

自由落下するパラシュート周りの流れ場の解析

*東京農工大学工学研究院 機械システム工学専攻

東京農工大学工学研究院 機械システム工学専攻

東京農工大学工学研究院 機械システム工学専攻

中 村 健 志

高 橋 俊

新 井 紀 夫[†]

Numerical Analysis Around a Free Falling Parachute

Takeshi NAKAMURA, Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

Shun TAKAHASHI, Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

Norio ARAI, Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

1 緒言

パラシュートは収納スペースが小さく軽量で、大きな抵抗力を発生させることができるために空力減速手段として広く用いられている。しかしながらパラシュートが膜状の柔軟な構造であるために大きな変形が生じ、また開傘過程では周囲の流速が大きく変化するということもあり、実際のパラシュートの落下挙動に関しては現在も研究がなされている。実験的な手法による研究から、パラシュートの降下時には傘体部の周縁部から放出される渦に起因するブリージングという周期的な変形が確認されている。その影響もあってパラシュート上の剥離位置は非定常に変化し、後後に放出された渦との干渉から生じる強い流体構造連成の振動現象が確認されている¹⁻³⁾。以前は実験的手法による研究の方が多く見られたが、計算機性能と数値解析技術の向上によって、数値シミュレーションによる現象の把握を目的とした研究も多く見られている⁴⁻⁷⁾。しかし複雑な剥離を伴うパラシュートの挙動に関しては今後も研究を行ない、流体力学のみならず学際的な観点からデータの集積に努めるべきであると言える。

一般にパラシュートは間違いなく開傘可能であることが最も重要な条件となるが、この開傘過程では衝撃荷重という大きな荷重が生じることが知られている。この衝撃荷重を正確に見積もることが、傘体を含んだパラシュート全体を設計する上で非常に重要となり、またその後には物資を目標地点に効率良く到達させる落下軌道も考慮する必要がある。そのためこれまでの研究で、衝撃荷重を軽減するために傘体上の縁近傍に通気孔を設けた

研究⁸⁾や、その後のパラシュートの挙動を安定化させる研究など⁹⁾、流体力学的な観点からの現象の理解と応用法に関する研究がなされてきた。

このような背景を踏まえ、本研究では最終的には多分野連成の数値解析によるパラシュート周りの流れ場の正確な再現を目的とする。そのため本稿ではまず剛体としたパラシュートの自由落下シミュレーションにより、その流れ場と挙動を把握する。

2 数値計算法

2.1 流体計算法

自由落下現象を扱うため、物体とともに計算空間を移動させる必要がある。そこで支配方程式には ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) 法を適用した 2 次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式(1)を用いる^{10, 11)}。ここで、(1)の中に現れている \mathbf{u}_g は格子の移動速度を表している。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \mu \Delta \mathbf{u}$$

解法には Fractional-step 法^{12, 13)}を用い、対流項は 3 次精度風上スキーム¹⁴⁾、粘性項と圧力の Poisson 方程式は 2 次精度中心差分法にて離散化を行なう。

本研究においてパラシュートは剛体の軸対称凹状物体形状に単純化し、物体適合格子座標を用いて解析を行なう。

*〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

[†]E-mail : arai@cc.tuat.ac.jp

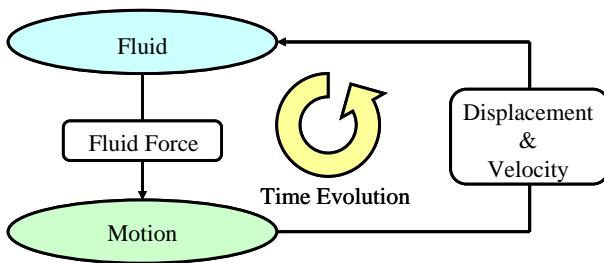


図1 連成解析のアルゴリズム

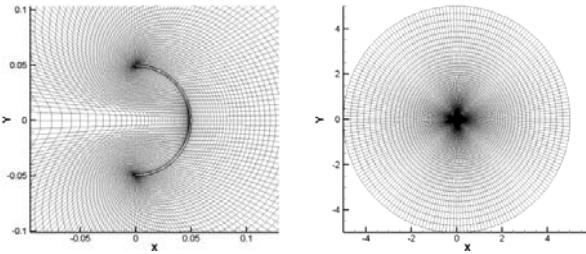


図2 2次元パラシュート模擬形状周りの計算格子

向に201点、径方向に101点の総格子点数約2万点のものを用いる。

凹状物体を囲む流体の条件は標準大気のものを用いる。解析は、はじめに物体を等速で強制的に落下させて、流れ場が発達した後に自由落下を開始させる。等速落下の速度は0.4 m/sとし、この速度と物体開口部を基準長として求めたReynolds数は2600程度である。

