造なら数編、米国で論文が出ていた。数値解はともかく実験的には物体背後の縦渦干渉の非定常性を扱った国内外とも、例はほとんどなかったといえる。

2. 研究の目的

物体背後の縦渦を縦渦の横断面に平行に周りこむ‘襟巻きの’うずについて、その発生因がケルビンヘルムホルツ不安定なのか否かを検討し、さらに渦構造のレイノルズ数依存性の画像計測や可視化での解明および

これらの数値計算での解明をめざす。

3. 研究の方法

(1) 曳航風洞の新規作成 平成 19 年度までの既存曳航のシステムでは模型の移動速度の最大が $U=1.5$ [m/s] であり、レイノルズ数は最大で $Re=9000$ 程度であったのを $U=3$ [m/s] が可能なアクチュエータを補助金で購入し移動距離も 3.1m となるよう曳航チャンバも新規作成した。

(2) 可視化、画像計測、数値計算の相互比較 Nd:YAG レーザーのシート光を用い、トレーサーとしてグリコール煙(粒径約 $5 \mu m$) を使用する。画像取得には CCD カメラを用いた。また、可視化に四塩化チタン $TiCl_4$ と空気の反応による白煙を用いる ナヴィエーストークス方程式の差分分解を非定常化した INS3D コードによって得て、上記実験との比較を行なう。

4. 研究成果

模型移動速度の最大が $U=3$ [m/s] であり、新規作成した曳航チャンバで移動距離も 3.1m の条件で模型はまず平成 19 年度までの主な対象の放物円柱で $Re=14400$ で行なった。その結果 $Re=9000$ 程度と比較し同様の渦ループが可視化、画像計測両手法で確認できた。新たに試みた形状である球頭円柱ではノーズ剥離が強く発生してより下流での軸方向速度が小さくなるためか、渦ループは発生範囲も狭く主渦を回り込むほど持続しなかった。これらのことは渦ループ構造の発生因として、いわゆる飛行機雲の蛇行と同一原因の Crow 不安定が有力という指摘の立証に寄与すると期待される。

(1) 可視化、画像計測 図 1 は、模型中心軸に垂直な撮影断面における PIV 計測によって得られた渦度の等高線を表している。時計回りのスピンの渦(度)は白、反時計回りの渦は黒で表示している。この図より模型背後には主渦と呼ばれる一対の剥離渦、さらに一次渦、二次渦を確認することができる。また、

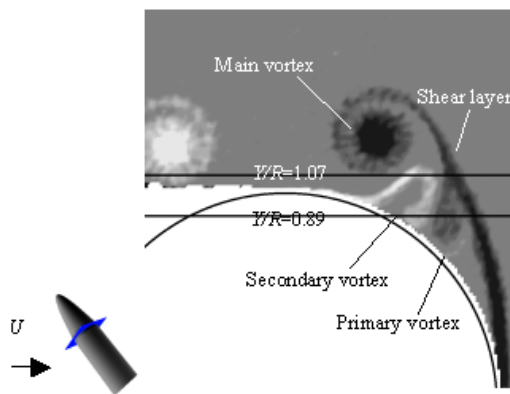


図 1 模型中心軸垂直断面における渦度の等高線: $Re=7200, \alpha=40^\circ, X/L=1.86$

この撮影断面($X/L=1.07$, ただし X ; 長手座標 L ; ノーズ長さ)ではせん断層は途切れることなく主渦に巻き込まれている。また模型の後方付近の断面ではせん断層が一次渦、二次渦と合流するあたりで途切れ、主渦と同じ回転方向の「小渦」が主渦のまわりに点在している様子が確認できた。一方、図 2 はスパン断面、 $Y/D=0.725$ (高さ Y が一定、 D : 円柱直径)における渦度の等高線で、赤色で clockwise

