

付加減衰法による 非定常空気力の測定とその改良

1110323 佐々木 あずさ

高知工科大学 工学部 社会システム工学科

付加減衰法に改良を加え、従来の方法の欠点をカバーして、振幅が増加した時に減衰が低下する場合でも安定な計測を可能とした。具体的には、目標振幅と実測振幅の大小関係によって制御係数を増減するon-off制御を採用した。準定常理論が成立するとされる角柱の非定常空気力を対象とし、新しく開発した付加減衰法の精度について検討した。低風速では準定常理論が成立するが風速の増加とともに作用空気力が準定常空気力から離れることが分かったため、最終的には自由振動法で求めた減衰率と付加減衰法の測定値を比較することにより、提案した測定法が十分な精度を有することを実証した。

Key Words : 付加減衰法, 非定常空気力, 角柱のギャロッピング, 自由振動法

1. はじめに

ギャロッピングやフラッタなどの自励振動の原因は、物体の運動によって発生する空気力にある。従って、振動中の物体に作用する空気力、すなわち非定常空気力を正確に把握することは現象の理解や有効な対策を考えるうえで極めて重要である。非定常空気力の測定法としては、古くから自由振動法と強制振動法が知られている。自由振動法は応答観測実験と同じ装置を使用するので簡便であるが、減衰率あるいは発散率から空気力を計算するので、厳密には一定振幅の定常振動状態での空気力を求めることができない。強制振動法では供試模型を一定振幅で加振するので定常状態での空気力が測定されるが、模型に作用する慣性力の除去という問題がある他、装置が大掛かりで高価であるという欠点を有する。慣性力の影響が小さい方法として非定常圧力を積分して空気力を求める方法もあるが、圧力が微小なため測定精度に問題がある。

田中は付加減衰法という新しい方法を提案し、非定常空気力の速度比例成分を正確に測定できることを報告している¹⁾。しかしながら、真値が不明な並列円柱の空気力を対象とした測定であるため、精度検証は応答との整合性に基づく定性的なものとなっている。また、減衰率が負勾配を持つ場合には安定な測定ができないことも問題と言える。

これらの既往の知見を踏まえて、本研究では付加減衰法を改良して減衰率が負勾配の場合の測定を可能にするとともに、測定精度の定量的な検証を試みることにする。

2. 付加減衰法の概要と問題点

2.1 付加減衰法の概要

非定常空気力が作用する 1 自由度振動系の運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = C_I\dot{y} + C_R y$$

ここに、 m は質量、 c は粘性抵抗係数、 k は剛性、 C_I 、 C_R は各々非定常空気力の速度比例成分、変位比例成分である。ここで、速度に比例する第 3 の力を制御力として振動系に加える。比例係数を制御係数 D で表し、空気力と制御力を左辺に移項すれば運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{y} + (c - C_I - D)\dot{y} + (k - C_R)y = 0$$

ただし、制御力の発生に必要な速度は、振動変位の測定値をリアルタイムで微分して与えるものとする。符号を含めて D を適切に調整すれば、 $c - C_I - D = 0$ とすることができる。この時、振動は減衰も発散もせず一定振幅の定常振動となる。従って、逆に振動が定常となるように D を調整すれば、 c と D が既知であるから、 C_I を求めることが出来る。以上が付加減衰法の原理である。

2.2 付加減衰法の問題点

風洞実験に限らず、現実の物理系では何らかの微小な外乱が必ず存在するから完全に定常な振動の実現は不可能であり、微小な振幅の増減は避けられない。供試模型がほぼ定常な振動をしているとして、構造減衰と空力減衰の和、すなわち $c - C_I$ が振幅の増加とともに増加する場合を考える。何らかの原因で振幅が僅かに増加したとすると、減衰も増加する。増加した減衰は振幅を減少させるように作用するから、振幅は元の値に戻ることになる。振幅が減少した場合は逆に減衰の減少が振幅を増加させ、結局、ほぼ定常な振動が安定して持続する。一方、振幅の増加に伴って減衰が減少する場合は、振幅の増加は減衰の減少、すなわち更なる振幅の増加を、振幅の減少は更なる振幅の減少を招くことになるから振動は安定せず、減衰または発散することになる。制御係数 D を一定とする付加減衰法では、このような場合の非定常空気力は測定できない。この問題を解決するためには、振動を監視しながら状況に応じて制御量を変化させる能動的な制御が必要と考えられる。