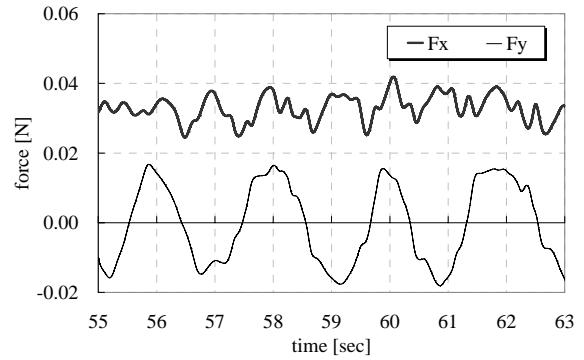


図3 凹状物体に加わる流体力の時間履歴

2.2 流体・運動連成解析手法

本研究では自由落下するパラシュートを解析すべく、流体の基礎方程式と式(2)の運動方程式を連成させて解析を行なう。ここで M はパラシュートの質量、 $\mathbf{a}=(a_x, a_y)$ は各軸方向の加速度、 F_x, F_y は各軸方向の流体力、 g は重力加速度である。本研究では付加質量については考慮していないため、式(2)の中には現れていない。

$$\begin{cases} Ma_x = F_x + Mg \\ Ma_y = F_y \end{cases} \quad (2)$$

流体解析によって得られた各軸方向の力を式(2)に与えてその時間における加速度 \mathbf{a}^n を求め、物体の移動速度 \mathbf{u}_b^{n+1} を以下の式(3)から求め、次のタイムステップにおける物体の移動速度とする。

$$\mathbf{u}_b^{n+1} = \mathbf{u}_b^n + \mathbf{a}^n \Delta t \quad (3)$$

連成手法には弱連成を用い、今回は内部反復を用いずに時間発展させる。解析アルゴリズムの模式図を図1に示す。

3 解析条件

本研究ではパラシュートを剛体の軸対称の凹状物体としてモデル化する。開口部直径は0.10mとし、パラシュートの質量は0.10 g, 1.0 g, 5.0 g の3ケースを扱う。計算格子には図2に示すようなO型格子を用い、物体周方