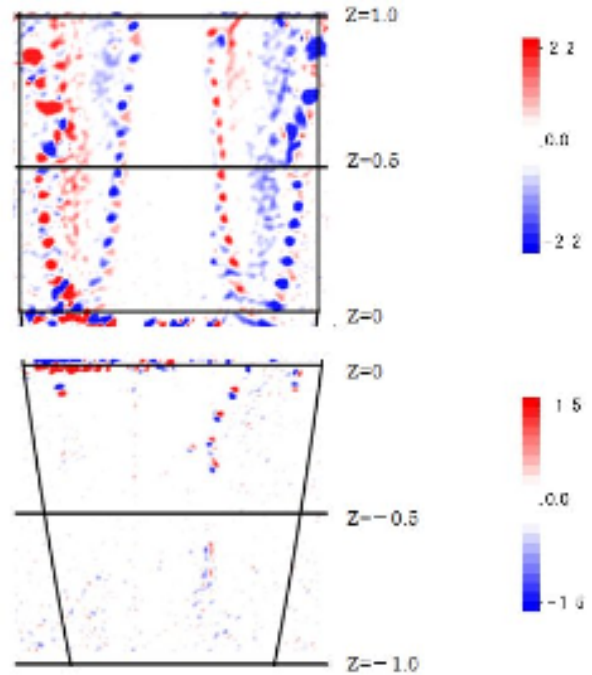


図 2 模型中心軸平行断面における渦度の等高線:
 $Re=14400, \alpha=40^\circ, Y/D=0.725$

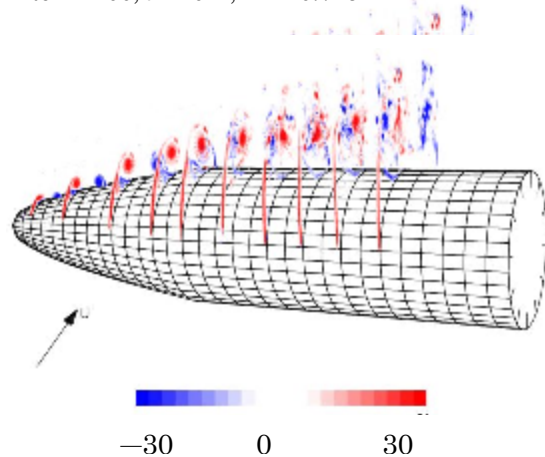


図 3 各垂直断面における渦度の等高線:
 $Re=7200, \alpha=50^\circ$ 渦ループは断面に平行でない。

-(c.w.)スピンの渦、青で counter-c.w の渦を表している。この断面を含め主渦の上端付近までの各断面で左右にそれぞれ「渦列」が見られた。これらスパン断面での渦列は図3のスパン断面での渦管と同一の渦管をとらえたものと考えることができる。これにより主渦を周り込んで渦管のループが長手方向にほぼ等間隔で並ぶ「渦ループ構造」が存在することを推測した。図1と同様に等温度線を各垂直断面において示したのが図3で、迎角は 50° である。ノーズをすぎると主渦上部のせん断層が図2のようには明確でなくなりドット状になる。後述するが、他の迎角でも同様に、渦ループはこれら軸垂直断面に平行でなく、ドットにはループ断面も混在していると思われる。

(2) 四塩化チタンによる可視化(静止画) PIV計測において推測した「渦ループ構造」を四塩化チタンから発生する二酸化チタンの白煙で可視化した。図4は模型の側面から撮影を行った可視化写真である。主渦の周りをまわる渦ループ群が何本もほぼ等間隔で並んでおり、前節で推測した「渦ループ構造」とよく一致する。このような渦構造は軸対称物体の後流には今まで報告されていないが、デルタ翼の後流に類似した渦構造が観察されている(Riley & Lowson¹⁾)。このような「渦ループ構造」の形成過程を明らかにするため、まず、渦ループの形成される位置を特定する目的で模型背面から撮影を行った。その可視化写真を図5に示す。模型表面近くが示されているが、図中右上に走る白い円弧=円柱前端との継ぎ目をはさむ、5個程度の黒いドットにつながる波うち(一次渦の外周上)はリップルと名づけられる。図中央右側には規則的な渦列が確認でき、それぞれの渦は渦ループが沿っているせん断層に近い位置のため、一次渦と二次渦の境界付近における速度差から Kelvin-Helmholtz 不安定性によって渦が形成されという推測が生じたが、ループに形が似た Folding は物体軸と平行になってしまいこの推測は採用しなかった。

