

複雑断面をもつ翼型の動的空力特性に関する数値解析

濱崎 勝俊¹⁾, 鈴木 宏二郎²⁾

¹⁾ 東京大学 大学院 ²⁾ 東京大学 新領域創成科学研究科

Numerical Analysis on Unsteady Aerodynamic Characteristics of Corrugated Wing Section

by

Katsutoshi HAMASAKI¹⁾ and Kojiro SUZUKI²⁾

¹⁾ Graduate Student, the University of Tokyo, ²⁾ Graduate School of Frontier Sciences, the University of Tokyo

ABSTRACT

It is important to realize the unsteady aerodynamics of the wing in relation to the flow field around it in low Reynolds number flow. In this study, the numerical analysis of the two-dimensional flow around a corrugated wing section at Reynolds number 10,000 is carried out. The calculated lift coefficient shows unsteady behavior, depending on the angle of attack. In the case of zero angle of attack, the calculated lift coefficient shows almost steady behavior as well as periodic oscillation. However, the strong unsteadiness is shown in the cases of large angle of attack. The chaotic feature of its unsteadiness is analyzed by the spectral analysis and the attractor reconstruction technique using the time-delay coordinate, as well as the phase-plane plot. As a result, the spectral distributions in the cases of large angle of attack are closely similar to the distribution of the Brownian noise. The observation of the flow field indicates that such feature is closely related to the periodic or non-periodic motion of the separated vortices over the corrugated wing section. More advanced, essential realization of the obtained spectral distributions similar to of the Brownian noise should be clarified with additional researches.

1. 序論

近年、災害救助や惑星探査等の需要から、レイノルズ数（以下 Re 数）が $1.0 \times 10^4 \sim 1.0 \times 10^5$ 程度の気流中で飛行する小型航空機が注目されている。またそれによって、低 Re 数域における翼の空力特性および翼周りの流れに関する研究が盛んに行われている。このような低 Re 数域においては、翼表面上に層流剥離や剥離泡等を含む非定常流れが発生し、翼が低 Re 数特有の空力特性低下を示すことが知られている¹⁾。この特性改善のために、例えば DBD プラズマアクチュエータによる流れ制御²⁾が研究されている。

低 Re 数域における翼の研究では、翼周りの流れ場および空力特性の非定常性に注目することが重要と考えられる。そこで本研究では、このような非定常性が強く見られると予想される複雑形状をもった翼に注目した。このような翼の代表例としては、低 Re 数域において高い飛行性能を示すとして注目されている昆虫の翅が挙げられる。以降、昆虫の翅のように折れ曲がりをもつ翼をコルゲート翼と呼ぶ。コルゲート翼については、羽ばたき翼としての応用と固定翼としての応用の両面から研究されている³⁾。例えば文献⁴⁾においては、トンボの翅を模擬したコルゲート翼と基本翼を用いた風洞実験が実施され、空力係数の時間平均値による議論が行われた。本研究ではこの先行研究を参考に、コルゲート翼型周りの 2 次元流れについて数値解析を行った。また、その結果を基に、翼型周りの流れ場と翼型の空力特性の非定常性について議論を行った。なお数値解析によって、翼型が大迎角をとる場合、特に揚力係数が強い非定常性を示すことが明らかとなったので、本論文では揚力係数のみを取り扱うこととする。

2. 解析手法

2.1. 対象翼型

本研究において解析対象とした翼型形状を図 1 に示す。一般的に昆虫の翅には翅脈が複雑に分布しているため、翅全体の形状を考慮した 3 次元流れの数値解析は計算負荷が大きい。そのため本研究では、特に $0.7l_{rel}$ 位置における翅断面を取り上げ、2 次元解析を行うこととした。なお l_{rel} は片翅

のスパン長さを意味する。翼型寸法については、先行研究⁴⁾で用いられた実験模型を参考にした。

表 1 に、本研究で用いた Re 数、一様流速度、大気密度および粘性係数、迎角、代表値を示す。 Re 数については先行研究⁴⁾の実験条件と同じく 10,000 とし、一様流の各値は地球大気のパラメータから計算した。迎角については、流れ場が強い非定常性を示すことを期待した $\pm 20^\circ$ と、それら比較対象のための 0° 、計 3 種を採用した。

次節以降、特に断りのない変数は全て無次元化された量とすることに注意されたい。例えば図 2 における c は無次元化された翼弦長、すなわち $c = 1.0$ を意味する。