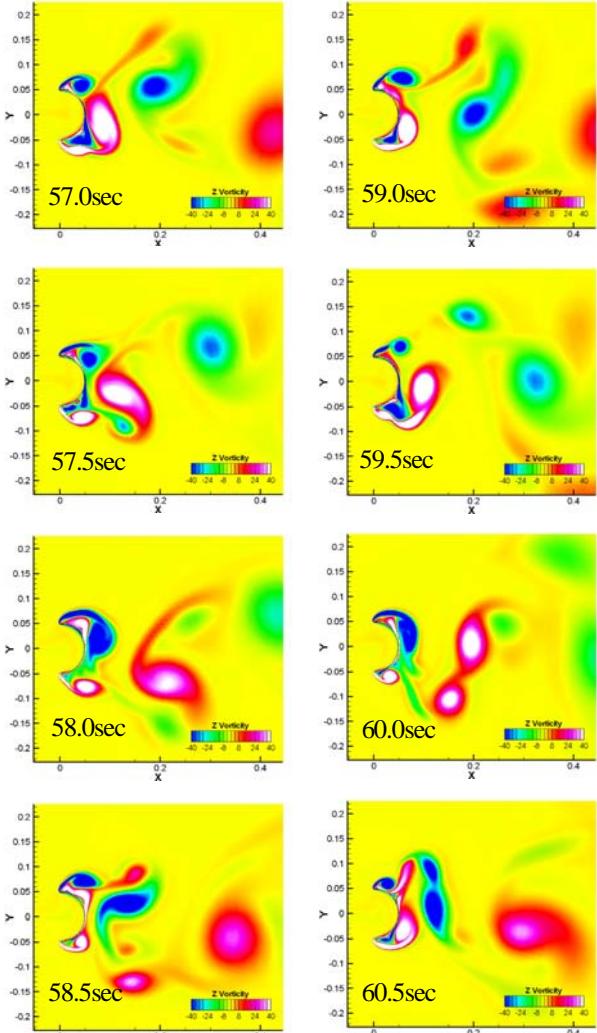


図4 等速落下する凹状物体周りの瞬時渦度場

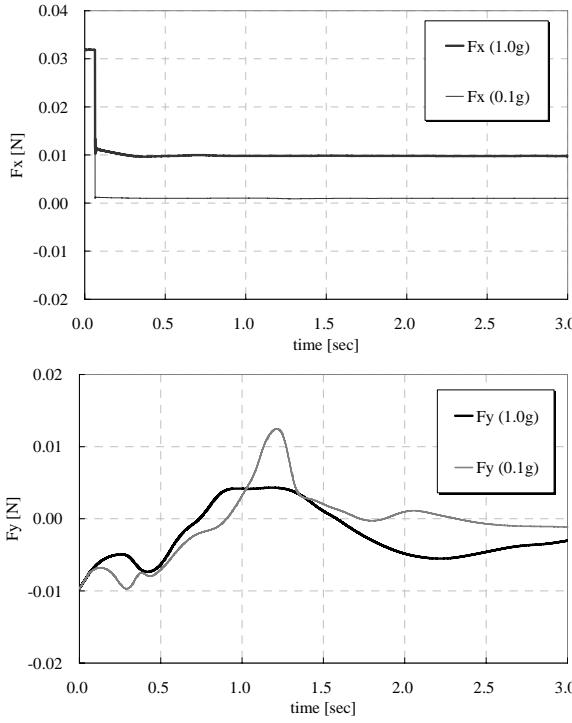
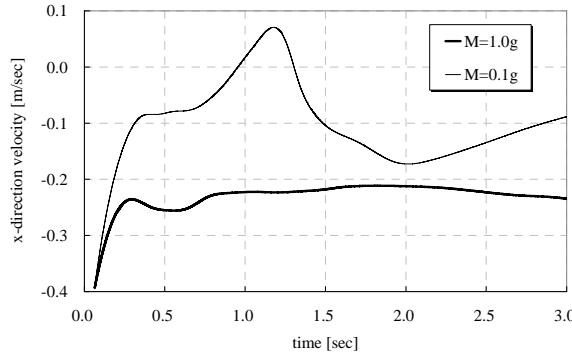


図 5 自由落下開始からの流体力の時間履歴

図 6 自由落下開始からの x 軸方向速度の時間履歴

4 解析結果

4.1 等速落下時の流れ場

まず、自由落下を開始する前の等速落下の状態における流体力の時間履歴を図3に示す。凹状物体は x 軸方向に等速落下しており、 F_x が抗力、 F_y が揚力に対応している。揚力に対応する F_y には周期的な特性が見られるが、抗力に対応する F_x には明確な周期性は見られない。

この場合の流れ場の可視化図を図4に示す。それぞれの可視化図はある瞬間の渦度を示している。図から物体の上下の縁の部分から交互に大きな剥離渦が放出されていることが確認され、これによって周期的な流体力 F_y が生じていると考えられる。一方で、大きな剥離渦の中に強い二次渦が生じているのが確認され、非周期的な力である F_x はこの二次渦の効果によって生じていると考えられる。