3. 準定常空気力の妥当性の検証

付加減衰法の精度を直接的に検証するために、既知の空気力を測定することが考えられる。本研究では準定常理論²⁾によって応答が推定可能とされる角柱の非定常空気力を測定することとした。

空気力測定に先だって、角柱に作用する空気力が準定常空気力と一致するか否かを検証するために、応答測定実験を行った。実験には1辺40mmの正方形断面角柱を用いた。模型の質量は2.15kg、固有振動数は2.37Hzである。実験結果を表1に示す。構造減衰が極めて小さいため、低風速での応答測定となっている。

表1 角柱の応答測定結果

風速 (m/s)	応答振幅 (mm)
0.778	4.417
0.890	8.868
0.970	11.371
1.055	13.801

定常振動が生じている状態では、構造減衰と非定常空気力による負減衰の絶対値が等しい。従って、準定常空気力による減衰率（厳密には発散率であるが、絶対値を考慮して便宜的に減衰率と呼ぶ）と構造減衰率が一致すれば、作用空気力は準定常空気力と考えるとよいことになる。

角柱断面の辺長を b 、風速を V 、空気密度を ρ 、迎え角を α 、揚力係数を C_L 、抗力係数 C_D とすると準定常空気力係数は次のようになる。

$$-\frac{1}{2}\rho Vb \left(\frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right)$$

定常空気力係数は既往文献³⁾から次のように定めた。

$$\frac{dC_L}{d\alpha} = -4.04 \quad C_D = 2.0$$

準定常空気力係数は粘性減衰係数と同じ次元を持つ量であるから、 $2\sqrt{mk}$ で除し、 2π を乗じれば対数減衰率 δ と等価な量となる。無風時に計測した対数減衰率と、上記の方法で求めた対数減衰率相当の空力負減衰をプロットした結果を図-1に示す。

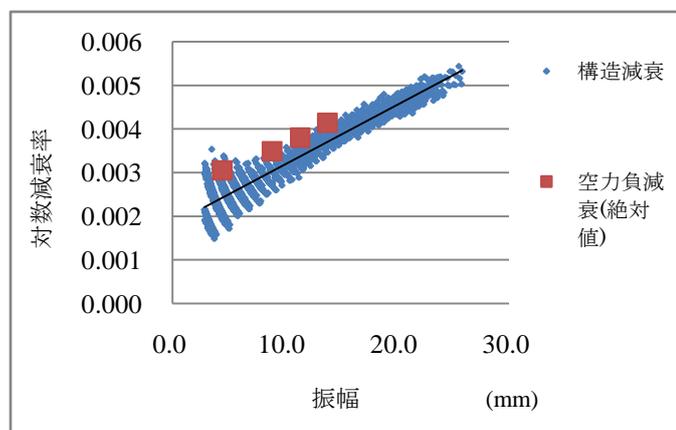


図-1 対数減衰率と空力負減衰

図-1 から分かるように、構造減衰と空力負減衰の誤差は

10%未満なのでほぼ等しいと言える。よって、低風速で角柱に作用している空気力は準定常空気力で表わされると言える。

4. 対数減衰率が負勾配の場合の制御

ボイスコイルモーターを用いて速度に比例する制御力を与えるようにセッティングした。ボイスコイルモーターは、駆動力は十分大きいがストロークが15mmと小さいため、梃子を用いてストロークを拡大した。梃子の先端と測定洞内の供試模型をピアノ線で接続して模型に制御力を与える。ボイスコイルモーターと梃子のセッティングの様子を写真-1、測定洞内の模型を写真-2に示す。



写真-1 制御設置

写真-2 測定洞内の模型

モーターの可動部および回転軸のベアリングなどの摩擦の影響で、振幅が増加すると減衰が低下する現象が生じた。従って、無風時でも付加減衰法では測定が困難であり、付加減衰法の改良を先行させる必要があった。そこで、目標振幅と実測振幅の大小関係によって、制御係数 D を増減する一種の on-off 制御で安定化を図ることを考えた。まず、 D の概略値を手動で設定する。時定数 10sec の RMS メーターを用いて振幅を実測し、振幅の測定値と目標振幅の大小によって、 D を増減させる。今回の実験では構造減衰が大きいため与えた制御力が負減衰であったので、実測振幅が目標振幅を超えている場合は $0.9D$ 、目標振幅以下は $1.1D$ の制御力を加えた。振幅が小さい場合や風速が高い場合など、安定化が難しく制御力増減の幅を増す必要がある場合もあったが、概ね、上記の on-off 制御で安定化する事が出来た。結果、対数減衰率が負勾配であっても制御をかけることが可能となった。

on-off 制御時の制御電流波形の例を図-2に示す。図から明らかなように、制御電流は不連続な増減を繰り返すので、1分あるいは2分間の計測値の RMS 値を求め、RMS の $\sqrt{2}$ 倍をもって平均的な振幅とした。

