

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 23 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420846

研究課題名(和文) 二次元物体後流のカルマン渦列の制御

研究課題名(英文) Suppression of Karman vortex formation behind 2-D bluff bodies

研究代表者

高木 正平 (Takagi, Shohei)

首都大学東京・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：10358658

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：二次元鈍頭物体あるいは二次元翼下流には時間発展型の全体不安定に起因してカルマン渦列が形成されることから、渦列周波数は極めて選択的であることはよく知られている。翼模型のsuction側に翼弦長の1/40の太さの針金を翼後縁から翼弦の75%離れた位置に挿入することで、渦列は完全に抑制された。この抑制機構は、詳細な平均風速分布計測から針金挿入による局所流の偏向による実質的な迎角の減少であることが明らかとなった。さらに、円柱に代えて薄い平板の迎角を変化させることで、速度変動の時間成長率あるいは時間減衰率を計測することができた。

研究成果の概要(英文)：It is well known that since the regular-vortex street formed behind 2-D bluff bodies 2-D airfoil model is associated with the so-called global instability of temporal type, a vortex passing frequency is very monochromatic. A wire rod with a diameter of one-fortieth of the airfoil chord was immersed at the suction side of the model at a distance of 75% chord transversally from the model edge, resulting in complete suppression of the vortex formation. In order to unravel the vortex-suppression mechanism, elaborate measurements of mean velocity profiles making use of a hot-wire anemometer were performed with and without a control wire. Comparison of two cases shows that insertion of the wire deflects local flow angle and results in reduction of attack angle of the model. Along with this informative achievement, a flat plate in place of the wire was used to deflect the flow angle. Temporal growth rate and temporal attenuation rate associated with the global instability were measured.

研究分野：工学

キーワード：二次元後流 カルマン渦列 渦列抑制 全体不安定

1. 研究開始当初の背景

円柱や二次元鈍頭物体下流のカルマン渦列の周波数は極めて離散的(単一周波数)であり、このような周波数の選択機構として、後流の絶対不安定(時間発展型不安定)で速度変動は有限振幅に成長し、全体(大域とも言われる)不安定で渦列へと発展すると説明されている。この一連の不安定は、絶対・全体不安定と呼ばれているが、ここでは絶対不安定と略記する。また、比較的厚い二次元翼の後流にも規則的なカルマン渦列が成長する。後述の理論によればいずれの場合にも、絶対不安定発生条件の一つである逆流領域が存在し、その領域内で変動の群速度が零(変動周波数に対する波数微分)となる特異点で変動は時間成長し渦列へと発展すると説明している。実際には、鈍頭物体後方には大規模な逆流が生じるために絶対不安定の発生位置を特定することは難しいが、二次元翼の後流を用いればその規模は小さく、後述するように流れの非平行性も穏やかで絶対不安定の特性を調べるには好都合である。

非平行性が穏やかに変化する後流における絶対不安定に関して、Huerre を中心とした研究グループは非線形理論と直接数値解析

(Phys.Fluids,10, 1998,2433-35, J.FM,435, 2001,145-74, J.FM,438, 2002,407-17)を行い、絶対不安定から有限振幅の渦列への空間発展を調べた。この空間発展の非線形成長は、対流不安定から絶対不安定にスイッチする位置における絶対不安定特性に支配されていることが分かった。申請者とAsai ら(2011)は、断面形が4桁のNACA 軸対称模型を磁力支持装置で空中浮遊させ、熱線風速計並びにPIV (Particle Image Velocimeter)計測から模型後流の安定性を詳細に調べ、非粘性の線形安定解析と比較した。絶対不安定領域の絞り込みと渦列の成長は、絶対不安定の開始点近傍にあることを明らかにした。この実験結果は、前記理論と数値解析の結果とほぼ整合していることが確認された。しかし、軸対称後流は二次元対称のそれに比べて安定であることから、模型を厚くして後縁境界層の剥離を大きくすることで絶対不安定の発現を促進したため、剥離剪断層からは広帯域の速度変動も成長するために、絶対不安定の初期過程の同定には困難を極めた。

