

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560778

研究課題名（和文） 二次元物体後流渦のストローハル数一定の謎解明

研究課題名（英文） Elucidation on constant Strouhal number behind 2-D bluff bodies

研究代表者

高木 正平 (TAKAGI SHOHEI)

室蘭工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：10358658

研究成果の概要（和文）：『二次元頓頭物体の後流渦列の発生起源』を実験から特定するため、対称形状の NACA0006 型翼模型の迎角調整で、空間発展型の対流不安定と時間発展型の絶対不安定が支配する流れ場を任意に設定できることに成功した。模型の迎角を増すと翼の上面側の後縁近傍は逆圧力勾配が強まり境界層が剥がれて、逆流の強さに応じて不安定の切り替わりが行われる。この不安定が切り替わった条件で、ある位置からある特定の周波数をもつ速度変動が急激に成長するのが観察された。この位置の近傍に絶対不安定点が存在する。

研究成果の概要（英文）：To identify the origin of Karman-vortex street behind 2-D bluff bodies, a new approach was established, which allows to alter the flow dominated by absolute instability from convective instability in subtle variation of the angle of attack of a small NACA0006 airfoil. This approach is based on the fact that the absolute instability is susceptible to the magnitude of separation near the trailing edge of airfoil. In the flow switched from convective to absolute instability at a certain angle of attack, velocity fluctuations abruptly growing with a selected frequency were observed at a certain location behind the airfoil. It could be concluded that the absolutely unstable region is located near this observed point.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| 2010 年度 | 2,100,000 | 630,000 | 2,730,000 |
| 2011 年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2012 年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学

1. 研究開始当初の背景

(1) 円柱下流には規則的なカルマン渦列が形成され、渦列周波数の音波も放射される。円柱の直径と主流速に基づくストローハル数はレイノルズ数の広い範囲でおよそ 0.2 である。一方、三角柱では流れ方向に投影された

長さを代表に取った時、ストローハル数は 0.2 にならないことは知られている。渦列周波数が同じ機構で決定されるなら、周波数を決定する代表長さで整理すれば、模型の断面形状に無関係なストローハル数が存在する可能性がある。

二次元柱体後方の渦列周波数決定に逆流領域の存在と流れの絶対不安定が関与していると指摘されている。複素特性曲線法による安定理論をこの絶対不安定問題に適用した場合、速度分布形状の違いは、分布の半値幅を代表長さに採ればストローハル数の変化に陽に表れないことが明らかにされた。この結果は速度分布の半値幅が極小値となる位置近傍に絶対不安定が発生していることを示唆し、同時にこの長さを代表長さに採れば物体断面形状に無関係に一定のストローハル数が得られる可能性を示している。

二次元柱体は一般に鈍頭である。それ故物体直後の流れには大きな逆流を伴う非線形性の強い領域が存在する。強い逆流を伴う流れ場でカルマン渦列の発生位置を特定することは難しい。二次元柱体の厚みを減じた場合でも、その後方に規則的なカルマン渦列が形成され、二次元柱体のそれと同等であることは申請者の研究で明らかにした。このように流れの変化が比較的穏やかに変化する流れ場ではカルマン渦列の発生源を特定できる可能性がある。

(2) 断面形状が三角や四角の柱体は鋭い角をもつために、剥離位置が固定される。それ故、角をもたない円柱と後流の渦構造に違いが生じるであろう。

2. 研究の目的

(1) 二次元の鈍頭柱体ではなく、速度分布形状が穏やかに変化する薄翼後流の流れ場を用いて、カルマン渦列の発生位置を実験から特定することである。

(2) 三角柱の渦列を可視化し、円柱のそれとの違いを明確にする。渦列の崩壊原因の1つとして注目されている流れの三次元性にも着目する。

3. 研究の方法

(1) 二次元柱体後流は、流れの非線形性が強いことから、対称二次元翼模型を用いる。迎角が小さい場合には模型直後には渦列は形成されない翼形状と実験レイノルズ数を設定する。その上で模型の迎角を増し、その後縁近傍に逆流領域を拡大させて、速度変動が急激に成長する領域の存在を確認する。成長振幅の外挿位置が絶対不安定の発生位置とみなすことができるであろう。

(2) 水槽を用いて三角柱後流の渦構造を水素気泡法で可視化する。また、模型の軸方向の流れの三次元性を排除するために石鹼膜による渦列の可視化も行う。また、実験に対応した二次元のCFDも実施し、実験の裏付けを行う。