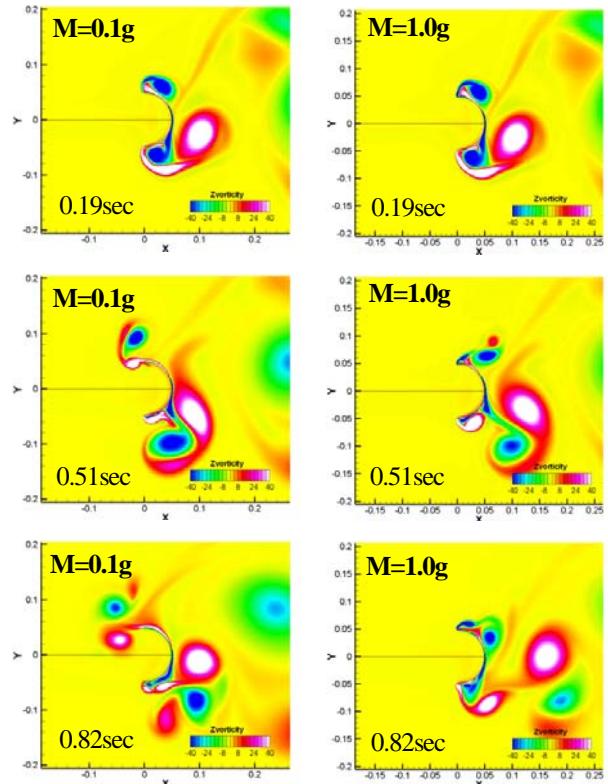


図 7 自由落下中の瞬時渦度場の比較

4.2 1自由度の自由落下 (x 軸方向のみ)

前述の4.1節で得られた等速落下の流れ場を初期流れ場として、まず x 軸方向にのみ運動させる。これは図4において上下方向の運動を拘束しつつ、自由落下させることに相当する。凹状物体の質量は0.10 gと1.0 gの2通りとする。

流体力と自由落下速度の時間履歴を図5と図6に示す。図5を見ると、抗力に相当する x 軸方向の力は自由落下を開始した直後に一定値になっているが、揚力に相当する y 軸方向の力が変動していることが確認される。これにより、拘束条件が無い場合にはこの流体力によって運動することが予想される。また、質量が大きい方が終端速度が大きくなると同時に抗力が大きくなっている、その一方で揚力の変動は減少している。この要因を流れ場の可視化から考察する。

図7は瞬時の渦度場を示しており、左側が質量0.1gの場合、右側が質量1.0 gの場合である。これらの図から、質量が0.1 gの場合には1.0 gの場合よりも終端速度が小さいため、物体後部の剥離渦が長く定在していることが確認される。これにより、0.1 gの場合の y 軸方向の力が大きく変動していると考えられる。また0.1 gの場合には、自由落下開始から0.82秒後に、物体が急激な減速を行なったために剥離渦が物体の前方に移動した様子が確認される。これはこの物体の質量が非常に軽いために見られ

た現象であると考えられる。

4.3 2自由度の自由落下 (xy 軸方向に運動)

次に y 軸方向の運動を拘束せずに自由落下させる。凹状物体の質量を 0.1 g , 1.0 g , 5.0 g と変えて比較する。初期流れ場は x 軸方向にのみ運動させた場合と同様である。それぞれの解析において、9.8秒間で得られた軌跡を図8に示す。質量が大きくなり終端速度が速くなるにつれて、移動距離が長くなっていることが確認できる。最も質量が小さい場合にはほとんど落下しておらず、むしろいったん上昇している様子が見られる。これは質量が軽いために、初期に物体後方に発達した剥離渦によって上方に引かれてることで生じたものと考えられる。

図9に質量が 1.0 g の場合の自由落下中の渦度の可視化図を示す。この結果より、初期流れ場で生じた渦が、その後の自由落下中に生じる渦よりも大きく強いことが確認される。このことから本解析における物体の運動が初期流れ場に依存する可能性が考えられる。しかし、初期流れ場で生成された強い渦により大きく減速された物体は、その後運動の方向を変化させながら自由落下している。このことから、いったん強い渦が完全に剥離してしまえば、物体に対してそれほど大きな影響を与えないと言える。2.0秒後の時には紙面右方向に運動しており、2.9秒後では反転して左方向に運動を開始している。その後しばらく左方向に運動し、5.8秒後に再度反転して右方向へ運動を開始している。