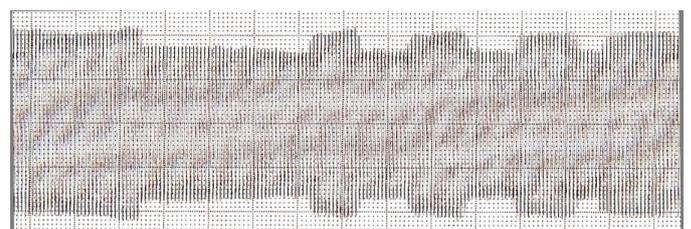


図-2 制御時の制御電流波形

5. 付加減衰法による測定空気力と準定常空気力

5.1 測定値と準定常理論値

改良した付加減衰法を用いて角柱に作用する非定常空気力を測定し、測定結果を 3. で妥当性を検証した準定常空気力と比較して、測定精度を検討する。

制御力の計測方法は次の通りである。まず、モーターに直列に接続した抵抗両端の電圧からモーター駆動電流を求める。これにモーターの推力定数を乗じて力に換算し、最後に供試模型の速度振幅で除して制御係数 D を求める。

実験風速は約 1.8m/s から約 8.0m/s とし、約 1m/s 間隔で計測した。また、測定振幅は約 6mm から 15mm まで 3mm 間隔とした。

測定結果を図-3 に示す。図の横軸は各風速における準定常空気力係数、縦軸は計測した非定常空気力係数である。線で結んだ複数の点は、同一風速で振幅が異なる測定値を表わす。3. で述べたように作用空気力が準定常空気力に等しく、かつ測定が正確であれば、全ての測定値は 1:1 の直線上にプロットされるはずであるが、図から分かるように、測定値は準定常理論値に比べてかなり小さい。特に風速が高い場合、振幅が小さい場合に準定常理論値からの乖離が大きい。準定常理論に照らせば、相対迎え角が小さい場合に測定値が小さくなると言える。逆に、相対迎え角が大きく流れの非定常性が強まると作用空気力は準定常空気力に近づくとも言えよう。また、図から分かるように測定値のばらつきが大きいことも問題と言える。

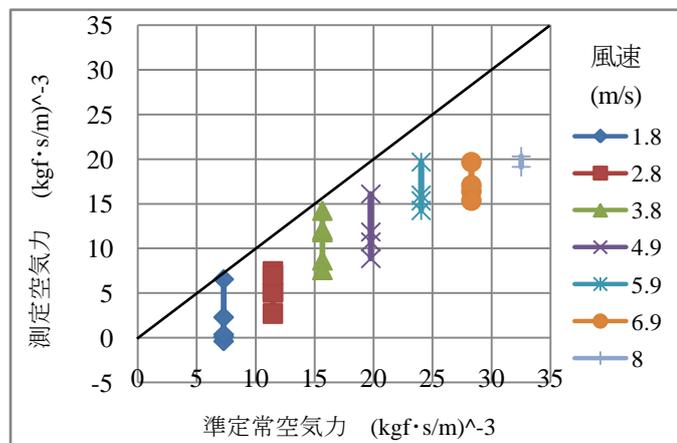


図-3 測定結果

5.2 作用空気力の検討

まず、ばらつきの原因としてモーターや梘子回転軸のベアリングの動きを点検した結果、動作が円滑でないように思われたため、これらを新品と交換した。交換後、動作は改善されたが、念のために無風時の構造減衰に関して付加減衰法による測定の精度をチェックした。結果を図-4 に示す。図の横軸は振幅、縦軸は対数減衰率である。図中の付加減衰法の測定値は、前述の方法で求めた D を対数減衰率相当の値に換算したものである。図から、on-off 制御という簡易な制御ではあるが、測定値は減衰波形から求めた対数減衰率とよく一致していることが分かる。