申請者は、流れの非平行性低減と逆流領域の小規模化のために、比較的薄翼の二次元対称 NACA 模型を用い、実験レイノルズ数も可能な限り低く抑えることで、渦列形成までの長い領域を確保した。その最新の研究成果によると、模型後縁近傍の剥離剪断層からの変動成長の抑制で、background レベルを風洞気流の残留変動レベルまで低減することによって不安定に起因する速度変動計測は主流速度の0.01%まで可能となり、絶対不安定周波数成分の振幅計測からその発生位置を特定できつつある。微小増幅変動が計測できたことにより、発生位置近傍領域における振幅

が小さい変動の挙動がより明らかとなってきた。すなわち、後流は全体不安定が支配している訳であるから、流れ場全域に亘って周波数は一定であると期待されるが、実際には計測位置で変動周波数がシフトするだけでなく、その振幅の飛びも観測された。このような現象は文献調査などから熱線プローブの侵襲による影響と結論付けできた。そこで、現有知識で可能な限り流れを乱さないように熱線プローブを製作し、しかも影響が最小となる挿入方向を見出した。しかし、影響は格段に低減できたものの、影響を皆無とすることはできなかった(下図1と2参照)。プローブの影響については先の調査から、円柱後流のカルマン円柱渦列計測を行った Kovasznay の論文(1949)で最初に指摘されており、その後 Berger ら(1967)の発展的研究があることも分かった。ここで見逃してはならないことは、この実験結果は非常に重要な示唆を含蓄していることである。具体的には、熱線プローブが変動周波数シフトや変動振幅の飛びの原因になっている訳であるから、絶対不安定を直接人工制御できる可能性が示唆される。すなわち、熱線プローブに代えて何らかの二次元的な細い柱体を流れに挿入することで、絶対不安定に起因する変動の成長を低減ないしは抑制できる可能性が推察されることである。事実、予備試験によれば、翼中心線からコード長以上離れた位置にコード長の1/40程度の細い円柱を配置しただけで変動の成長は完全に抑制できた。本研究の提案は、二次元対称 NACA 模型の後流のカルマン渦列の成長を制御用の細い柱体で、抑制することである。その抑制が可能になれば、後流における絶対不安定に対して、非侵襲プローブによる基本流並びに増幅変動計測から絶対不安定の発生条件を極めて明確に抽出することができるであろう。さらに、制御円柱等を用いて渦列抑制のメカニズムを解明できると期待される。

2. 研究の目的

本提案では予備実験の結果をさらに発展させる。

(1) 本課題の前提となるカルマン渦列の形成条件を明確にする。

(2) 効果的にカルマン渦列の成長を抑制できる条件(針金の位置や最小直径)を抽出する。次いでこの条件の下で、

(3) 熱線風速計と非侵襲計測法であるレーザードップラー流速計を用いて平均速度および変動の振幅分布を計測する。カルマン渦列が抑制される場合とされない場合を比較することで、針金の抑制機構を解明する。また、本課題の範囲には含まれないが、

(4) カルマン渦列の抑制機構が解明できれば、抑制条件を ON/OFF 制御することで渦列の抑制と形成を人工制御できるはずである。この世界初の制御ができれば、変動の時間増幅率あるいは時間減衰率の計測が可能とな

り、全体不安定(global instability)の理解が格段に進むことが期待される。

3. 研究の方法

(1) 模型の選定と実験レイノルズ数の設定

二次元鈍頭物体後流直後は、強い逆流を伴い流れの非線形性が強くなることから、後流の非線形性が弱い対称二次元翼型を用いる。そうすることで、主流に対する迎角が浅い場合には模型直後には渦列が形成されない対流型不安定が支配する条件設定が可能であり、ある迎角を超えると対流不安定から全体不安定にシフトする条件を設定できる。この条件設定には実験レイノルズ数が関与するので、高精度な計測データ取得のために主流速度を可能な限り低く抑える。

(2) 風洞の選定

対数特異点を同定するにあたって、微小な変動を計測する必要があることから、可能な限り気流特性（気流の一様性、変動レベル）が良質な風洞で実験を行う。図1は風洞測定部の平面図で NACA0006 模型と制御用針金の設置概要を示す。