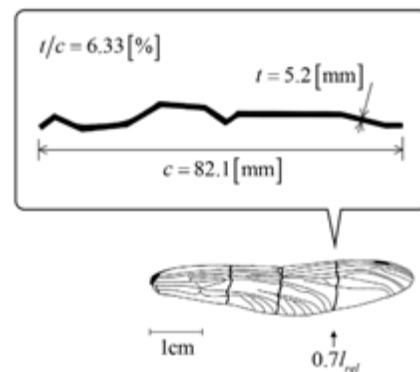


図 1 解析対象の翼型⁴⁾

表 1 計算条件

レイノルズ数 Re	1.0×10^4
一様流速度 u_0	1.84 [m/s]
密度 ρ_0	1.21 [kg/m ³]
粘性係数 μ_0	1.82×10^{-5} [Pa · s]
迎角 α	-20, 0, 20 [deg]
代表長さ L	82.1 [mm] (= 翼弦長 c)
代表速度 U	1.84 [m/s] (= 一様流速度 u_0)

2.2. 流れ解析

支配方程式には、無次元化および一般座標化された非保存形の非圧縮性 2 次元 Navier-Stokes 方程式と連続の式を用いた。無次元化のための基準量には、表 1 の代表値を用いた。 $t, p, (x, y), (\xi, \eta)$ はそれぞれ無次元時間、圧力、デカルト座標成分、一般座標成分を意味する。 (u, v) はデカルト座標系における速度成分、 J は座標変換のためのヤコビアンである。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \Delta_{x,y} u \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \Delta_{x,y} v$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{J} \left(y_\eta \frac{\partial}{\partial \xi} - y_\xi \frac{\partial}{\partial \eta} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{J} \left(-x_\eta \frac{\partial}{\partial \xi} + x_\xi \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \tag{3}$$

$$J = \begin{vmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{vmatrix}$$

これらの支配方程式に対して、表 2 に示す解析手法を用いた。非圧縮性流体の数値解析では、レギュラー格子を用いるとチェッカーボード状の数値振動が発生しやすいという問題がある。これを回避するためにスタガード格子やコロケート格子がよく用いられる。しかし本研究のようにデカルト座標系ではなく、一般座標系を用いて Navier-Stokes 方程式を解く場合、スタガード格子やコロケート格子を用いると定式化が煩雑となり、計算負荷の増大が懸念される。本研究においても、下流側の遠方圧力場で弱い数値振動が見られた。しかし空力特性の変動に対して支配的ではなく、この問題は無視できると判断した。そのため本研究では、レギュラー格子を用いている。

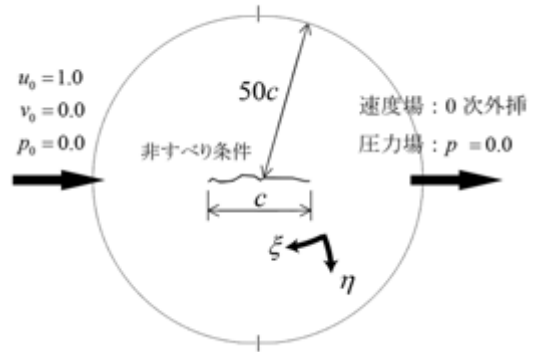
図 2 に計算領域、各境界条件、翼型近傍の格子点分布を示す。翼表面上では非すべり境界条件を用いた。外側境界では、上流側において速度および圧力に一樣流条件を用いた。下流側において速度に 0 次外挿、圧力場に一樣流条件を適用した。計算格子には、双曲型方程式によって生成した $\xi \times \eta = 474 \times 201$ 点の格子点からなる O 型格子を用いた。ここでは、 ξ は翼表面方向、 η は放射方向と定義した。最小格子点間隔は、翼表面上における η 方向の $1.0 \times 10^{-4} c$ とした。外側境界は、その全域において翼型からの距離が約 $50c$ となるように格子生成を行った。