4. 研究成果

(1) 主流速度を 4.3m/s に保ち NACA0006 翼模

型（最大厚 $t=2.4\text{mm}$ 、翼弦長 $C=40\text{mm}$ ）の迎角調整で、空間発展型の対流不安定と時間発展型の絶対不安定が支配する流れ場を任意に設定できた。模型の迎角を増すと翼の上面側の後縁近傍は逆圧力勾配が強まり境界層が剥がれて、逆流の強さに応じて不安定の切り替わりが行われる。図1はこの結果を明示したもので、迎角に対して翼後縁から $0.2C$ 下流において熱線風速計で計測した速度変動のスペクトル解析結果を比較している。迎角を 2.2° から 2.6° 変化させただけで約 280Hz の変動振幅は風洞の残留変動レベルである -76dB から -43dB 、すなわち振幅比で 45 倍、さらに迎角 0.1° 増やすと残留レベルから 630 倍も増幅したことになる。このような急激な増幅はこの観察位置近傍に絶対不安定点が存在していることを示唆している。

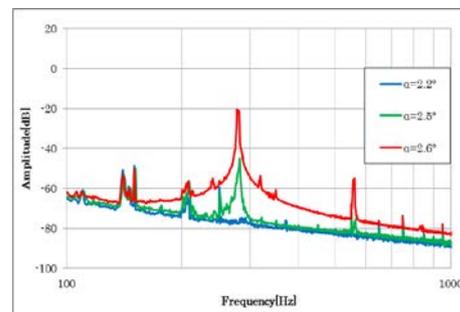


図1. 主流速度 4.3m/s、NACA0006 模型（最大厚 $t=2.4\text{mm}$ 、翼弦長 $C=40\text{mm}$ ）の後流における速度変動のスペクトル比較

(2) 図2は、三角柱を静止した水槽中を曳航し、その背後に形成される渦列を可視化したものである。円柱では規則的な渦列が形成される100程度のレイノルズ数の流れの条件で、三角柱では模型直後では規則的な渦列が形成されるものの、代表長さの5-10倍程度下流で突然渦列が崩壊し、その下流には模型直後の渦列より空間スケールの大きい渦列が形成されるのが観察された。同様の現象はほぼ同じレイノルズ数で、しかも低アスペクト比の平板模型後流でも報告され、模型軸方向の三次元性が渦崩壊に寄与していると指摘されている。そこで、流れの二次元性が確保

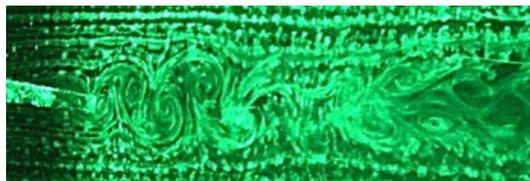


図2. 三角柱を静止した水槽中を曳航し、その背後を水素気泡法で可視化し、渦列の崩壊を捕らえた。

できる石鹼膜装置(Soap-film tunnel)を新た

に製作し、三角柱後流特性の可視化や非接触なレーザーダイオードと受光ダイオードを組み合わせた計測装置で調べた。具体的には、石鹼膜に直角に細いレーザー光を照射し、透過したレーザー光の透過光を計測した。渦がレーザー光を通過すると膜の厚みの変化に応じて輝度に変化し、渦の通過を捕らえることができる仕組みである。その結果を図3に示す。図3aと3bはそれぞれ円柱と三角柱の場合の透過光の時系列データを示し、円柱では規則的であるが、三角柱では渦のない時間帯が捕らえられている。以上の結果から、三角柱の渦列の消滅あるいは崩壊現象は、流れの三次元性というよりは、二次元後流の本質的な性質であることが明らかにされた。

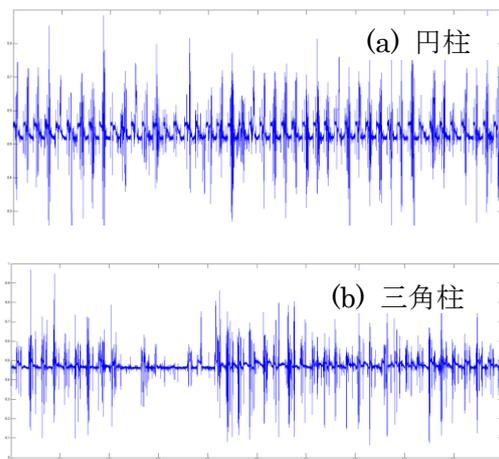


図 3. 渦列が形成された石鹼膜を透過したレーザー光の時系列変化の比較。

三角柱後流でみられる振動流の不規則性の究明を目的として、 Re 数が100から200程度の三角柱後流でみられる振動流の数値計算を行い、各位相に加えられた擾乱の安定解析を行った。レイノルズ数 $Re=180$ 前後の三角柱背後の流れ場では $Re=100$ の場合に比べて背後の逆流領域が拡大し、交番渦列の干渉が弱まるということが明確に示めされた。