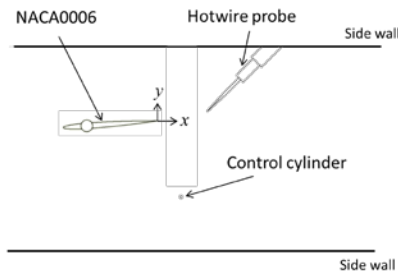


図1. 模型配置した測定部平面図

4. 研究成果

(1) 実験条件の設定とカルマン渦列の観察

NACA 4 桁シリーズの翼型は後縁近傍の圧力分布は逆勾配のため剥離流を伴う。この特性と主流に対する迎角を調整することで、後流の全体不安定の必要条件である逆流の強さを自由に設定できる。そこで模型の厚みを 2.4mm に固定して翼弦が異なる模型を数種準備した。熱線風速計を用いた平均速度や速度変動の計測精度を高めるために、主流速度の設定は重要である。風速校正の容易さや熱線プローブ振動の回避を考慮して、主流速度を 4-5m/s の範囲とした。この条件下では NACA 0006 模型が最適であった。図2は主流速度 4.2m/s において 3.65° と 3.9° の迎角で模型後縁から 16mm 下流で観察される速度変動のパワースペクトルを比較したものである。わずかに迎角が 0.25° の違いで変動の特性が劇的な変化を示している。図2a は変動の振幅も小さく帯域も広いが、図2b の変動の周波数は単一でその選択性は極めて高くしかも変動の実効値も主流の 10%以上に達していることから、前者の後流は対流型不安定、後者は全体不安定が支配的であると考えられる。注目すべきことは、中心周波数は両者 345Hz で、模型の最大厚みで作る Strouhal 数は 0.2

である。後述するように、後者の後流には規則的なカルマン渦列が形成されている。

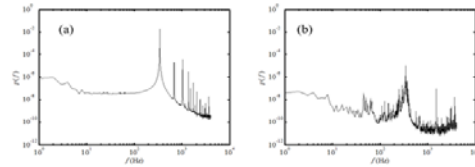


図2. 迎角 3.9° と 3.65° 後流の変動のパワースペクトル比較

(2) 対数特異点の同定

前記の全体不安定あるいは対流不安定が支配的している後流において、各 X 位置で速度変動の最大値の流れ方向分布を図3に示す。模型迎角が 3.65° の場合に比べて 3.9° では変動は模型の後縁近傍から急激に成長していることが分かる。複素特性理論によればこの成長開始位置は逆流領域に位置する対数特異点であり、図3からおよそ $X/c=0.06$ (2.4mm) と読み取れる。このように全体不安定の特異点を同定したのは本研究が初めてである。今後理論の発展を待って実験結果と詳細検討が必要である。

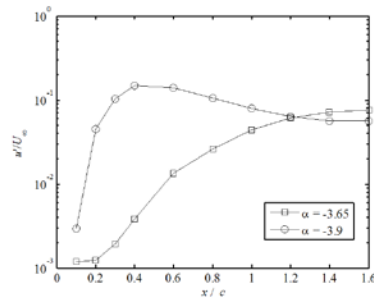


図3. 迎角 3.9° と 3.65° 後流における変動実効値の流れ方向変化

(3) カルマン渦列の抑制と機構の解明

模型迎角が 3.8° を超すと離散的な周波数を持つ速度変動が成長し始める。そこで、迎角は 3.9° に固定し、直径 1mm の針金を用いて後流に形成される Karman 渦列の抑制実験を行った。針金は、模型後縁から下流位置 $X=0$ と 10mm に対して、主流と直角方向には $Y=\pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 33$ mm に挿入できるよう天井と床には事前に穴を開けておいた。 $(X, Y)=(10\text{mm}, -20\text{mm})$ あるいは $(X, Y)=(10\text{mm}, -30\text{mm})$ に挿入したところいずれも渦列は抑制された。 $(X, Y)=(10\text{mm}, -30\text{mm})$ に針金を挿入した場合と挿入しない場合について、流れを煙線で可視化した結果を図4に示す。針金の挿入で渦列が完全に消滅していることが分かる。