表 2 解析手法

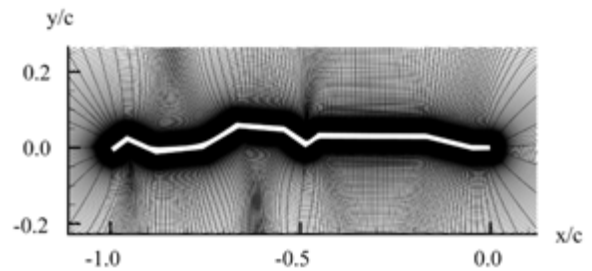
支配方程式	非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 連続の式
数値解法	MAC 法 ⁵⁾
圧力場	SOR 法 空間差分：中心差分
速度場	時間進行：Euler 陰解法 粘性項：中心差分 移流項：K-K スキーム ⁶⁾
計算格子	O 型：474 × 201 点
物理量配置	レギュラー格子配置
乱流モデル	なし
境界条件	(図 2 に示す)
空力係数	(式(4)を用いる)

揚力係数 C_l の計算にあたっては式(4)を用いた。ここで $p, \bar{\tau}, \bar{n}$ はそれぞれ圧力、粘性応力テンソル、翼型表面上の微小線素 ds における単位法線ベクトルを表す。また添え字の $0, y$ はそれぞれ、一樣流における値、デカルト座標系上のベクトルの y 方向成分を意味する。

$$C_l = \int_s \left[-(p - p_0) n_y + \bar{\tau}_y \cdot \bar{n} \right] ds \tag{4}$$



(a) 計算領域と各境界条件



(b) 翼型近傍の格子点分布

図 2 計算格子

2.3. 空力特性の非定常性解析

序論で述べたように、本論文では揚力係数の非定常性、すなわち時間変動を扱う。時系列データの解析手法としては、高速フーリエ変換(FFT)によるスペクトル解析、時間遅れ座標系 $[f(t), f(t+\sigma), f(t+2\sigma)]$ を用いた位相点の軌道解析(アトラクタ再構成)を行った。 $f(t)$ は任意の時系列データ、 σ は時間遅れ値を意味する。アトラクタ再構成は、特にノイズを含むような現実の計測データから元の力学系およびその特性を考察する際に有用な手法とされる。時系列データと再構成されたアトラクタの対応を図 3 に示す。

次に時間遅れ値 σ に対するアトラクタ描像の変化について述べる。一般に σ が非常に小さい時、各軸の値は強い相関を持ち、アトラクタは立体構造を失い直線状になる。 σ が大きい時は各軸の値の相関が弱くなり、再構成されたアトラクタは元の時系列データの特性を示す描像としては不適切となる。図 4 は、周期 40ms の正弦波に対するアトラクタの再構成例である。実際には 40ms より大きい時間遅れ値を用いてもリミットサイクルを得ることはできるが、そのようなアトラクタから元の波形の周期 40ms という情報は得られない。このように、時間遅れ値 σ には、元の時系列データの特性を適切に図示できる上下限が存在する。特に上限値については、信号処理におけるサンプリング定理およびナイキスト周波数の論理に類似していると考えられる。なお、 σ の最適値に関する統一的な決定法は未だ議論の対象とされており⁷⁾、本論文においては言及しないものとする。

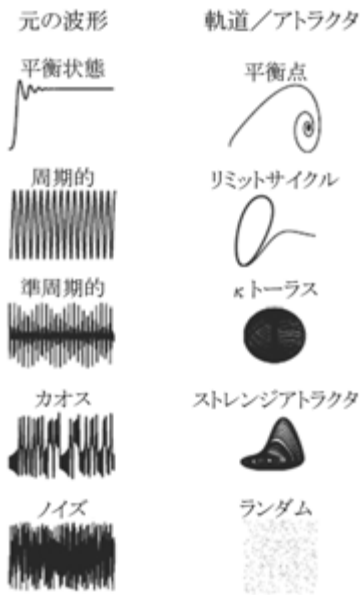


図 3 時系列データとアトラクタの対応

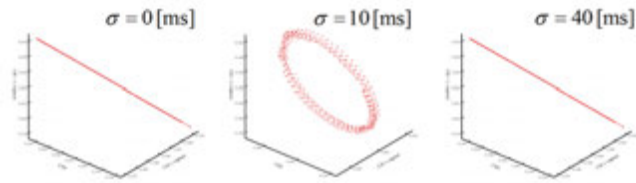


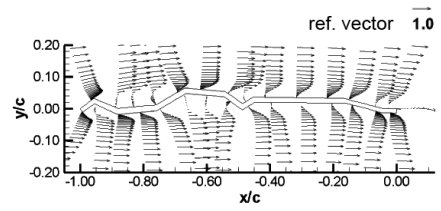
図 4 時間遅れ値によるアトラクタの変化例 (元の波形: 周期 40ms の正弦波)