また、質量が最も大きい場合には、左右に振動した後に同一の方向に落下し続ける挙動が見られる。この時の流れ場の様子は図10のようになっており、落下の進行方向と物体の凹型形状によって安定した流れが上面に形成されている。このため物体の縁近傍に非常に低圧な箇所が生じ、そちら側に運動し続けることが考えられる。過去の研究で、縁近傍に通気孔を設けることで運動を安定化させうる可能性が示唆されていたが⁹⁾、それはこのような安定した流れが発達するのを抑制することで達成できていたと考えられる。

5まとめと今後の課題

本研究ではパラシュートを模擬した凹状物体周りの自由落下中の現象を捉えるべく、2次元非圧縮性Navier-Stokes方程式と運動方程式を連成させて流体運動連成解析を行なった。

まず1自由度の運動との連成解析から、質量の違いによる剥離渦の影響の違いを確認した。質量が大きな場合には落下の終端速度が大きくなるため、剥離渦が物体から離れるのが速く、結果として運動が安定することが見られた。

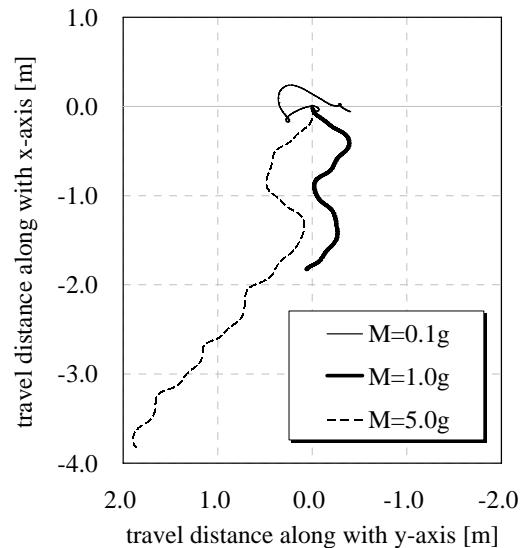


図8 自由落下運動の軌跡

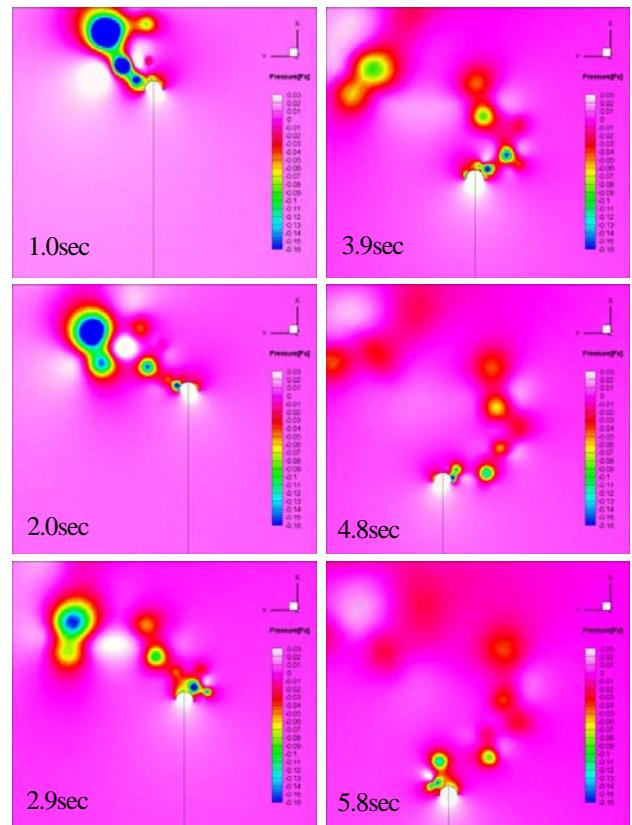


図9 自由落下する質量 1.0 g の凹状物体周りの渦度場

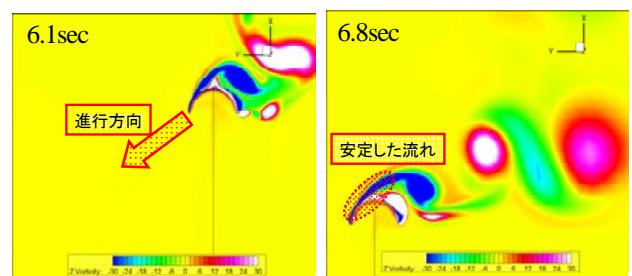


図10 質量 5.0 g で一定方向に落下しているときの渦度場

次に2自由度の運動との連成解析から、質量の違いによる移動距離の違いを確認した。具体的には、質量が大きくなるほど移動距離は長くなること、初期の流れ場で生成された渦の影響は限定的であること、安定した流れの形成が一定方向への運動を促すことが確認された。