引き続き細い針金の渦列抑止機構の解明に向けた実験を実施した。渦列が形成された模型後流の平均速度と変動強度分布に対して、渦列が抑制された後流のそれらと詳細に比較した。その結果、渦列が抑制された後流

の速度分布は、針金を挿入しない流れ場の模型迎角が 3.65° における速度分布とほぼ相似であることが分かった。この結果は、針金を挿入すると模型の実質迎角が 0.25° 減少し、逆流領域が減少して後流は全体不安定に対して亜臨界条件となることを示唆している。複素速度ポテンシャル理論を用いて針金の挿入による模型後縁近傍における平均流の方向変化は 0.02° であり、実験結果と一行以上のずれがある。しかし、針金後流の渦列を捕えた可視化画像から渦列の幅は針金直径の 10 程度であることから針金挿入による流れの偏向角は妥当であることが示唆される。

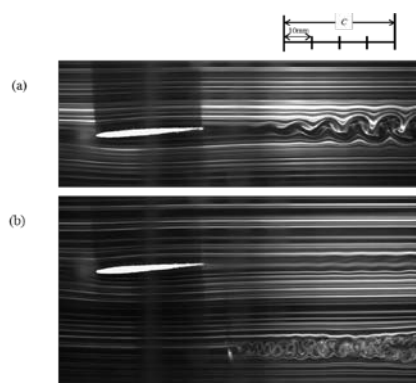


図4. 迎角 3.9° において、(a) 針金挿入なし (b) 針金挿入あり。

(4) 時間増幅率の計測

針金による抑制機構が判明したことから、針金の代わりに薄い平板を用いてその迎角をある角度に設定すれば流れは偏向しカルマン渦列の成長あるいは抑制が人工制御できることを示唆している。具体的には、最初薄板に迎角を持たせカルマン渦列を抑制した状態から薄板を水平に戻せば渦列は成長形成され、薄板に逆の条件を課すことで渦列を抑制することが自由にできた。薄板の動きに同期した速度変動の時系列データから時間成長率あるいは減衰率 α (図5) が求まり、今後、理論と比較するための貴重な実験データが得られた。

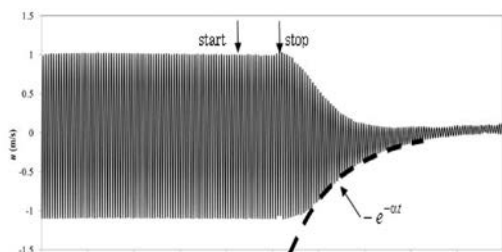


図5. 薄板の動きに同期した速度変動の時系列データから、減衰率 α が求まる。

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)

Takagi, S., Konishi, Y., Obayashi, S. & Asai, M.:

Control of Karman Vortex Street behind a Thin Airfoil at Low Reynolds Number, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, Vol.4 No.3, 2016.

[学会発表] (計 3 件)

1. Takagi, S., Konishi, Y., Itoh, N., Asai, M. and Obayashi, S.:

Detection of a logarithmic singular point behind an airfoil model at low Reynolds numbers, International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 8/22-8/26, 2016, Montreal (Canada).

2. Takagi, S., Konishi, Y. and Obayashi, S.:

Control of Karman vortex street behind a thin airfoil at low Reynolds number, International Conference of Fluid Dynamics, 10/27-10/29, 2015, 仙台国際センター (宮城県仙台市).

3. Takagi, S. and Miyamori, Y.:

Observation of Karman vortex street on flowing soap film behind cylinders at low Reynolds numbers, 13th Asian Flow Visualization, 6/22-6/26, 2015, Novosibirsk (Russia).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織
(1) 研究代表者

高木 正平 (TAKAGI, SHOHEI)
首都大学東京、システムデザイン研究科、
特任教授
研究者番号：10358658

(2) 研究分担者

浅井 雅人 (ASAI, MASAHIRO)
首都大学東京、システムデザイン研究科
教授
研究者番号：00117988

(3) 研究分担者

野呂 秀太 (NORO, SHUTA)
仙台高等専門学校、機械システム工学科
助教
研究者番号：30709192

(4) 連携研究者

小西 康郁 (KONISHI, YASUFUMI)
東北大学 流体科学研究所
研究支援者
研究者番号：20552540