(3) 四塩化チタンによる可視化(動画) 高速カメラを用い、「渦ループ構造」の時間変化を観察した0.008~0.0125秒ごとの撮影画像から以下が論じられる。渦ループの形成開始位置付近では数本の渦ループが間欠的に形成されていることが確認できた、これは静止画像と共通している。このとき、迎角および Re 数によらず渦ループが間欠的に形成される様子が観察された。また形成された渦ループは時間と共に下流に流されていくことが確認できた。またこの渦群は図1~3のように左右に一对形成されるが、左右とも間欠的に渦ループが形成され、形成のタイミングは左右で同時ではなく、周期性は見られない。

(4) 渦の生成 一次渦と二次渦は、互いに逆

回りのほぼ平行に並んだ渦対として考えられ、このような渦対の不安定には、渦対の対称的な蛇行を伴う Crow 不安定²⁾ が知られている。Crow 不安定では、渦ペア間隔= b なら軸方向の波長はおおよそ $8b$ で、本研究で観察された一次渦と二次渦の蛇行の軸方向波長と同程度である。

一方、Leweke ら³⁾は、Crow 不安定によって二つの渦対が最も近づいたときに、軸方向の波長よりも短い波長の別の不安定が生じることを報告している。本研究の場合には、一次渦と二次渦が Crow 不安定によって最も接近したときに波長の短い不安定が生じ、これが一次渦と二次渦の間に先行渦ループ群を生じさせている可能性がある。ここでは図5のリップル群より下流の渦群を後発渦ループ群とよび渦度は強く持続する。結局、一次渦の外側に成長したリップル部の流体が、一次渦のすぐ外側にある剥離剪断層外側の強い流れによって引っ張り上げられることによって渦ループが形成されると考えられる。

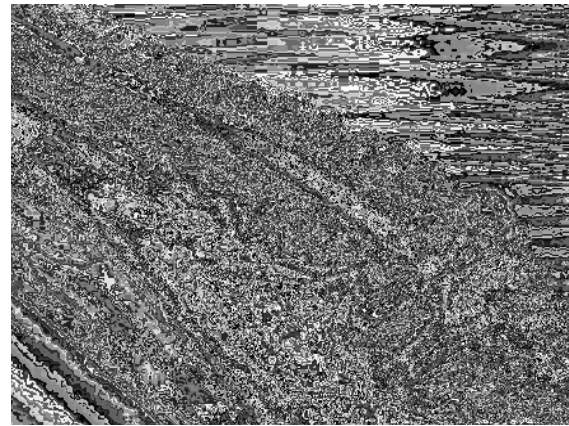


図4 渦ループ群の可視化 $Re = 7200, \alpha = 40^\circ$

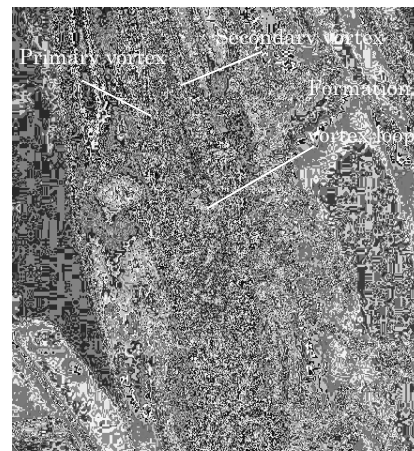


図5 渦ループ群の生成 $Re = 7200, \alpha = 40^\circ$

、一次渦に沿うリップルが渦ループの発生源

以上のPIV測定、可視化をまとめてみると図6のような描像になるといえる。赤色が“渦ループ”であり、黄色は主渦の中心部を表している。

(5) 数値計算 非圧縮NS方程式を擬似圧縮性法の非定常型で解き上述の実験とまず球頭円柱について渦度成分 ω_y を図7に比較してある。左側のPIV結果に見られる、等高線の折れ曲がりには二次剥離線からの剪断層が一次剥離線からの剪断層と直接干渉を開始する領域と思われる。図8に放物円柱の数値結果を示す。渦度 ω_y が球頭に比べ大きく、また主渦を回りこむほど持続する結果であり検討を要する。図8を抽出した数値結果をもとに描いた図9は物体軸直交平面での速度ベクトルをつらねたもので図1、図5と関連付けて描画している。(a)図ではある軸直交平面を例にとり渦ループに対応する朱色のラインが緑色部の裂け目から出発し上方に進んで主渦を回りこむことが観察できる。(b)図は(a)図を概略化したものである。