3. 結果および考察

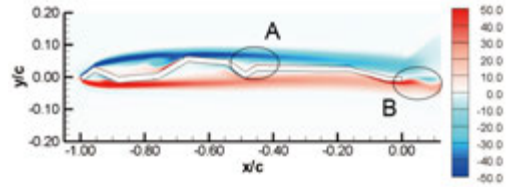
3.1. 迎角 0° の場合

図 5 に、翼型近傍流れの瞬時の様子を示す。この図から、流れは翼型凸部において剥離および再付着し、その間の凹部において剥離領域が形成されていることが分かる。図中の領域 A において、渦度分布が約 0.80ms の周期をもって変動する様子が目視によって確認された。また領域 B においては約 0.68ms の周期をもった渦度の変動が確認された。これらはそれぞれ周波数で 1.25kHz, 1.48kHz に相当する。

図 6(a) に、揚力係数 C_l の時間変化を示す。この図から、迎角 0° における C_l の時間変化は周期振動に収束することが分かる。この周期振動の区間に対する FFT の結果を図 6(b) に示す。これによればピークは約 1.25kHz にあることが分かり、領域 A における流れの変動が C_l の変動に対して支配的であると考えられる。領域 B の変動に対応する約 1.48kHz のピークは見られなかったが、異なるいくつかの周波数値においてピークが現れた。図 6(c) は、 C_l の時間履歴から再構成したアトラクタを示す。スペクトル解析によって得られたピーク値 1.25kHz から、時間遅れ値を $\sigma = 0.2\text{ms}$ としてアトラクタ再構成を行った。この図によれば、軌道はほぼ円に収束していることが分かる。これは図 3 におけるリミットサイクルに類似した構造であり、 C_l の時間変化が定常振動に近いことを意味している。空力特性が時間的に安定している理由として、渦度が生成されて拡散するまでに移動する距離が翼型凹部のサイズとおおよそ一致していることが考えられる。すなわち翼型凹部は流れ場として閉じた状態にあり、内部流れは剥離領域として安定していると予想される。