そこで、平均流に乗せた particle で流線を描写したところ、図4aに示すように $Re=100$

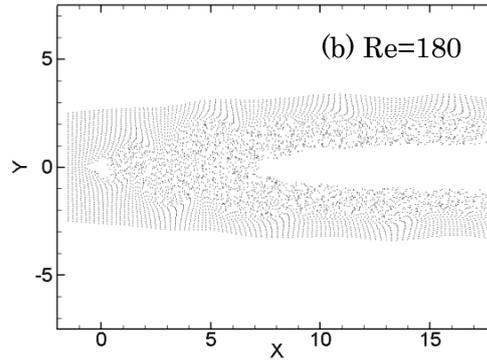
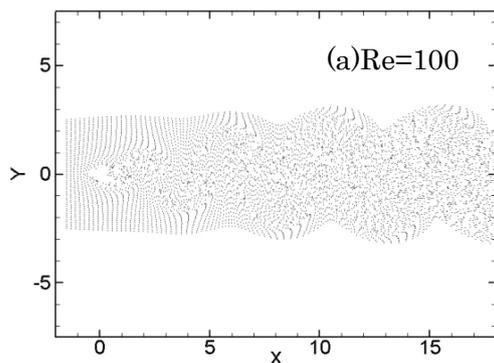


図 4. レイノルズ数が $Re=100$ と 180 における三角柱周りの流線の比較。

においては、三角柱後方に形成される大規模剥離領域を回り込んで流線が合流する、 $Re=180$ においては、剥離領域を回り込んだ流線は接近するものの再び離反していく結果となった。理由として、剥離領域内の圧力勾配が限界を超えて流れが曲げられなくなり後流にて合流しなくなったと思われる。

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 Itoh, N., Takagi, S. and Ikeda T., “Instability and frequency selection of the wake behind a flat plate”, Transactions of the Japan Society for Aeronautics and Space Sciences, Vol.55, No.6 (2012), pp.356-363.

[学会発表] (計7件)

① 高木正平、宮森康臣、大立目浩幸：低レイノルズ数における二次元物体後流の渦構造の可視化、日本航空宇宙学会北部支部2013年講演会、(3/14-15, 2013)、仙台。

② 手塚亜聖、高木正平；三角柱後流でみられる振動流の各位相に加えられた擾乱の安定解析、第50回飛行機シンポジウム、(11/5-7, 2012)、新潟。

③ 高木正平：「翼交流の不安定とカルマン渦周波数の決定機構」、日本機械会“噴流、後流およびはく離流れ”研究分科会、(6/29-6/30, 2012)、登別。

④ 高木正平、加藤大貴：「二次元翼後流における時間発展攪乱の観察と周波数選択機構」、第49回「乱流遷移の解明と制御」研究会、(9/22-9/23, 2011)、東京。

⑤ 鈴木幸人、柴田良弘、水島二郎、高木正平、浅井雅人：流れの安定性解析による空力騒音発生メカニズムの解明、第2回数学領域シンポジウム、(9/7, 2011)、東京。

⑥高木正平：「絶対不安定現象の観察」、早稲田大学理工学部、数理科学科セミナー(5/24/2011)、東京。

⑦Takashi Sakai and Shohei Takagi, “On the Strouhal number behind a series of symmetrical airfoils at low Reynolds number.”, The Thailand-Japan International Symposium in Industrial Engineering, Mechanical Engineering and Robotics 2010, (11/22-23, 2010), Chiang Mai, Thailand.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 正平 (TAKAGI SHOHEI)
室蘭工業大学・工学研究科・教授
研究者番号：10358658

(2) 研究分担者

()
研究者番号：

(3) 連携研究者

手塚 亜聖 (TEZUKA ASEI)
早稲田大学・理工学院・准教授
研究者番号：50361506