参考文献

- 1) Riley A. J and Lowson, M. V. *J. Fluid Mech.* Vol. 369, .49-89. 1998,
- 2) Crow S. C, *AIAA J*, Vol 8 , 2172-2179 .1970
- 3) Leweke, T and Williamson C H K, *J. Fluid Mech.*, Vol. 360 , pp. 85-119. 1998

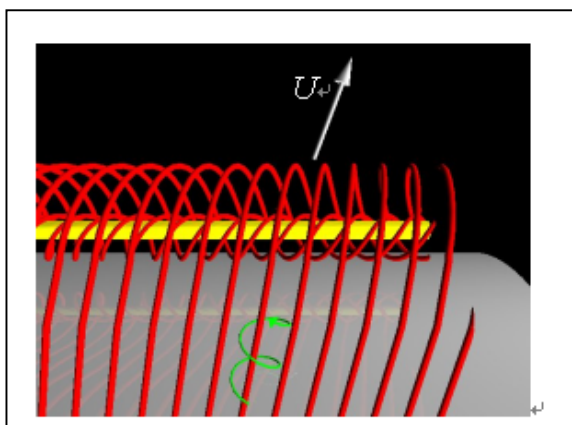


図6 渦ループ群のスケッチ 左がノーズ部、緑色巻きつきラインがclock-wise スピン。スパン方向断面=図2になる。(Re = 7200)

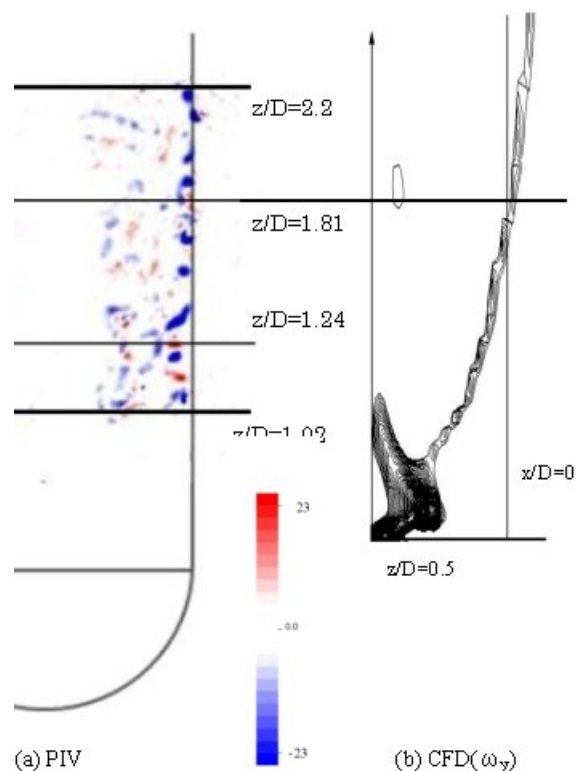


図7 PIV実験と数値計算:CFD比較 渦度成分 ω_y 球頭円柱 $\alpha = 40^\circ$ Re = 14400
: 実験 Re = 7200 : 数値計算