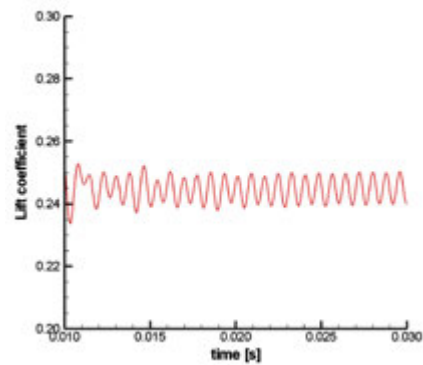


(a) 速度ベクトル

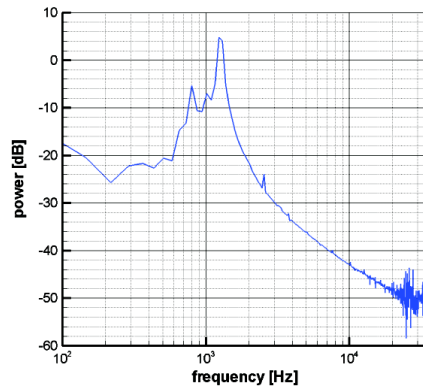


(b) 渦度分布

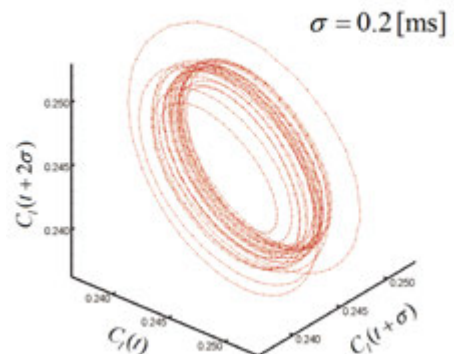
図 5 迎角 0° での瞬時の流れ場の様子



(a) 時間履歴



(b) スペクトル分布



(c) 再構成されたアトラクタ

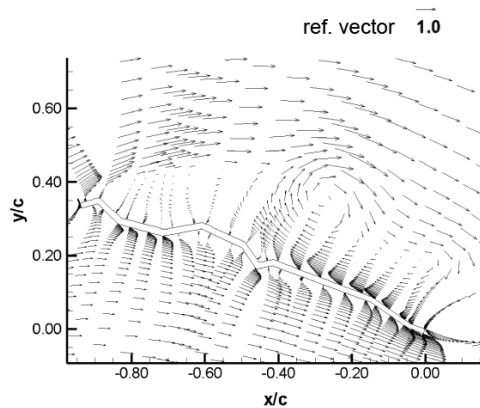
図 6 迎角 0° での C_l の時間変動

3.2. 迎角 20° の場合

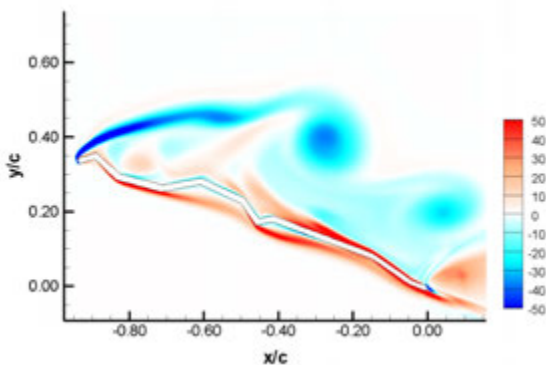
図 7 に、翼型近傍の瞬時の流れ場を示す。この図から、流れは翼型の前縁近傍において剥離し、翼型背後に大きな剥離領域が形成されていることが分かる。またこの領域では、剥離点から発生する渦度と後縁における流れの回り込みから発生する渦度の連成と考えられる、様々な規模の複数の渦度が確認され、非常に複雑な流れ場が形成されていることが明らかとなった。

図 8(a) に C_l の時間変化を示す。また、この時系列データに対するスペクトル解析の結果を図 8(b) に示す。この図によれば、約 90Hz にピークのようなものが見られるが、スペクトルは連続スペクトルの様相を示している。スペクトル分布は約 -6dB/octave の傾きをもち、これはブラウンノイズの特性と同様である。このノイズは、現象がブラウン運動に類似した挙動を示すときに見られるとされている。本研究で示した流れ場とブラウン運動の類似性については、今後より詳細な解析を行う必要がある。

約 90Hz 成分のゲイン値が最大となったことを考慮して、時間遅れ値 $\sigma = 2.7\text{ms}$ としてアトラクタ再構成を行った。その結果を図 8(c) に示す。これはストレンジアトラクタに分類される構造と考えられるが、この図から流れ場の性質を推定するには至らなかった。今後 σ 値の設定に関して別の指針⁷⁾を導入し、アトラクタ再構築を試みる必要がある。