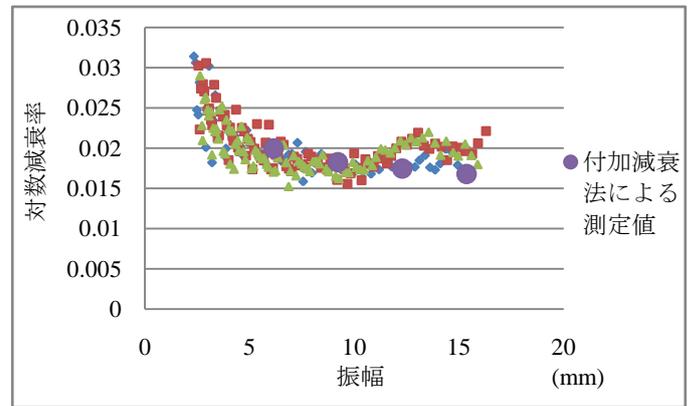


図-4 無風時の構造減衰

そこで、再度、空気力の測定を行ったところ、測定値が準定常理論値より小さい傾向には変化がなかった。構造減衰が正しく測定されていることから、空気力の測定方法に問題があるとは考え難い。測定法に問題がないとすれば、実際に角柱に作用している空気力が準定常空気力より小さいものと考えざるを得ない。非定常性が小さい場合に計測値が小さくなる傾向があることから、角柱背後に発生するカルマン渦が影響して非定常空気力が減少している可能性があると考えた。

カルマン渦を消すためには、模型背後にスプリッタープレートを設ける方法がよく知られている。ここでは気流方向長さ 350mm のプレートを設置して空気力測定を試みた。結果を図-5 に示す。図から分かるように、最も低い風速で振幅の大きい場合の測定値（図中で矢印で示した点）は準定常値にかなり近い値となったが、風速が高い場合、あるいは振幅が小さい場合の測定値は準定常値をかなり下回っており、理論値とはかけ離れた結果が得られた。

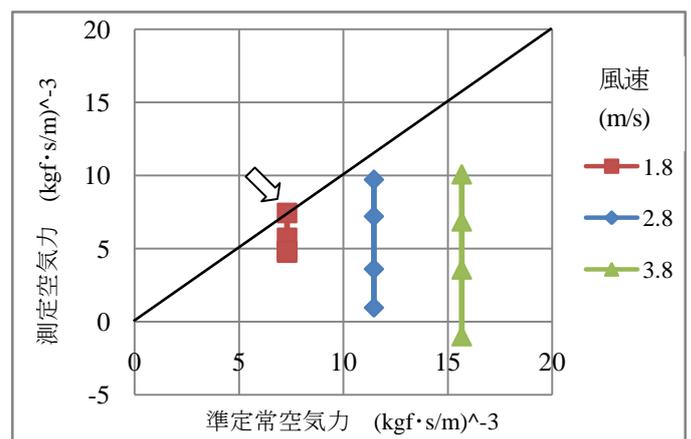


図-5 プレート取付後の測定結果

6. 自由振動法との比較による付加減衰法の精度検証

測定値と準定常理論値が一致しない理由として、付加減衰法による測定が正しくないか、あるいは実際に角柱に作用している非定常空気力が準定常空気力と異なっているかのどちらかであると考えられる。前述のように無風時の構造減衰は

付加減衰法で精度よく測定できる。提案している測定法の精度が送風の影響で悪化することはあり得ないであろう。そうであれば、当初の想定とは異なり、実際に角柱に作用している非定常空気力は準定常空気力と異なるとしか考えられないであろう。

精度検証に準定常空気力を用いることができないと判断されることから、ここでは、自由振動法から求めた空気力と比較して精度を検討することとした。幸い、今回の実験では減衰率がかなり小さいので、隣接する波の大きさの変化も小さく、定常振動時の空気力を求めることができないという自由振動法の欠点の影響はさほど大きくない。

そこで、送風状態における加振後の振動波形から対数減衰率と振幅の関係を求め、図4の場合と同様にして、付加減衰法から求めた制御力を対数減衰率相当の値に変換したものと比較することとした。結果を図-6、図-7に示す。図-6は風速2.8m/s、図-7は風速3.8m/sの時の結果である。縦軸は構造減衰と空力負減衰の和の作用を対数減衰率の形で表わしたものである。本実験では、空気力は発散効果を持っているので構造減衰の効果を相殺する結果、図-4に比べて対数減衰率が減少していることが明らかである。付加減衰法では定常状態で測定しているから制御力は構造減衰と空力減衰の和に等しい。よって、これを対数減衰率相当に換算すれば、自由振動波形から求めた値と一致するはずである。図から、明らかのように、両者は極めてよく一致しており、本研究で開発した簡易な制御を用いた付加減衰法は十分高い精度で空気力を測定できると言える。