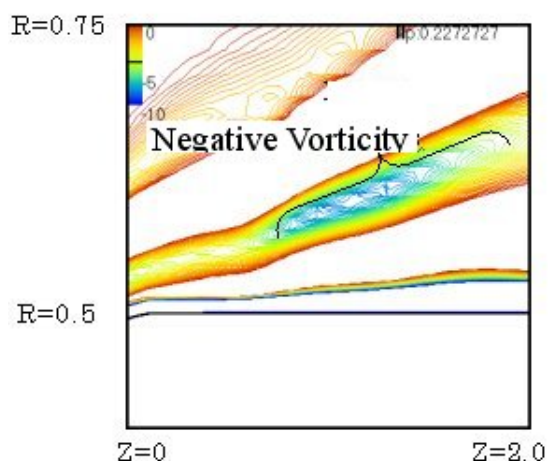
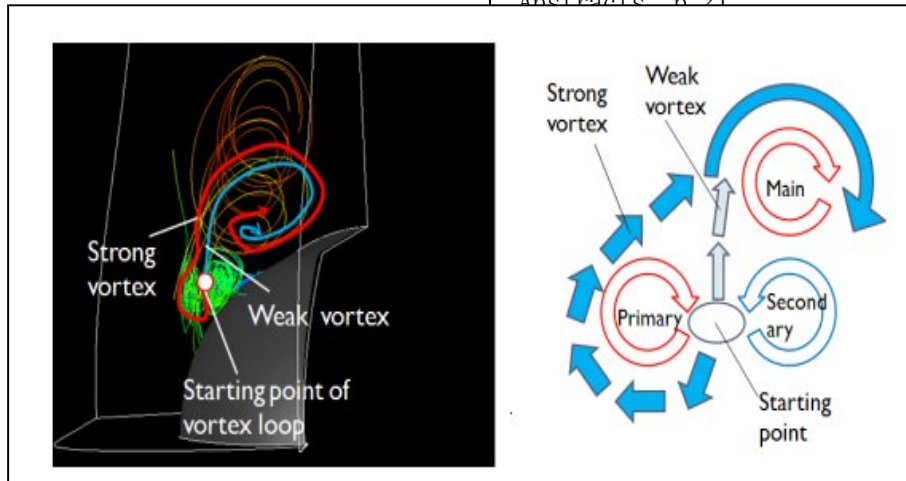


図8 数値計算 渦度成分 ω_y 放物円柱 $\alpha = 40^\circ$ Re = 14400



(a)

図9 数値計算 渦度 放物円柱 $\alpha = 40^\circ$ $Re = 14400$ 軸垂直断面でのベクトルを連ねた流線：A V S 表示

(b)

(5) Ryohei .Toyota, Fumihiko Mikami, Tadateru Ishide, and Nobuhide Nishikawa, Study of Sub-vortices and Statistical values in VorticalFlows behind a Paraboloidal-nose Cylinder Sixth International Sympo. Turbulence, Heat, Mass transfer, 2009.Proceedings., pp513–516; Begel House.

(6) 西川 進栄 ある渦の素性について シンポジウム航空宇宙工学における空気力学の挑戦, 2011、講演論文集, pp4-8(特別講演)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

(1) Fumihiko Mikami, Ryohei Toyota, and Nobuhide Nishikawa, Observation of the instability in the shear layer behind aparaboloidal-nose cylinder Journal of Physics:2010. Conference Series, 査読有 216 , 01213

[学会発表] (計 6 件)

(1) 三神 史彦, 中野 宏志, 西川 進栄 軸対称放物体後流における渦ループ群の PIV 計測日本航空宇宙学会 第 41 期年会講演会講演集 2010pp. 361-362 (JSASS-2010-1062)

(2) Nobuhide Nishikawa, Fumihiko Mikami, and Ryohei Toyota PIV Study of Sub-vortices behind Blunt-nose Cylinder Abstracts in 8th Euromech Fluid Mechanics Conference, 2010,pp S16-7

(3) Tadateru ISHIDE and Nobuhide NISHIKAWA Smoke Visualization and Data Analysis of Hot Wire Measurements in Separated Vortices over an Axisymmetric Paraboloid at High Angles of Attack 27th International Congress of the Aeronautical Sciences 2010,CD-ROM Proc. ICAS2010-P2.17 pp.1-9

(4) Fumihiko Mikami, Ryohei .Toyota, and Nobuhide Nishikawa, Observation of the instability in the shear layer behind aparaboloidal-nose cylinder Third Interna- tional Sympo. on Bifurcations

6. 研究組織

(1) 研究代表者 西川 進栄

(NISHIKAWA NOBUHIDE)

千葉大学大学院工学研究科・教授
研究者番号：80009753

(2) 研究分担者 三神 史彦

(MIKAMI FUMIHOKO)

千葉大学大学院工学研究科・准教授
研究者番号：40272348

(3) 連携研究者 なし