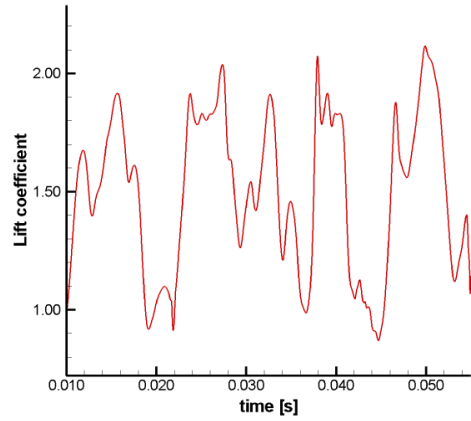


(a) 速度ベクトル

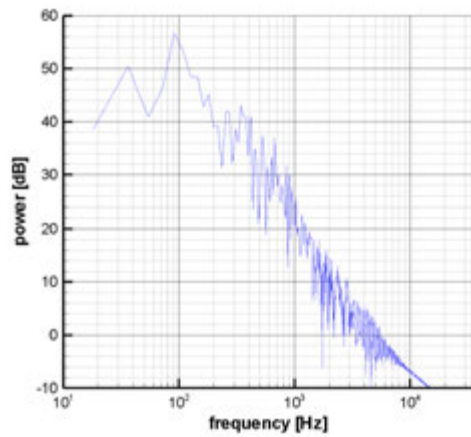


(b) 渦度分布

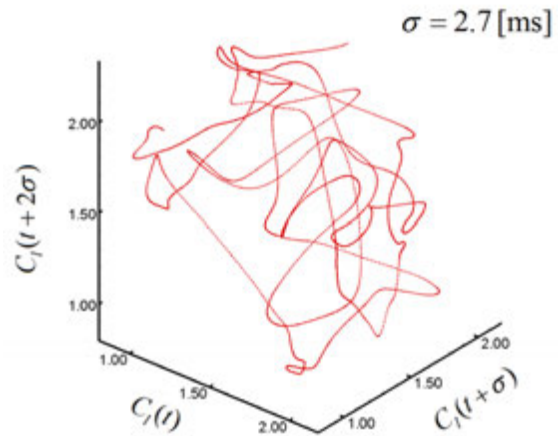
図 7 迎角 20° での瞬時の流れ場の様子



(a) 時間履歴



(b) スペクトル分布



(c) 再構成されたアトラクタ

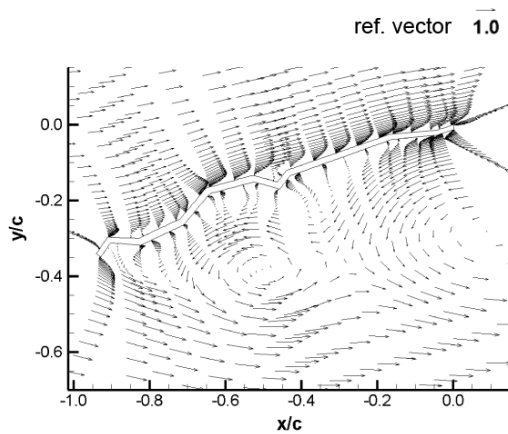
図 8 迎角 20° での C_l の時間変動

3.3. 迎角 -20° の場合

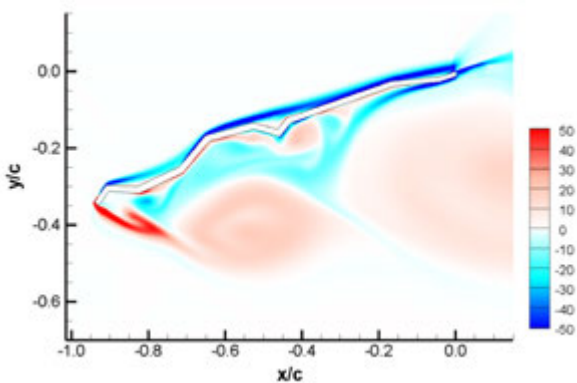
図 9 に翼型周りの瞬時の流れ場, 図 10 に C_l の時間履歴, スペクトル解析の結果, および再構成されたアトラクタを示す. 迎角 20° の場合と同様, 流れは前縁近傍で剥離し, 翼背後で様々なスケールの渦度が連成した大きな剥離領域を形成していることが明らかとなった.

図 10(b)によれば, C_l の時間変化は約 -6dB/octave の傾きを持つ連続スペクトル分布をもつことが分かる. すなわち迎角 20° の場合と同様に, 流れ場はブラウン運動に類似した挙動を示すと予想される. これについては, 今後より詳細な流れ場の考察を行う必要がある.

図 10(c)に示したスペクトル分布によれば, ゲインが最大となる周波数は約 109Hz であるので, 本論文においては, 時間遅れ値 $\sigma = 2.3\text{ms}$ としてアトラクタ再構成を行った. その結果を図 10(c)に示す. 迎角 20° の場合と同様に, ストレージアトラクタに分類される構造と考えられるが, この図から流れ場の性質を推定するには至らなかった. これに関しても別の指針⁷⁾に基づいて σ 値を決定し, アトラクタ再構築を試みる必要がある.