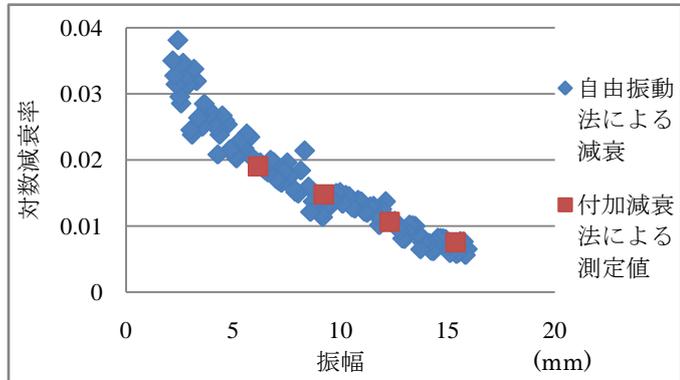


図-6 測定精度の検証 (風速 2.8m/s)

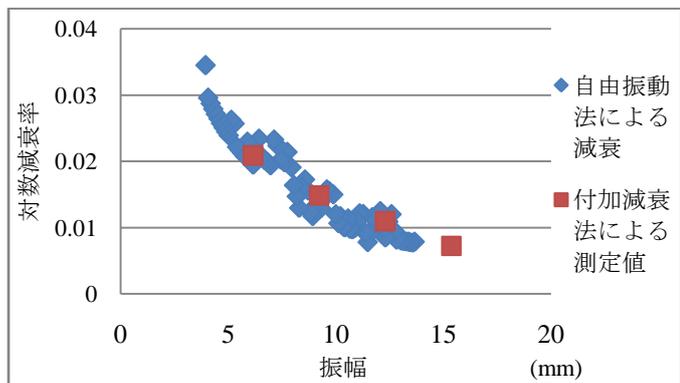


図-7 測定精度の検証 (風速 3.8m/s)

なお、3.で検証した通り、低風速で角柱に作用する空気力は準定常空気力に一致する。付加減衰法を用いるために梘子とモーターを設置した場合は構造減衰が増加し、これに伴って振動発生風速が増加した結果、カルマン渦の影響が大きくなって作用空気力が準定常空気力より減少したのではないかと推測される。

渦を消すために、スプリッタープレートを設けた状態では、角柱周りの流れを支配する境界条件がかなり変化しているので、この状態での角柱に準定常理論を適用することの妥当性には疑問が多いと考えるべきかもしれない。参考のために行った数値計算では、スプリッタープレートは渦の発生だけでなく、角柱後流の平均速度にもかなり大きな影響を与えているようであり、これを空気力測定法の精度検証に用いることには無理があるように思われる。

この他、風速の増加に伴うレイノルズ数増加の影響も考えられるが、この問題を検討するにはデータが不足しており、詳細は今後の課題である。

7. 結論

- (1) 付加減衰法の精度検証に角柱に作用する準定常空気力を用いることを考え、応答観測実験の結果と準定常空気力を比較した。その結果、応答を観測した低風速では作用空気力は準定常空気力に一致することを明らかにした。ただし、風速の増加に伴って作用空気力は準定常空気力よりかなり小さくなることから、最終的には測定法の精度検証には使用できないことが分かった。
- (2) 振幅の増加に伴って減衰が低下する場合に付加減衰法を適用するために測定法の改良を行った。具体的には、目標振幅と応答を比較して、両者の大小関係によって制御係数を増減させる一種の on-off 制御を導入した。簡易な制御であるため、制御力は不連続に増減するが、十分長い時間の平均振幅を測定すれば十分安定な計測が可能であることが分かった。
- (3) 新たに開発した方法で、無風時の構造減衰、および送風時の構造減衰と空力減衰の和を計測した結果、自由振動法で求めた値と極めてよく一致し、本方法によって十分高い精度での空気力測定が可能であることを実証した。

参考文献

- 1) 田中千番：「減衰制御法による並列円柱の実測非定常空気力」 高知工科大学修士論文, 2010
- 2) Parkinson, G.V.: Aeroelastic Galloping in one Degree of Freedom, Proc. Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures (Teddington), Her Majesty's Stationary Office, 1963.
- 3) 中村泰治：「構造物のフラッタ」 日本航空宇宙学会誌, Vol.21, No.235, 1973.