本研究は2次元解析であるので、今後は3次元解析¹⁵⁾を行なってより詳細な運動を捉えるとともに、より高いReynolds数の流れに対してもアプローチする必要がある。また本研究では並進2自由度の運動を扱ったが、実際に回転運動を考慮する必要があるため、最終的には3次元6自由度の運動方程式との連成解析を行なう。さらに、パラシュートにおいて問題となる大変形による後流渦との干渉などを考慮すべく、変形解析との連成解析も行なう必要があるであろう。

謝辞：本研究は、宇宙航空研究開発機構、情報・計算工学センターの平成22年度特定課題共同研究「学際シミュレーションによる高精度なパラシュートの設計開発」の援助を受け、JAXA Supercomputer System (JSS)を使用して解析を実施した。

引用文献

- 1) Johari, H. & Levshin, A.: Interaction of a Line Vortex with a Round Parachute Canopy, *J. Fluid Mech.*, 25 (2009) 1258-1271.
- 2) Desabrais, K. J.: Velocity Field Measurements in the Near Wake of a Parachute Canopy, Ph.D. Thesis, Worcester Polytechnic Institute, ISBN: 9780493772653, Dissertation Abstracts International, 63-B (2002), 3801-3936.
- 3) 大槻義彦：身近な流体力学（パリティ編集委員会編、丸善、2000）。
- 4) Stein, K. R., Benney, R. J., Tezduyar, T. E., Leonard J. W. & Accorsi, M. L.: Fluid-Structure Interactions of a Round Parachute: Modeling and Simulation Techniques, *J. Aircraft*, 38 (2001) No. 5, 800-808.
- 5) 三好理也、森浩一、中村佳朗：Immersed Boundary法を用いたパラシュートの開傘過程の流体・構造連成シミュレーション、日本航空宇宙学会論文集, 57 (2009) 670, 419-425.
- 6) Kim, Y. & Peskin, C. S.: 3-D Parachute simulation by the immersed boundary method, *Comput. Fluids*, 38 (2009) 1080-1090.
- 7) Stein, K., Benney, R., Kalro, V., Tezduyar, T. E., Leonard, E. & Accorsi, M.: Parachute Fluid-Structure Interactions: 3-D Computation, *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 190 (2000) 373-386.
- 8) 辛島桂一、佐藤清、森戸俊樹：亜音速パラシュートの動的荷重特性、日本航空宇宙学会誌, 41 (1993) 468, 35-43.
- 9) 青柳篤貴、新井紀夫、高倉葉子：一様流中で自由振動する凹状物体周りの流れ(スリットの影響)、第41回流体力学講演会/航空宇宙シミュレーション技術シンポジウム2009 講演集, (2009) 227-228.
- 10) Arai, N., Houzu, H. & Takakura, Y.: Oscillation Pattern of Parachute and Concave Body, *AIAA Paper*, (2007) 2007-2531.
- 11) Takahashi, S., Monjugawa, I. & Nakahashi, K.: Unsteady Flow Computation around Moving Airfoils by Overset Unstructured Grid Method, *Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci.*, 51 (2008) No. 172, 78-85.
- 12) Kim, J. & Moin, P.: Application of a Fractional-step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations, *J. Comput. Phys.*, 59 (1985) 308-323.
- 13) Perot, J. B.: An Analysis of the Fractional Step Method, *J. Comput. Phys.*, 108 (1993) 51-58.
- 14) Kawamura, T. & Kuwahara, K.: Computation of High Reynolds number Flow around Circular Cylinder with Surface Roughness, *AIAA Paper*, (1984) 84-0340.
- 15) 中村健之、高橋俊、新井紀夫：自由落下するパラシュート周りの流れ場の解析、第24回数値流体力学シンポジウム, (2010).