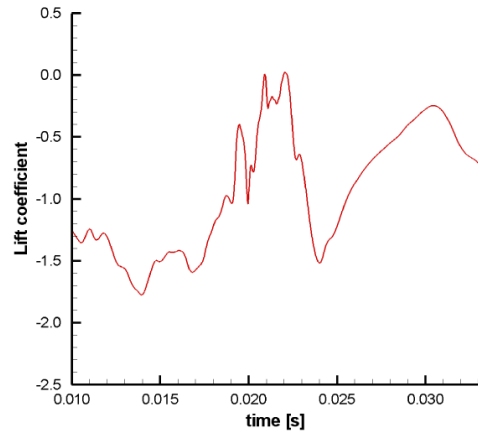


(a) 速度ベクトル

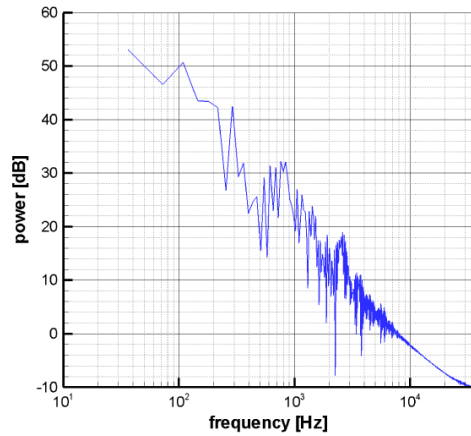


(b) 渦度分布

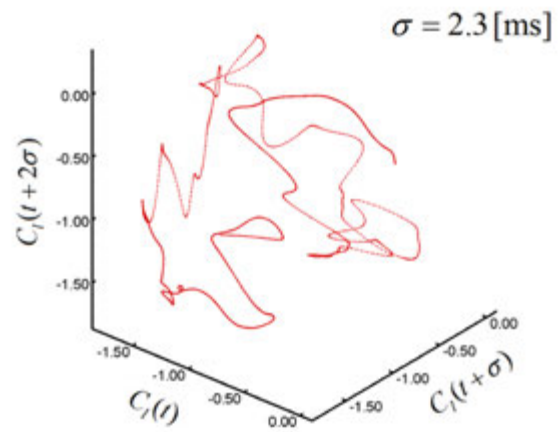
図 9 迎角 -20° での瞬時の流れ場の様子



(a) 時間履歴



(b) スペクトル分布



(c) 再構成されたアトラクタ

図 10 迎角 -20° での C_l の時間変動

4. 結論

本研究では、トンボの翅を模擬したコルゲート翼型周りの低 Re 数流れについて2次元数値解析を行い、流れ場の時間変動を観察した。併せて揚力係数の非定常性を、高速フーリエ変換と時間遅れ座標系によるアトラクタ再構成によって考察した。その結果、以下の2点が明らかとなった。

- 1) 迎角 0° の場合、渦度の生成および拡散過程と翼型凹部のスケールのバランスによって、凹部内の流れが閉じた状態となり、全体として安定した流れ場が形成されることが確認された。またこれによって、揚力係数の時間変化はほぼ定常振動として安定することが時系列データおよびアトラクタ再構成によって明らかとなった。スペクトル解析によって抽出されたピーク周波数に近い周波数をもつ流れ場の振動が確認され、流れ場と揚力係数の相関が示唆された。
- 2) 迎角 $\pm 20^\circ$ の場合、前縁における流れの剥離と、後縁における流れの回り込みが確認された。これによって、翼背後に形成された大きな剥離領域は、様々なスケールの渦度が連成した複雑な挙動を示すことが分かった。揚力係数の時間変動は、ブラウンノイズに似た連続スペクトル分布をもつことが明らかとなった。このような強い非定常性は、前述の剥離領域における複雑な流れ場の挙動に起因すると予想される。

大迎角時における複雑な流れ場と揚力係数の時間変動との対応に関しては、更なる詳細な解析が必要である。本研究では、最適直交分解法による流れ場のモード解析を検討している。この手法では、非定常流れ場の運動エネルギー値やエンストロフィ値に関するモード解析を行うことができるとされている。この手法で抽出されたモード群を渦度場に対応付けることによって、モード群の時間変動からブラウンノイズに類似したスペクトル分布の考察ができると思われる。

参考文献

- 1) 米本 浩一ら, “三次元基本翼の広域レイノルズ数域での空力非線形性,” JAXA-SP-08-009, pp.140-145, 2009.
- 2) 築瀬 祐太ら, “低レイノルズ数における DBD プラズマアクチュエータが作用する NACA0012 翼型まわりの流れ場の特性,” JAXA-SP-11-015, pp.83-87, 2011.
- 3) Mueller, Thomas. J. ed., *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications*, AIAA, 2001.
- 4) Kesel, A. B., “Aerodynamic Characteristics of Dragonfly Wing Sections compared with Technical Aerofoils,” *J. Experimental Biology*, vol.203, pp.3125-3135, 2000.
- 5) Harlow, F. H. and Welch, J. E., “Numerical Calculation of Time-Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface,” *Phys. Fluids*, Vol.8, No.12, pp.2182-2189, 1965.
- 6) Kawamura, T. and Kuwahara, K., “Computation of High Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness,” *Fluid Dynamics Research*, vol.1, Issue.2, pp.145-162, 1986.
- 7) 合原 一幸 編, 『カオス時系列解析の基礎と応用』, 産業図書, 2000.